Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2020

L МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ

Москва
17 – 20 ноября
2020 г.

Москва Издательский дом МЭИ 2020

УДК 621.3
Ф 33

Ф 33 **Фёдоровские** чтения — 2020: L Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 17—20 ноября 2020 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. — М.: Издательский дом МЭИ, 2020. — 435 с.

ISBN 978-5-383-01439-4

Публикуются материалы Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи «Фёдоровские чтения — 2020», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 17—20 ноября 2020 г.

Научная тематика конференции — «Энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии». Публикации характеризуются охватом широкого круга проблем в областях электроснабжения и энергоэффективности, энергосбережения и энергосберегающих методов, рационализации систем электроснабжения предприятий и организаций, использования собственных источников энергии в системах электроснабжения, нетрадиционных и возобновляемых источники энергии. Сборник предназначен для участников конференции и может быть полезен широкому кругу специалистов, занятых проектированием и эксплуатацией электрического хозяйства, преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам.

Научное издание

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ — 2020
L Международная научно-практическая конференция
с элементами научной школы

Корректор Г.Ф. Раджабова
Компьютерная верстка М.Н. Маркиной

Подписано в печать с оригинал-макета 16.11.20
Бумага офсетная Печать офсетная Формат 60×90/16
Усл. печ. л. 27,2 Уч.-изд. л. 24,3

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2
Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии», Москва, Волгоградский пр-т, д. 45, корп. 5

ISBN 978-5-383-01439-4

© Авторы, 2020
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2020

СЕКЦИЯ 1

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Е.В. Гальперова, galperova_e_v@mail.ru,
О.В. Мазурова, ol.mazurova@yandex.ru,
ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ РОСТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Современное развитие мировой экономики сопровождается активной электрификацией всех секторов потребления и ростом спроса на электроэнергию как наиболее удобного, гибкого и универсального источника энергии. С 1990 г. до настоящего времени уровень электрификации в мире вырос с 31 до 36 %, и в перспективе этот тренд продолжится [1]. Ключевыми факторами повышения спроса на электроэнергию становятся электрификация быта и транспорта, расширение использования электрофизических и электрохимических процессов в промышленности, повышение электроемкости сельского хозяйства, увеличение парка портативных электронных устройств [2].

Ускоренными темпами развиваются новые направления использования электроэнергии, связанные с цифровизацией различных сфер деятельности. В будущем крупными потребителями электроэнергии станут информационно-коммуникационные технологии (ИКТ). Так, в мире в 2007—2012 гг. среднегодовые темпы прироста потребления электроэнергии ИКТ составили примерно 7 %, в то время как общего — 3 %. В 2015 г. в мире центры обработки, хранения и распространения информации) потребляли порядка 416 ТВт·ч или 2 % мирового спроса на электроэнергию, а сети передачи данных — еще 185 ТВт·ч (1 % мирового спроса) [3]. Согласно прогнозным оценкам [4], «к 2025 г. индустрия хранения и обработки данных будет использовать пятую часть всего производимого в мире электричества».

Перевод автотранспорта на электрическую энергию становится современным глобальным трендом, а существующие прогнозы предсказывают бурный рост парка электромобилей уже в недалеком будущем. В 2018 г. общее количество электромобилей в мире достигло почти 4 млн ед., из них 3,5 млн пассажирских электромобилей и 421 тыс. электробусов [5]. В соответствии с прогнозом МЭА количество электромобилей будет возрастать

примерно на 50 % в год и достигнет к 2020 г. 10 млн ед., а к 2025 г. — 30 млн ед. К 2040 г. мировой парк электромобилей составит приблизительно 50 %.

В перспективе транспортные средства на электрической энергии станут не только крупными потребителями электроэнергии, но и в случае их крупномасштабного внедрения (при доле парка 30 % и более) будут использоваться в качестве распределенного накопителя энергии. Эта концепция получила название «vehicle-to-grid» [6]. Владельцы электромобилей могут присоединиться к электросети, отдавая электроэнергию обратно в сеть и получая при этом дополнительный доход, или использовать ее запасы для нужд домохозяйств, например, в период высоких тарифов.

Дальнейшая электрификация процессов труда и технологий позволит повысить производительность труда, улучшить качество жизни населения, охрану окружающей среды. Обеспечение возрастающей потребности в электроэнергии экономики и населения страны, вызванной новой электрификацией транспорта, бытовых и производственных процессов, является ключевой задачей энергетики.

Долгосрочное прогнозирование электропотребления является важным этапом при разработке стратегий в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов и политики, направленной на повышение качества жизни населения. Спрос на электроэнергию формируется под влиянием объективно существующих тенденций и сложных взаимосвязей между условиями и темпами развития экономики и энергетики, а также других факторов [7, 8].

Для исследования и прогнозирования потребностей в энергоносителях в мире применяется множество методов [9–11]. На среднесрочную (5—10 лет) и долгосрочную (10 и более лет) перспективы используются метод прямого счета, метод «затраты–выпуск» на основе межотраслевого баланса, имитационные и оптимизационные методы, методы экспертных оценок и международных сравнений, а также их различные комбинации. Например, сочетание нормативного метода и имитационного моделирования энергопотребления с макроэкономическими и другими показателями [12—14]. Основными недостатками указанных методов являются отсутствие связи с динамикой цен на энергоносители и оценок ценовой эластичности спроса на топливо и энергию.

Для долгосрочного прогнозирования энергетики разных стран разработаны и постоянно развиваются модельно-информационные комплексы, включающие модели для прогнозирования спроса на электроэнергию. К числу наиболее известных, применяемых в европейских странах и США, относятся: MARKAL [15], MESSAGE [16], NEMS [17], PRIMES [18], MESAP [19], а из отечественных — модельно-информационный комплекс

ИНЭИ РАН «SCANER» [20]. Подробное описание методов и анализ опыта использования моделей представлены, например, в [11, 12].

За рубежом пристальное внимание уделяется способам оценки и учету ценовых взаимосвязей энергетики и экономики. Здесь можно выделить три поколения моделей: первое основано на использовании традиционных функций спроса топлива и энергии, второе базируется на моделях общего равновесия (см., например, [21]), в третьем используют модели на основе обобщенной функции затрат производственной функции Леонтьева (см., например, [22, 23]), а также имитационные расчеты на сложных комплексах энерго-экономических моделей, позволяющих учесть прямые и косвенные эффекты от изменения цен (см., например, [24]). В России опыт оценки ценовой эластичности спроса является очень ограниченным [25—28].

Методический подход для долгосрочного прогнозирования спроса на электроэнергию. В ИСЭМ СО РАН разработан и постоянно развивается методический подход для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на топливо и энергию, особенностью которого является учет конъюнктуры региональных энергетических рынков и роста неопределенности перспектив развития экономики и энергетики.

Прогнозирование спроса на электроэнергию – это многоэтапный итерационный процесс согласования результатов решения задач во временном и территориальном разрезах (см. подробнее [29]). При этом результаты последующих этапов могут потребовать корректировки предыдущих и новых циклов расчетов. Подход реализован в виде модельного комплекса и включает в себя макроэкономическую модель, модели конечного спроса на энергию, модели энергоснабжения крупных потребителей.

Первоначально прогноз потребности в электроэнергии формируется на дальнюю перспективу на уровне страны на основе нескольких различающихся между собой вариантов развития экономики. Эти варианты определяются параметрами официальных сценариев долгосрочного социально-экономического развития страны, разрабатываемых Министерством экономического развития РФ. Сценарии различаются, прежде всего, темпами роста ВВП, конечного потребления и инвестиций в основной капитал, структурой и объемами экспорта и импорта продукции, демографической политикой и др. На эти показатели настраивается 25-отраслевая динамическая оптимизационная модель развития экономики, и с ее помощью определяется соответствующая каждому сценарию динамика развития отраслей промышленности, транспорта и связи, строительства, сельского хозяйства и сферы услуг.

В моделях конечного электропотребления производственной сферы (включающей промышленность, строительный комплекс, сельское хозяйство и транспорт) рассчитывается потребность в электроэнергии на основе

динамики объемов производства валовой продукции и вводов новых мощностей, получаемых из макроэкономической модели, а также матриц удельных расходов электроэнергии. При оценке динамики электроемкости отдельных отраслей учитываются российские и мировые тенденции, ожидаемые изменения внутриотраслевой и технологической структуры, соотношение существующих и новых производственных мощностей и др.

В моделях конечного электропотребления в непроизводственной сфере (домашние хозяйства и сфера услуг) учитывается динамика изменения площади жилых и общественных зданий, обеспеченности домохозяйств и сферы услуг разными видами оборудования и электроприборов, удельных расходов электроэнергии по направлениям использования, соотношения городского и сельского населения и т.п. (см. подробнее [11]). Эти показатели формируются по результатам анализа существующих и перспективных тенденций в социальных, экономических и технологических аспектах, влияющих на изменение уровня жизни населения и развитие сферы услуг.

Уточнение динамики объемов электропотребления осуществляется при переходе на территориальный уровень. Разагрегирование объемов электроэнергии по регионам осуществляется пропорционально: в производственной сфере — изменению доли региона в ВВП, а в непроизводственной сфере — изменению его в численности населения страны. Далее эти значения корректируются в соответствии с особенностями перспективного регионального развития: принятыми к реализации крупными инвестиционными проектами, ускоренным развитием отдельных территорий, изменениями в миграционной политике и т.д. На следующем этапе результаты территориального прогноза обобщаются, анализируются и соотносятся с предварительным прогнозом на уровне страны, который при необходимости корректируется. Для учета неопределенности будущих условий исходные данные и результаты прогнозов представляются в виде интервалов их перспективных значений.

Для оценки влияния конъюнктуры региональных энергетических рынков на объемы перспективного спроса на электроэнергию разработаны оригинальные оптимизационные стохастические модели энергоснабжения крупных потребителей (электростанции, котельные, промышленность, транспорт, население) в отдельных регионах страны. В этих моделях оптимизация энергоснабжения региона совмещается с учетом неоднозначности прогнозных условий развития рассматриваемой территории (см. подробнее в [30]). Спрос на электроэнергию определяется в зависимости от изменения цен на разные виды топлива и энергии при непосредственной ее конкуренции у потребителей в сравнении с другими видами топливно-энергетических ресурсов.

Результаты. Исходной информацией для исследования послужили прогнозы долгосрочного социально-экономического развития России на период до 2030—2036 гг., разработанные Минэкономразвития РФ[1,2]. На их основе были сформированы два сценария перспективного развития экономики страны до 2040 г. со среднегодовыми темпами роста ВВП — 3,0 и 4,1 %. Первый сценарий продолжает сложившиеся направления и пропорции развития экономики страны и территорий с отрицательной динамикой численности населения. Второй сценарий предполагает модернизацию экономики и социальной сферы, электрификацию производственных, транспортных и коммунально-бытовых процессов, а также увеличение численности населения.

Согласно авторской оценке, в принятых условиях потребление электроэнергии в России может возрасти на 27−48 % за период 2025−2040 гг. в зависимости от сценария (рис. 1). В структуре электропотребления наибольший прирост спроса на электроэнергию можно ожидать в сфере услуг и домохозяйствах из-за возрастающих требований к качеству жизни, комфорту и безопасности населения. В условиях крупномасштабного развития электротранспорта (рост количества электромобилей и электробусов) будет увеличиваться электропотребление в транспортном секторе, а углубление электрификации технологических процессов будет способствовать повышению доли электроэнергии в структуре энергопотребления промышленного производства.

Следует отметить, что в соответствии с реализацией государственной программы по ускоренному развитию регионов Сибири и Дальнего Востока[3] наиболее важным является изменение доли этих территорий в региональной структуре электропотребления страны, которая может возрасти на 0,4—0,6 и 0,2—0,5 процентных пункта соответственно к концу прогнозируемого периода (табл.).

---

[1] Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс] Доступ: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06

[2] Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. [Электронный ресурс] Доступ: http://economy.gov.ru/minec/about/structure/depmacro/201828113

[3] Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 г. [Электронный ресурс] Доступ: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/econreg/investproject/doc20100309_011

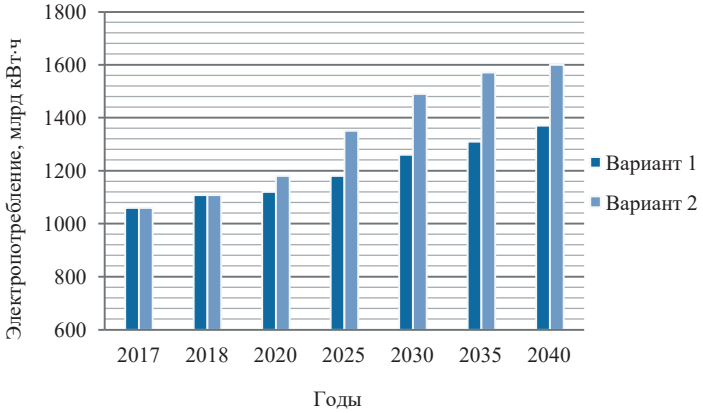


Рис. 1. Прогноз динамики потребления электроэнергии для двух сценариев развития экономики РФ (Источник: оценка авторов)

Таблица

Прогноз региональной структуры спроса на электроэнергию в РФ, %

Федеральный округ	2018 г. отчет*	Прогноз по периодам	
		2030 г.	2040 г.
РФ	100,0	100,0	100,0
Центральный	20,5	20,6	20,7
Северо-Западный.	10,3	10,4	10,4
Южный	6,6	6,4	6,5
Северо-Кавказский	2,3	2,3	2,3
Приволжский	18,4	18,2	18,0
Уральский	17,0	16,7	16,4
Сибирский	19,0	19,4	19,5
Дальневосточный	5,9	6,0	6,2

*По данным Росстата: Электробаланс Российской Федерации 2018 года. http://old.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/# Дата обращения 26.05.2020.

На рисунке 2 представлена полученная долгосрочная динамика изменения душевого электропотребления в России в сравнении с аналогичными показателями одного из прогнозов, разработанного для разных стран US Energy Information Administration [1]. Тенденции изменения этого показателя в России в основном соответствуют мировым, однако абсолютные значения отстают от уровня развитых стран из-за незавершенности процесса электрификации практически во всех сферах экономики, а также высокой доли централизованного теплоснабжения.

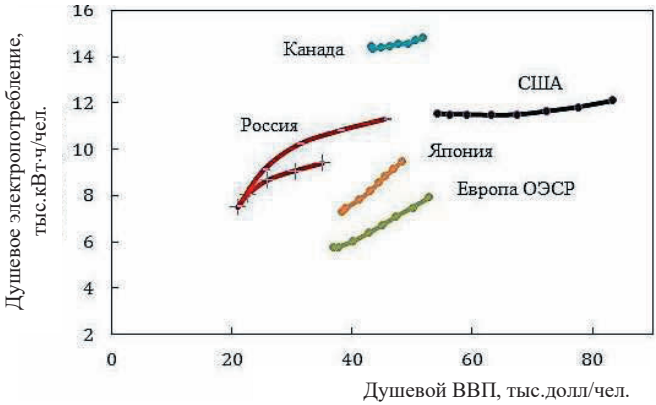


Рис. 2. Динамика взаимосвязи душевого электропотребления и душевого ВВП: рассматриваемый период для России: 2017−2040 гг. (для двух сценариев), для зарубежных стран: 2018—2050 гг. (базовый сценарий) (Источники: [1, 5] и оценка авторов)

Заключение. Исследование и прогноз динамики спроса на электроэнергию остается в ряду важных задач при определении перспектив развития экономики и энергетики страны и ее регионов. Сложности в решении этой задачи обусловлены, во-первых, растущей неопределенностью будущих условий социально-экономического, технологического и регионального развития страны, а во-вторых, особенностями конъюнктуры на региональных энергетических рынках. Отличительной чертой представленного подхода является учет этих важных факторов при формировании долгосрочных прогнозов спроса на электроэнергию.

Исследование выполнено в рамках государственного задания 17.5.2 (рег. № АААА-А17-117030310452-7) фундаментальных исследований СО РАН и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-010-00176 и проекта №20-010-00204.

Литература

1. **International Energy Outlook 2019.** US Energy Information Administration. Washington, 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/
2. **Filippov S.** New Technological Revolution and Energy Requirements // Foresight and STI Governance. 2018. Vol. 12. No 4. P. 20—33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33.
3. **Digitalization & Energy**. International Energy Agency OECD/IEA. 2017. 188 p.
4. **Дата центры** Apple, Google и Facebook угрожают зеленой энергетике Дании. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://hightech.plus/2018/06/27/data-centri-apple.
5. **World Energy Outlook.** International Energy Agency. Paris: OECD/IEA, 2019.

6. **Инновационная** электроэнергетика – 21 / **п**од ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ИЦ «Энергия», 2017. 584 с.
7. **Кононов Ю.Д.** Проблемы учета влияния горизонта прогнозирования ТЭК на рациональный состав и агрегирование используемых моделей // Инф.технологии, 2016. № 2.
8. **Власюк Л.И., Минакир П.А.** Долгосрочный региональный прогноз: синтез технологического и экономического подходов // Проблемы прогнозирования. 2013. № 2. С. 3—14.
9. **Hogan W.W.** Project Independence Evaluation System: Structure and Algoritms // Proceedings of Symposia in Applied Mathematics of the American Mathematical Society. Providence: American mathematical society. 1977. Vol. 21. P. 121—137.
10. **Малахов В.А.** Подходы к прогнозированию спроса на электроэнергию в России // Проблемы прогнозирования. 2009. Т. 113. № 2. С. 57—62.
11. **Методы** и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. Новосибирск: Наука, 2009.
12. **Полина А.А., Замерград В.Э**. Методические подходы к прогнозированию спроса на топливно-энергетические ресурсы регионов РФ // Нефть, газ и бизнес. 2016. № 1. С. 13—18.
13. **Предложения** по развитию методики формирования среднесрочного прогноза спроса на электроэнергию с учетом динамики развития экономики страны и регионов России / А.А. Макаров, С.П. Филиппов, Ф.В. Веселов, В.А. Малахов // Энергорынок. 2013. № 5. С. 33—40.
14. **Филиппов С.П.** Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 4. С. 41—55.
15. **Bhattacharyya S., Timilsina C.R.** A Review of Energy System Models // International Journal of Energy Sector Management. 2010. Vol. 4. No 4. P. 512—513.
16. **Messner S.** User's Guide for the Matrix Generator of Message II. Parts I and II: Model Description and Implementation Guide, and Appendices / International Institute for Applied System Analyses. Working Paper WP–84–71. 1984. 186 p.
17. **The National** Energy Modeling Systems: An Overview. Energy Information Administration. Washington, Dc. 2009. 77 p. [Электронный ресурс]. URL: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/overview/pdf/0581%282009%29.pdf
18. **Mantzos L., Capros P.** The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features // Economics, Energy and Environment. 1999. Vol. 5. P. 155—200.
19. **Voss A., Schlenzig Ch., Reuter A.** MESAP-III: A Tool for Energy Planning and Environmental Management. Overview brochure, University of Stuttgart, 1994.
20. **Институту** энергетических исследований РАН — 25 лет / под ред. А.А. Макарова. М.: ИНЭИ РАН, 2010. 60 с.
21. **Kim B.C., Labys W.C.** Application of translog model of energy substitution to developing countries // Energy Economics. 1988. Vol. 10. No 4. P. 313—323.
22. **Yi F.** Dynamic energy-demand models: a comparison // Energy Economics. 2000. Vol. 22. No 2. P. 285—297.
23. **Mahmud S.** The energy demand in the manufacturing sector in Pakistan: some further results // Energy Economics. 2000. Vol. 22. No 6. P. 641—648.

24. **Longva S., Olsen O., Strom S.** Total elasticity of energy demand analyses within a general equilibrium model // Energy Economics. 1988. Vol. 10. No 4. P. 298—308.
25. **Башмаков И.А.** Оценка параметров ценовой эластичности спроса на электроэнергию по отдельным группам потребителей и по субъектам РФ. М.: ЦЭНЭФ, 2007. Т. 1. 82 с.
26. **Мишура А.В.** Оценка эластичности спроса на электроэнергию основных групп производственных потребителей в России // Регион: экономика и социология. 2009. № 2. С. 110–124.
27. **Мишура А.В.** Оценка эластичности спроса на электроэнергию со стороны населения России // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2011. Т. 11. Вып. 2. С. 92—101.
28. **Узяков М.Н.** Влияние цен на энергетические ресурсы и на динамику экономики России // Регионы и федерация. Вопросы регулирования ТЭК. 2004. № 1. С. 14–21.
29. **Гальперова Е.В.** Методический подход к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на топливо и энергию с учетом региональных особенностей и роста неопределенности // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 33—44.
30. **Кононов Ю. Д., Тыртышный В. Н.** Оценка влияния характера неопределенности будущих условий на конкурентоспособность вариантов топливоснабжения // Энергетическая политика. 2011. № 4. С. 90—94.

В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, КГТУ, г. Калининград

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНОЦЕНОЗА НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАНГОВОГО ГИПЕРПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Еще раз обратимся к ранговому анализу как основному методу исследования техноценозов. По определению это метод исследования техноценозов, имеющий целью их статистический анализ, а также оптимизацию, и полагающий в качестве критерия форму ранговых параметрических распределений. Включает стандартные процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенширования. Более тонкий анализ рангового параметрического распределения позволяет существенно повысить эффективность рангового анализа. Он осуществляется в рамках следующих «тонких» процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (на этапе нормирования) и ZP-анализа (на этапе потенширования) [1—11].

Известно, что основным инструментом рангового анализа является ранговое параметрическое распределение. Вообще под ранговым распределением понимают полученное в результате процедуры ранжирования видов или особей техноценоза по какому-либо параметру распределения Ципфа в

ранговой дифференциальной форме, по сути, являющееся невозрастающей последовательностью значений самих параметров, поставленных в соответствие рангу. Различают ранговые распределения, в которых ранжируются виды по количеству особей, которым они представлены в техноценозе (ранговые видовые), или объекты по значению параметра (ранговые параметрические) [1, 11]. Применительно к параметру электропотребления нас будут интересовать ранговые параметрические распределения. И здесь необходимо вспомнить ряд понятий.

По определению под электропотреблением понимается управляемый (фиксируемый в базе данных, оцениваемый, прогнозируемый, нормируемый и потеншируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями, осуществляемый автономно либо в составе техноценоза. Управление электропотреблением осуществляется с целью обеспечения приемников или потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества с максимальной экономией электроэнергии и минимизацией затрат на всестороннее обеспечение данного процесса. Таким образом, электропотребление как процесс должно описываться комплексным показателем, характеризующим как количественную, так и качественную стороны. Очевидно, что собственно электропотребление как показатель этому требованию не отвечает, так как отражает только количественную сторону процесса.

Ранее нами в рамках процедуры дифлекс-анализа был предложен параметр, описывающий качество процесса электропотребления [1, 11]. Дифлекс-анализ – тонкая процедура рангового анализа техноценоза, осуществляемая на этапе интервального оценивания с целью разработки оптимального плана углубленных обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5—7 лет). При этом предполагается, что основным параметром процедуры дифлекс-анализа является дифлекс-параметр, под которым понимается отклонение (абсолютное или относительное) эмпирического значения электропотребления объекта техноценоза от нижней границы области допустимых значений (рис. 1). Учитывая сугубо эмпирический характер данного параметра, предлагается его отныне называть ранговым дифлекс-параметром.

Дифлекс-показатель — это мера, отражающая свойство объектов техноценоза осуществлять процесс электропотребления с большей или меньшей степенью энергоэффективности. В данном случае под энергоэффективностью понимается показатель, отражающий уровень минимизации количества электроэнергии для полного обеспечения питаемого технологического процесса.

Дифлекс-показатель k-го объекта техноценоза количественно может характеризоваться абсолютным ранговым дифлекс-параметром (рис. 1).

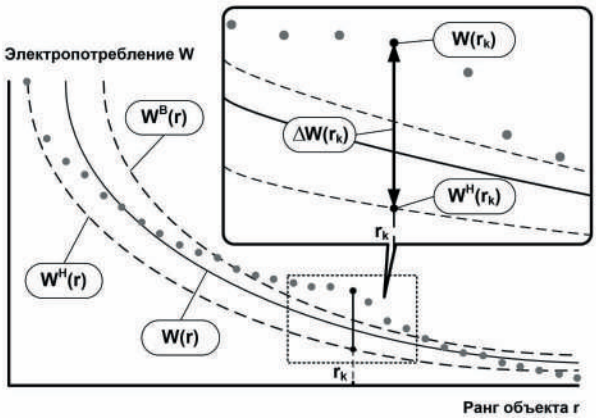


Рис. 1. К понятию рангового дифлекс-параметра

Дифлекс-параметр определяется по следующей формуле:

$$\Delta W(r_k) = \left| W(r_k) - W^H(r_k) \right|, \tag{1}$$

где $W(r_k)$ — эмпирическое значение электропотребления k-го объекта в рассматриваемый момент времени; $W(r)$ — ранговое параметрическое распределение; r_k — ранг k-го объекта на распределении; $W^H(r_k)$ — электропотребление, соответствующее k-му рангу на нижней границе области допустимых значений.

В ряде случаев (при рассмотрении техноценоза в динамике либо при необходимости распределения объектов по функциональным группам) можно вести речь также и об относительном ранговом дифлекс-параметре:

$$\Delta W^O(r_k) = \frac{\left| W(r_k) - W^H(r_k) \right|}{W(r_k)}. \tag{2}$$

С целью теоретического обобщения рассмотрим процедуру дифлекс-анализа в области ранговой топологии. Аппроксимация рангового параметрического распределения по электропотреблению позволяет перейти от частной эмпирической выборки к вероятностному распределению генеральной совокупности. Это позволяет ввести понятие ранговой топологической меры и определить топологический дифлекс-параметр (рис. 2) [1, 11].

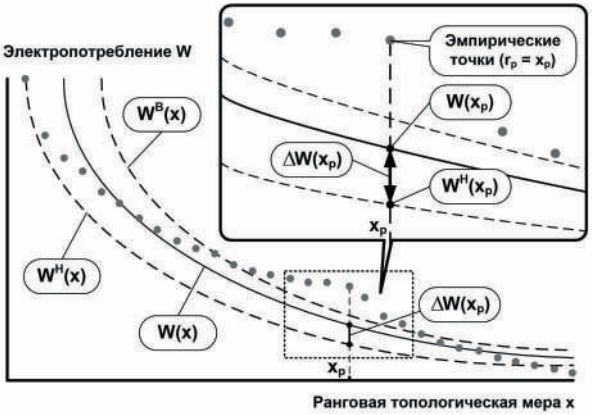


Рис. 2. Топологический дифлекс-параметр по электропотреблению

Подобное континуальное представление позволило в [11] установить однозначное функциональное соответствие между областью значений дифлекс-параметра и множеством значений ранговой топологической меры (рис. 2):

$$\Delta W(x_p) = W(x_p) - W^H(x_p), \tag{3}$$

где $W(x_p)$ — значение электропотребления, соответствующее расчетному значению на аппроксимационной кривой; $W^H(x_p)$ — значение электропотребления на нижней границе области допустимых значений.

Остается задача полноценной характеристики процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения, которая в [11] впервые решается введением принципиально новых понятий. Первое из них – ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза, под которой понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция двух переменных, ставящая в однозначное соответствие множеству значений топологического дифлекс-параметра множество значений электропотребления и ранговой топологической меры. Второе – ранговое гиперпараметрическое распределение техноценоза, под которым понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция трех переменных, ставящая в соответствие множеству значений дифлекс-параметра множество значений электропотребления, ранговой топологической меры, а также дифлекс-угла. Обе функции могут быть получены в результате аппроксимации

$$\begin{cases} \Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X]{} \{W_p, X_p\}_{p=0}^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x); \\ \Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X,\text{A}]{} \{W_p, X_p, \text{A}_p\}_{p=0}^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x,\alpha), \end{cases} \quad (4)$$

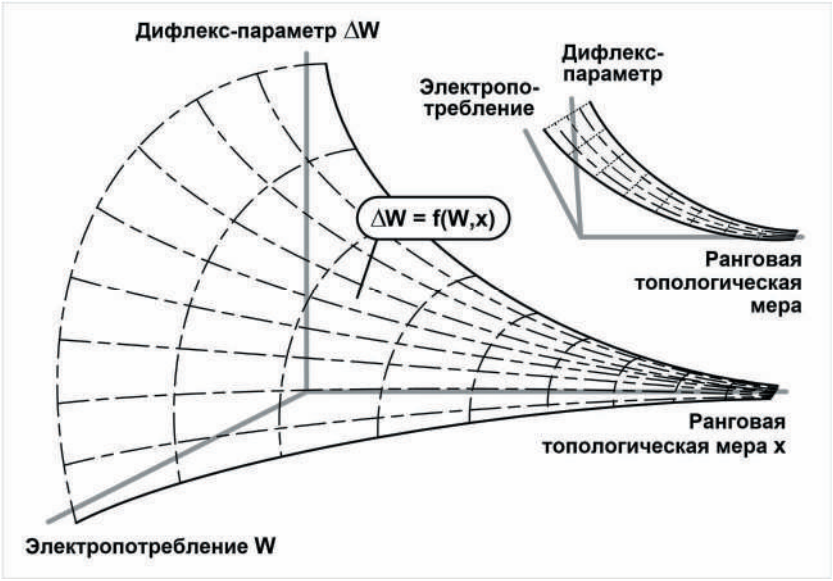
где $\{\Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty}$ — множество значений дифлекс-параметра; α — дифлекс-угол техноценоза; $\{W_p, X_p\}_{p=0}^{+\infty}$ — множество значений электропотребления и ранговой топологической меры; $\{W_p, X_p, \text{A}_p\}_{p=0}^{+\infty}$ — множество значений электропотребления, ранговой топологической меры и дифлекс-угла.

Ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза описывается уравнением аффинной поверхности второго порядка, а ранговое гиперпараметрическое распределение – соответствующим уравнением рациональной кривой второго порядка (о дифлекс-угле будет сказано ниже):

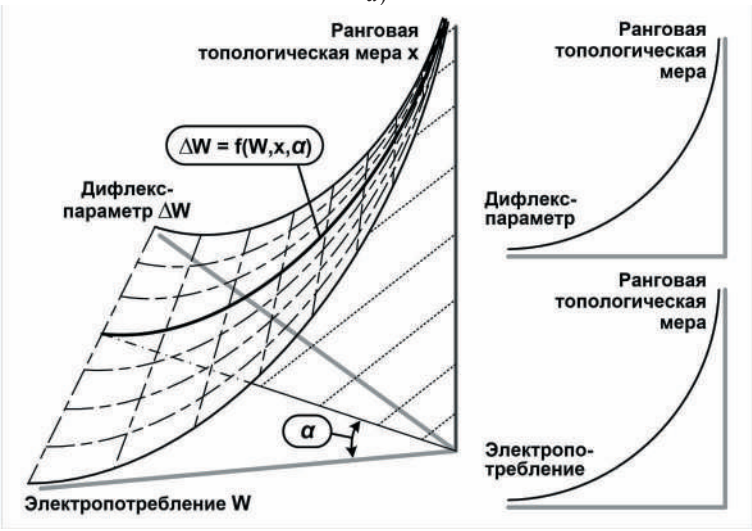
$$\begin{cases} \Delta W = f(W,x); \\ \Delta W = f(W,x,\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

На рисунке 3 показаны гиперболические поверхность и кривая, с одной стороны асимптотически сходящиеся к координатной оси ранговой топологической меры, а с другой – к координатной плоскости $\langle \Delta W \bigcirc W \rangle$.

Ранговая гиперпараметрическая поверхность, изображенная на рис. 3 штриховыми линиями, показывает своего рода спектр теоретически возможных форм рангового гиперпараметрического распределения техноценоза, определяемых как его электропотреблением за обозримый промежуток времени, так и различными внешними воздействиями. Поверхность возможных форм гиперпараметрического распределения ограничена сектором положительных значений осей дифлекс-параметра, электропотребления и ранговой топологической меры. С координатными плоскостями $\langle W \bigcirc x \rangle$ и $\langle \Delta W \bigcirc x \rangle$ она имеет пересечения, которые являются гиперболическими кривыми первого порядка для рангового параметрического распределения: в первом случае по электропотреблению, а во втором по дифлекс-параметру. Кривая рангового гиперпараметрического распределения техноценоза является пересечением ранговой гиперпараметрической поверхности с секущей плоскостью, проходящей через координатную прямую $\langle x \rangle$. Континуум возможных положений секущей плоскости образует пучок в положительном



а)



б)

Рис. 3. Ранговая гиперпараметрическая поверхность (*а*) и ранговое гиперпараметрическое распределение (*б*)

секторе между координатными осями $\langle W \rangle$ и $\langle \Delta W \rangle$. Очевидно, что форма рангового гиперпараметрического распределения техноценоза зависит от угла поворота секущей плоскости по отношению к координатной плоскости $\langle W \bigcirc x \rangle$, который обозначен на рис. 3 как α. Именно его предлагается называть дифлекс-углом рангового гиперпараметрического распределения техноценоза по электропотреблению.

Как представляется, положение секущей плоскости и, соответственно, угол α зависят от состояния техноценоза, а также внешних управляющих воздействий в рассматриваемый момент времени. Примечательно, что крайние («вырожденные») состояния техноценоза соответствуют следующим дифлекс-углам (в градусах): $\alpha = 0$ — состояние с нулевым дифлекс-параметром во всем диапазоне значений электропотребления; $\alpha = 90$ — состояние с нулевым электропотреблением во всем диапазоне значений дифлекс-параметров. Состояние с $\alpha = 0$ соответствует техноценозу, все приемники и потребители которого потребляют электроэнергию на нижней границе области допустимых значений, однако его интегральное электропотребление в этом случае будет максимальным. Это состояние можно считать начальным в общем процессе управления электропотреблением. Состояние с $\alpha = 90$ соответствует техноценозу, интегральное электропотребление которого равно нулю, что, по сути, означает полное прекращение процесса электропотребления. Очевидно, что реальный техноценоз всегда будет соответствовать какому-то промежуточному значению дифлекс-угла α, который в процессе оптимального управления электропотреблением должен последовательно увеличиваться до целевого значения α^*. При этом мы получаем состояние своего рода минимакса: минимальный интегральный дифлекс-параметр при максимальном значении дифлекс-угла, т.е. максимальный показатель качества при минимуме интегрального электропотребления техноценоза. Другими словами, в данном случае техноценоз достигает состояния наивысшей энергоэффективности, что, в известном смысле, можно считать целью процесса управления электропотреблением.

Что же нам дают впервые описанные здесь инструменты? Как представляется, именно ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение позволяют корректно решить поставленную выше задачу количественно-качественного описания процесса электропотребления техноценоза. Прежде всего, рассмотрим поверхностный интеграл следующего вида:

$$\int_S \Delta W(W, x)\, ds, \tag{6}$$

где $\Delta W(W,x)$ — скалярная функция двух переменных, определенная на ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза по электропотреблению; *ds* — бесконечно малый элемент ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза.

В данном случае мы имеем дело с поверхностным интегралом первого рода на скалярном поле, вычисляемым по аффинной поверхности второго порядка $\Delta W(W,x)$ в трехмерном пространстве $\langle \Delta W \bigcirc W \bigcirc x \rangle$. Рассчитав интеграл в бесконечных пределах параметризации, мы получаем так называемый интегральный дифлекс-параметр техноценоза по электропотреблению ΔW_Σ. Очевидно, что данный параметр комплексно характеризует процесс электропотребления прежде всего с качественной точки зрения.

Дополним параметр (6) количественным условием, построим целевые функции и введем комплексный критерий оценки процесса электропотребления техноценоза, который выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta W_\Sigma = \int\limits_S \Delta W(W,x)\,ds \xrightarrow[[0;+\infty)\subset\mathbb{R}^3]{} \min; \\ \alpha = \xrightarrow[\left\{\alpha\to\alpha^*\right\}\equiv\left\{W_\Sigma=\int\limits_0^{+\infty} W(x)\,dx\to W_\Sigma^*\right\}]{} \max; \\ \Delta W \ge 0;\ W \ge 0;\ x \ge 0;\ W_\Sigma \ge W_\Sigma^*; \\ \alpha = \operatorname{arctg}\left(\Delta W_p / W_p\right),\ 0^\circ \le \alpha \le 90^\circ. \end{cases} \tag{7}$$

Интегральный дифлекс-параметр на фиксированной стадии управления (при $\alpha = \text{const}$) может быть определен как криволинейный интеграл

$$\begin{cases} \Delta W_\Sigma = \int\limits_\ell \Delta W(W,x,\alpha)\,d\ell; \\ \alpha = \text{const}, \end{cases} \tag{8}$$

где $\Delta W(W,x,\alpha)$ — скалярная функция, определенная на ранговом гиперпараметрическом распределении; $d\ell$ — бесконечно малый элемент кривой рангового гиперпараметрического распределения.

Как представляется, аналитическая форма рангового гиперпараметрического распределения техноценоза может быть определена теоретически методами дифференциальной геометрии либо эмпирически путем аппроксимации имеющихся данных по электропотреблению [11].

Таким образом, наилучшим можно считать процесс электропотребления техноценоза, минимизирующий интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Если же сравнивать текущее значение интегрального дифлекс-параметра техноценоза с его значением в оптимальном состоянии, то можно получить параметр, который правомерно интерпретировать как количественную меру ущерба, наносимого техноценозу за счет недостаточной энергоэффективности процесса электропотребления, который предлагается называть интегральным дамадж-параметром (от англ. «damage»). С учетом текущего тарифа на электроэнергию можно записать систему (рис. 4)

$$\begin{cases} D_{\Sigma}^{w} = \Delta W_{\Sigma}^{t} - \Delta W_{\Sigma}^{*}; \\ D_{\Sigma}^{f} = \left(\Delta W_{\Sigma}^{t} - \Delta W_{\Sigma}^{*} \right) sc, \end{cases} \tag{9}$$

где D_{Σ}^{w} — интегральный дамадж-параметр техноценоза, (кВт·ч)/Т; D_{Σ}^{f} — интегральный дамадж-параметр техноценоза, пересчитанный в соответствии с текущим тарифом; ΔW_{Σ}^{t} — текущий интегральный дифлекс-параметр, (кВт·ч)/Т; ΔW_{Σ}^{*} — интегральный дифлекс-параметр, соответствующий оптимальному электропотреблению техноценоза; *sc* — текущий тариф на электроэнергию.

В заключение заметим, что критерий (7) позволяет оценивать техноценоз в статическом состоянии на заданный момент времени. Существенные перспективы таит в себе переход к динамической оценке процесса электропотребления, что потребует введения динамических дифлекс-функционалов

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^{w}(W(t), x(t)); \\ \alpha(t) = F^{\alpha}(W(t), x(t)), \end{cases} \tag{10}$$

где *t* — текущее время функционирования техноценоза.

Таким образом, оперирование в ранговом анализе техноценозов гиперпараметрическими поверхностями и гиперпараметрическими распределениями дает ряд существенных преимуществ. В первую очередь это создает возможность комплексной оценки процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения. Так, в соответствии с критерием (7) наилучшим с количественной и качественной точек зрения можно считать процесс электропотребления техноценоза, минимизирующий интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Реализация процедур прогнозирования применительно к дифлекс-функционалам (10) позволяет оценить параметрическую динамику

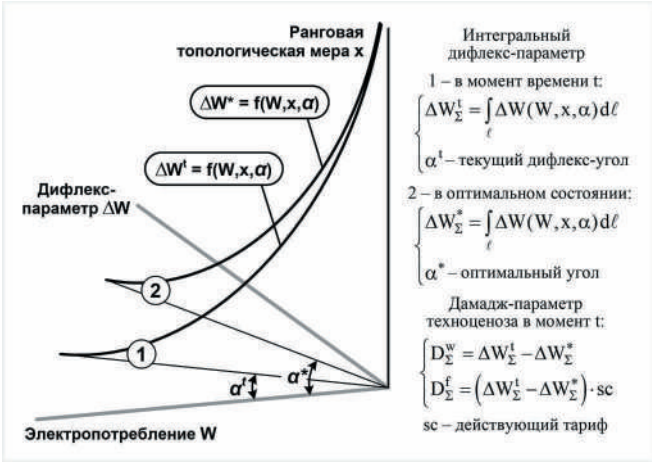


Рис. 4. К понятию дамадж-параметра техноценоза

техноценоза с учетом критерия (7) на заданном горизонте. Количественно меру ущерба, наносимого техноценозу за счет недостаточной энергоэффективности процесса электропотребления, можно оценить с помощью интегрального дамадж-параметра (9).

Литература

1. **Техника,** техносфера, энергосбережение [Электронный ресурс: сайт] / В.И. Гнатюк. Режим доступа: http://www.gnatukvi.ru, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
2. **Гнатюк В.И., Шейнин А.А.** Нормирование электропотребления регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. М.: ИНП РАН, 2012. 102 с.
3. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Статья]. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2014. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf, свободный.
4. **Гнатюк В.И., Луценко Д.В.** Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. М.: Изд-во ИНП РАН, 2013. 107 с.
5. **Гнатюк В.И.** Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат]. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2013. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf, свободный.
6. **Гнатюк В.И.** Философские основания техноценологического подхода [Монография]. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во

Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2014. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/mono_pdf/text.pdf
7. **Реализация** стратегии снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко, С.А. Цырук // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 46. № 4. С. 139—145.
8. **Potential** of energy saving as a tool for increasing the stability / V. Gnatyuk, G. Kretinin, O. Kivchun, D. Lutsenko // International journal of energy economics and policy. Mersin: Cag University. 2018. No 8 (1). P. 137—143.
9. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат] / Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2018. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf, свободный.
10. **Кивчун О.Р.** Метод векторного рангового анализа электропотребления объектов региональной инфраструктуры // Промышленная энергетика. 2018. № 5. С. 36–43.
11. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография] — 3-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/ind.html, свободный.

О.Р. Кивчун, oleg_kivchun@mail.ru,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕДУР РАНГОВОГО АНАЛИЗА

Во всех отраслях жизнедеятельности человека внедряются цифровые технологии, сервисы и платформы. Некоторые процессы или устройства уже не могут развиваться, не применяя цифровые сервисы. В Российской Федерации активно реализуется программа по переходу к «цифровой энергетике». Созданы и реализуются на практике концепции построения и функционирования цифровых энергорайонов, цифровых двойников по электропотреблению [1, 2]. Внедряются новые элементы распределенной генерации и возобновляемой энергетики. Разработана архитектура интернет-энергии [3—5]. Однако дальнейшее развитие цифровой энергетики невозможно без разработки научно обоснованных методов, позволяющих эффективно управлять энергоресурсами, обеспечивать правильный выбор номенклатуры технических изделий, регулировать товарно-договорные отношения между пользователями цифровых энергетических сервисов [1, 2].

К настоящему времени участниками группы НТИ «Энерджинет», Д. Холкиным, И. Чаусовым и И. Бурдиным разработана концепция архитектуры интернет-энергии. Данная концепция раскрывает совершенно новые

процессы управления электроэнергией для энергосистем, а также для отдельных потребителей. Кроме того, концепция содержит ряд новых и важных понятий, которые определены в рамках цифровой энергетики. Достаточно широко раскрыты вопросы создания цифровых энергоячеек и энергорайонов. Предложены технические решения по методам подключения распределенной генерации энергоячеек к электроустановкам региональной энергосистемы. Дано понятие о цифровых управляемых силовых интерфейсах. Раскрыто понятие энергороутера, а также реализован первый его опытный образец. Введено и обосновано понятие энергетических трансакций в энергоячейках. Однако недостаточное внимание уделено вопросам электропотребления потребителей.

Подробный анализ концепции показал, что следует более подробно исследовать процессы энергетических трансакций не только на уровне «энергоячейка–энергосистема», но и между потребителями. Необходимо изучить и разработать основы экономики взаимодействия потребителей в энергоячейке. Потребители электроэнергии также могут в рамках данной концепции управлять электроэнергией оценивая, прогнозируя и нормируя значения параметра.

Таким образом, дополнив концепцию архитектуры интернет-энергии цифровой платформой энергоэффективности на уровне потребителя, можно повысить положительный эффект при управлении электропотреблением энергоячейки.

В [1] профессором В.И. Гнатюком представлена концепция модели цифровой платформы энергоэффективности (ЦПЭ) организационно-технической системы (ОТС). Одним из важнейших элементов модели ЦПЭ является подсистема параметрической адаптации данных по электропотреблению. В ее основу заложен алгоритм непрерывной проверки данных электропотребления по критерию максимума прогностических возможностей. По сути, данная подсистема формирует исходный вариант цифрового двойника по электропотреблению.

В дальнейшем в рамках модели ЦСЭ реализуется алгоритм управления процессом электропотребления ОТС (рис. 1).

В начале алгоритма после импорта исходных данных цифрового двойника по электропотреблению осуществляется анализ стратегии управления электропотребления. Для повышения качества данной операции предлагается дополнить модель математическим аппаратом мониторинга полученных значений или исходных данных. Затем полученные множества представить в виде векторов в векторном ранговом пространстве (VR).

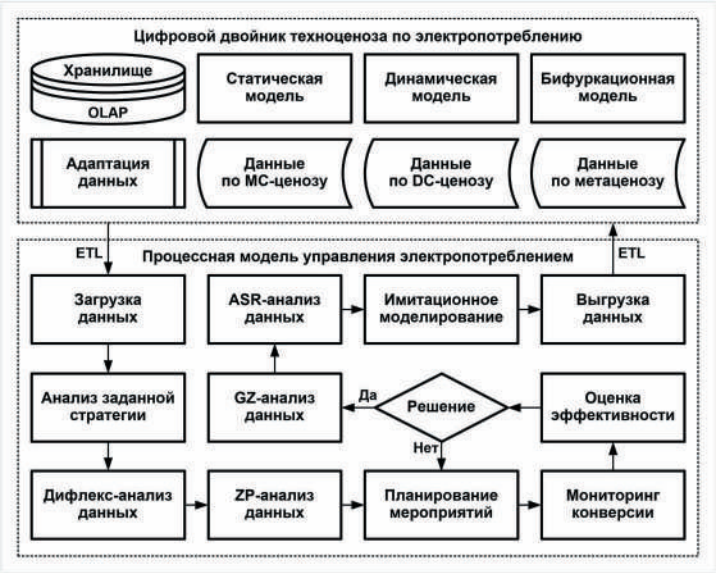


Рис. 1. Алгоритм управления процессом электропотребления энергосистемы

Обозначим множество результатов процедуры интервального оценивания как $\mathbf{W_D} = \left\{ w_i^D \right\}_{i=1}^{n}$, множество прогнозных значений — $\mathbf{W_P} = \left\{ w_j^P \right\}_{j=1}^{m}$ и норм электропотребления — $\mathbf{W_N} = \left\{ w_k^N \right\}_{k=1}^{L}$. Далее формируются входные данные. Их основой являются значения трех векторов: дифлекс-параметров, прогноза и норм электропотребления. Все алгебраические операции по формированию входных данных выполняются в векторном ранговом пространстве VR. Таким образом, конечный результат можно записать следующей системой:

$$\begin{cases} \mathbf{w}_{\langle i \rangle}^{D} = \left\langle w_1^D, w_2^D, \ldots, w_i^D \right\rangle \in \mathbf{W_D}; \\ \mathbf{w}_{\langle j \rangle}^{P} = \left\langle w_1^P, w_2^P, \ldots, w_j^P \right\rangle \in \mathbf{W_P}; \\ \mathbf{w}_{\langle k \rangle}^{N} = \left\langle w_1^N, w_2^N, \ldots, w_k^N \right\rangle \in \mathbf{W_N}, \end{cases} \quad (1)$$

$\mathbf{w}^{D}_{\langle i \rangle}$ — вектор, полученный по результатам интервального оценивания; $\mathbf{w}^{P}_{\langle j \rangle}$ — вектор, полученный в результате прогноза; $\mathbf{w}^{N}_{\langle k \rangle}$ — вектор, отражающий норму электропотребления.

На следующем этапе формируется С-матрица [6]. На рисунке 2 показано, как формируются исходные данные в С-матрицу.

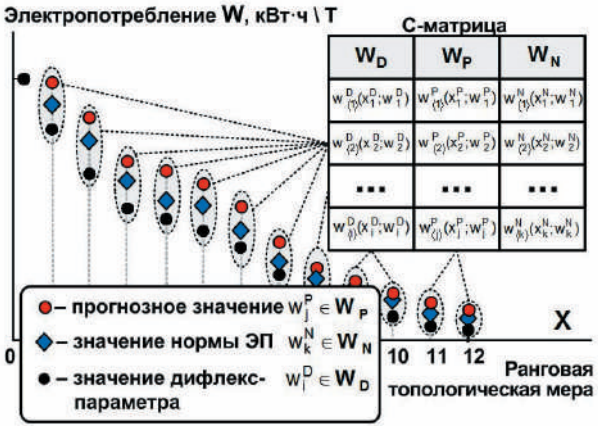


Рис. 2. Формирование С-матрицы

На рисунке 2 величиной X представлена ранговая топологическая мера, которая определяется для каждого ранга.

Таким образом, по полученным значениям векторов интервального оценивания, прогноза и норм электропотребления С-матрицу можно описать следующим выражением:

$$\mathbf{C}_{[n,m]} = \left\| \mathbf{w}^{D}_{\langle i \rangle}, \mathbf{w}^{P}_{\langle j \rangle}, \mathbf{w}^{N}_{\langle k \rangle} \right\|. \qquad (2)$$

Далее осуществляется проверка данных векторов с помощью С-индикатора. «Под С-индикатором понимается функционал IN_F, включающий в себя систему индикаторных функций, определенных на множестве значений, полученных в результате процедур рангового анализа, которые определяют логику принятия решения».

На рисунке 3 показан порядок проверки или мониторинга векторов С-матрицы.

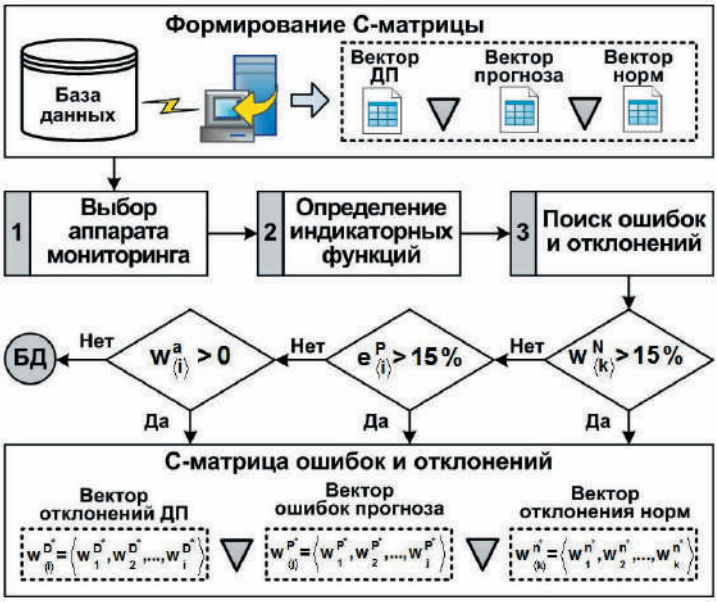


Рис. 3. Алгоритм мониторинга векторов С-матрицы с помощью С-индикатора

Первоначально из базы данных импортируются исходные данные Θ_V, которые и являются векторами С-матрицы [6, 7]. Далее реализуется аппарат определения ошибок и отклонений. Его основой является система индикаторных функций, которую следует называть «С-индикатором» [9]:

$$I_1(w^a_{\langle i\rangle}) = \begin{cases} 1, \text{if } w^a_{\langle i\rangle} > 0; \\ 0, \text{if } w^a_{\langle i\rangle} < 0; \end{cases} \quad I_2(e^P_{\langle j\rangle}) = \begin{cases} 1, \text{if } e^P_{\langle j\rangle} > 15; \\ 0, \text{ if } e^P_{\langle j\rangle} < 15; \end{cases}$$

$$I_3(w^N_{\langle k\rangle}) = \begin{cases} 1, \text{ if } w^N_{\langle k\rangle} > 15; \\ 0, \text{ if } w^N_{\langle k\rangle} < 15, \end{cases} \qquad (3)$$

где $I_1(w^a_{\langle i\rangle})$ — индикаторная функция процедуры интервального оценивания; $I_2(e^P_{\langle j\rangle})$ — индикаторная функция прогнозирования; $I_3(w^N_{\langle k\rangle})$ — индикаторная функция нормирования.

Индикаторная функция интервального оценивания позволяет при $w^{a}_{\langle i\rangle} > 0$ обнаружить аномальные объекты. При $w^{a}_{\langle i\rangle} < 0$ ошибка не появляется. Индикация об ошибке при прогнозировании происходит, когда средняя относительная ошибка по всему вектору электропотребления больше 15 % ($e^{P}_{\langle j\rangle} > 15\ \%$). Мониторинг отклонения норм основан на показателе отклонения от нижнего допустимого значения больше 15 % ($w^{N}_{\langle k\rangle} > 15\ \%$) [6, 7].

В векторном ранговом пространстве показатели мониторинга количественно характеризуются мерой ранговой топологической близости, которая, по сути, представляет собой некоторый вектор. Для ее вычисления необходимо найти разность двух радиус-векторов. Например, для мониторинга при интервальном оценивании следует из значений вектора дифлекс-параметра $r^{k}_{\langle 4\rangle}\left\{x^{k}_{4}; w^{k}_{4}\right\}$ вычислить значение вектора верхней допустимой границы ОДЗ $r^{v}_{\langle 4\rangle}\left\{x^{v}_{4}; w^{v}_{4}\right\}$.

На рисунке 4 показано, как для значения электропотребления объекта, занимающего четвертый ранг, вычисляется величина отклонения.

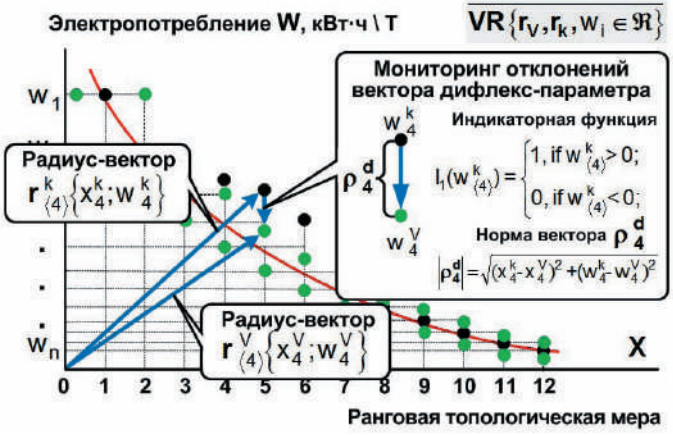


Рис. 4. Расчет нормы ранговой топологической меры дифлекс-параметра

Математически данную операцию можно записать следующим образом:

$$\left|\rho^{d}_{4}\right| = \sqrt{(x^{k}_{4} - x^{v}_{4}) + (w^{k}_{4} - w^{v}_{4})}, \qquad (4)$$

где x_4^k; w_4^k — координаты радиус-векторов; x_4^v; w_4^v — координаты радиус-вектора границы ОДЗ.

На рисунке 4 показано, что с помощью индикаторной функции выявлено аномальное значение электропотребления для четвертого ранга [6, 7].

Индикация об ошибке прогноза осуществляется на основе индикаторной функции, которая рассчитывается по аналогичному выражению:

$$\left|\rho_4^p\right| = \sqrt{(x_4^p - x_4^k) + (w_4^p - w_4^k)}, \quad (5)$$

где x_4^k; w_4^k — координаты радиус-вектора электропотребления для четвертого ранга; x_4^p; w_4^p — координаты радиус-вектора прогнозных значений для четвертого ранга.

На рисунке 5 показано, что с помощью индикаторной функции определена погрешность прогнозирования.

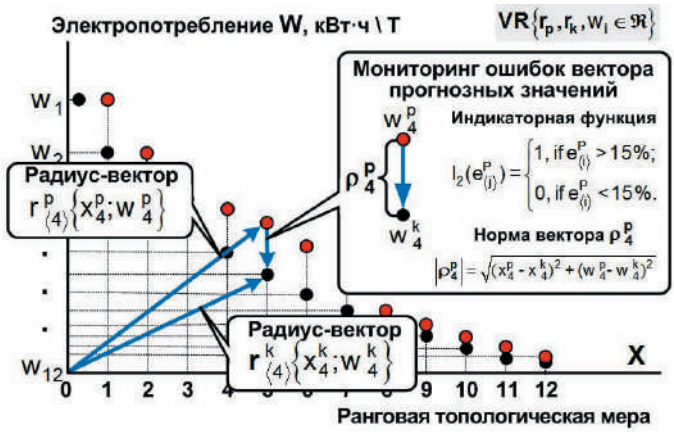


Рис. 5. Мониторинг ошибок прогноза

Мониторинг значений вектора норм электропотребления заключается в определении с помощью выражения (6) отклонения от нормы:

$$\left|\rho_4^n\right| = \sqrt{(x_4^n - x_4^{Ng}) + (w_4^n - w_4^{Ng})}, \quad (6)$$

где x_4^n; w_4^n — координаты радиус-вектора значения нормы электропотребления; x_4^{Ng}; w_4^{Ng} — координаты радиус-вектора нижнего значения границы области допустимых значений.

Если значение ранговой топологической меры, вычисленное по (6), больше на 15 % нижнего допустимого значения ОДЗ, то фиксируется отклонение (рис. 6). Предел 15 % для средней относительной ошибки и отклонения норм выбран на основе проведенных исследований в работах [6, 7].

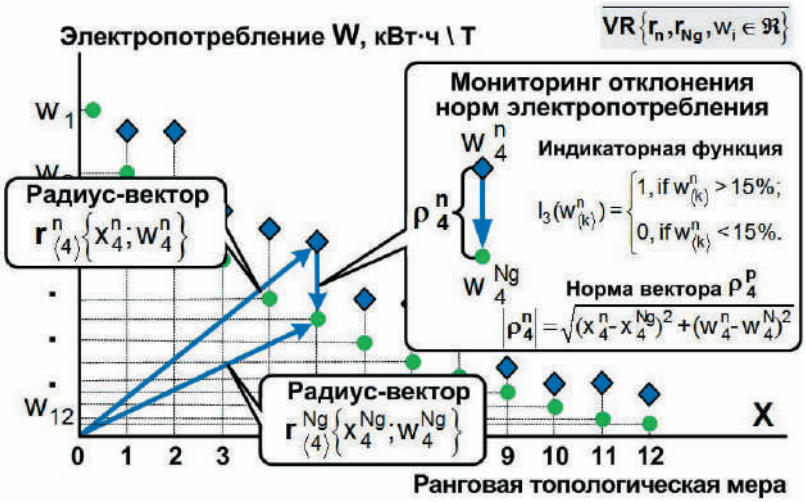


Рис. 6. Мониторинг отклонения норм электропотребления

В результате мониторинга результатов процедур рангового анализа в векторном ранговом пространстве формируется С-матрица, которая содержит векторы с ошибками и отклонениями:

$$C^{*}_{[n,m]} = \left\| w^{D^{*}}_{\langle i \rangle}, w^{P^{*}}_{\langle j \rangle}, w^{N^{*}}_{\langle k \rangle} \right\|_{i,j,k=1}^{n,m}. \qquad (7)$$

Таким образом, процедура мониторинга результатов рангового анализа имеет важное значение для платформы энергоэффективности цифрового двойника по электропотреблению системы техноценологического типа. В основу алгоритма мониторинга положен математический аппарат, основанный на определении индикаторных функций в векторном ранговом пространстве. Количественно индикаторная функция определяется нормой вектора, которая представляет собой разность двух радиус-векторов, проведенных к исследуемому значению вектора и, соответственно, значению на нижней границе. При превышении заданных показателей индикации обнаруживается ошибка или отклонение. Для интервального оценивания ошибка возникает при наличии объектов, аномально потребляющих электроэнергию. Мониторинг вектора прогнозирования позволяет выявить ошибки более

15 %, а вектора норм — отклонения от нижней допустимой границы ОДЗ также с величиной, превышающей 15 %.

Соответственно, анализируя векторы С-матрицы, точнее их ошибки и отклонения, можно в рамках дальнейших этапов управления процессом электропотребления ОТС более качественно реализовать процедуры ZP-планирования [6, 7], а также дифлекс-анализ GZ- и ASR- анализы [1].

Литература

1. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению. [Электронный ресурс]. URL: http://gnatukvi.ru/knig.htm (дата обращения: 08.06.2020).
2. **Холкин Д.В., Чаусов И.С.** Архитектура интернета-энергии. [Электронный ресурс]. URL: https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2019/12/idea-whitepaper-ru.pdf (дата обращения: 17.08.2020).
3. **Gibadullin A.A.** Assessment of the level of stability and reliability of the electric power complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. No 837. (2020). P. 012007. Doi:10.1088/1757-899X/837/1/012007.
4. **Formation** of the conditions for the development of innovation / D.E. Morkovkin, D.S. Lopatkin, T.N. Shushunova et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No 1515. P. 032002. Doi: 10.1088/1742-6596/1515/3/032002.
5. **Engineering** solutions in the field of digital transformation of the electric power industry / A.A. Gibadullin, E.V. Ryabinina, D.E. Morkovkin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No 862. P. 062055.
6. **Реализация** стратегии снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко, С.А. Цырук // Морские интеллектуальные технологии. М.: МОРИНТЕХ. 2019. № 4 (46). Т. 4. С. 139—145.
7. **Дорофеев С.А., Дюндик, П.Ю., Меркулов А.А.** Трехуровневая структура оценки потенциала энергосбережения техноценоза на основе техноценологического подхода // Материалы IV Международного Балтийский морского форума, г. Калининград, 22–28 мая 2016 г. Калининград, 2016. С. 1602—1608.

А.Ю. Старкова, StarkovaAY@mpei.ru,
А.А. Чегодаев, ChegodayevAA@mpei.ru,
Р.Р. Насыров, к.т.н., доц, NasyrovRR@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В 2030—2040 годах планируется смена сложившегося уклада топливно-энергетического комплекса, целью которого является содействие устойчивому социально-экономическому развитию, для которой требуется модернизационный рывок к более эффективной, гибкой и устойчивой энергетике.

Роль распределенной генерации в этом вопросе — обеспечение надежной выработки электроэнергии высокого качества с минимальными затратами и максимальной экономической и технологической эффективностью [1].

На современном этапе развития электроэнергетической отрасли Российской Федерации активно развивается распределенная генерация, совокупная мощность объектов которой по состоянию на 2018 г. составила 24 ГВт — около 10 % установленной мощности всей энергосистемы страны [2]. Основная особенность развития распределенной генерации в России – его оторванность от общего развития топливно-энергетического комплекса. Распределенная энергетика фактически учитывается в практике перспективного планирования развития удаленных и изолированных территорий.

Исследование состояния распределенной энергетики в России позволило выделить несколько ключевых аспектов ее развития, влияющих на темпы и объемы роста.

1. Экономический аспект. Анализ взаимовлияния электропотребления в России и прироста ВВП российской экономики показал, что данные параметры в значительной степени связаны, однако не являются прямым отображением друг друга. Электропотребление зависит от уникального набора факторов, который меняется в разные периоды времени. Например, с 1990 по 1998 гг. ВВП России снизился на 43 %, что свидетельствует о сильном экономическом кризисе [3]. Однако электропотребление в России снижалось заметно медленнее, показав снижение лишь на четверть объема 1990 г. Во время экономического кризиса 2008−2009 гг. падение ВВП было несколько более глубоким, чем снижение электропотребления, в отличие от кризиса 2014 г., когда снижение ВВП и снижение электропотребления совпали (рис. 1).

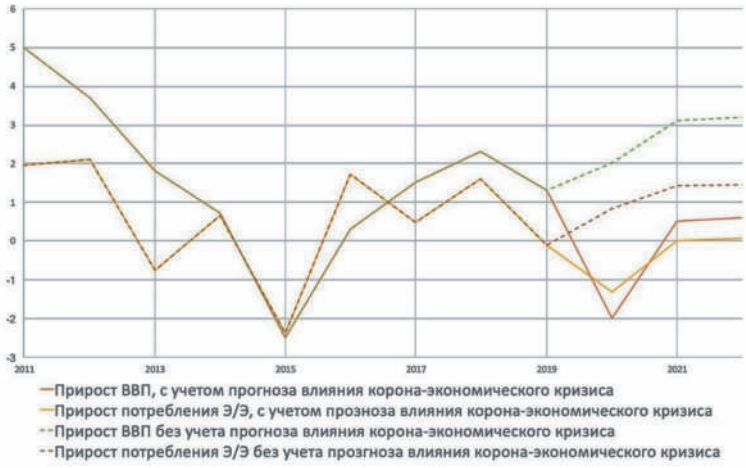


Рис. 1. Изменение ВВП России и спроса на электроэнергию в 2011—2022 гг., %

Корона-экономический кризис 2020 г. с большей вероятностью будет развиваться по модели кризиса 2008 г. Снижение потребления электроэнергии промышленными потребителями и транспортом будет нивелироваться увеличенным на 10—20 % потреблением бытовых потребителей и систем связи.

В ближайшие десятилетия в России для продолжения функционирования большого числа тепловых станций потребуется их модернизация или ввод новых мощностей. Это обусловлено тем, что средний возраст турбинного оборудования составляет около 32 лет [4]. Но после завершения договоров о предоставлении мощности (ДПМ) в ближайшие 2—3 года и при отсутствии ввода новых мощностей средний возраст действующих ТЭС перешагнет через 40 лет.

Несмотря на рост установленной мощности атомных электростанций, гидроэлектростанций и возобновляемых источников энергии (рис. 2) в период до 2035 г. устаревание мощностей тепловых электростанций приведет к тому, что совокупный объем установленный мощности уже не будет соответствовать требуемому уровню резерва мощности в ЕЭС примерно на 70 ГВт. Частично эту потребность в мощности можно возместить, используя мощность распределенной генерации. Это в первую очередь будет требовать изменения архитектуры построения сети, поскольку изменятся направления потоков мощности по линиям, которые будут соединять объекты распределенной генерации с ЕЭС.

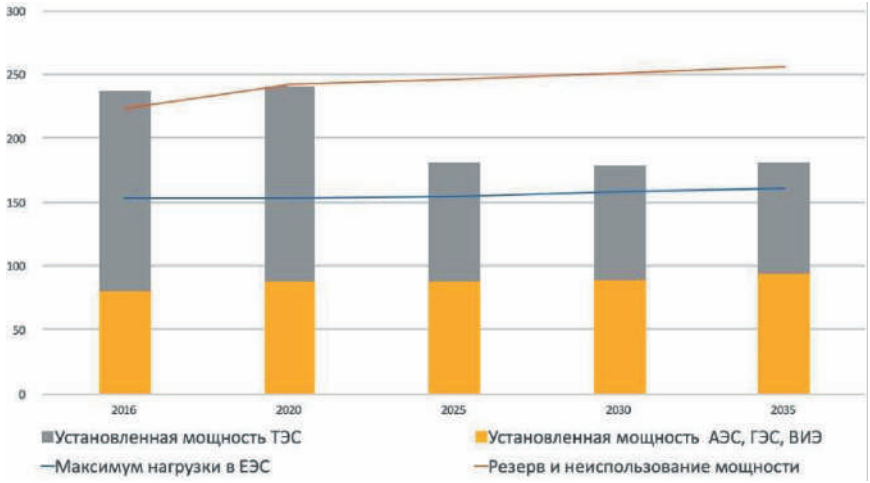


Рис. 2. Характеристика прогнозной балансовой ситуации в ЕЭС России с учетом интервального прогноза снижения мощности действующих ТЭС

2. Технологический аспект. Развитие распределенной генерации сопряжено с мировыми трендами электроэнергетики, в частности, можно выделить следующие: управление спросом, микрогенерация, энергоэффективность, накопители электроэнергии, активные энергетические комплексы. При этом в России на данный момент нет единой стратегии технологического развития объектов распределенной энергетики.

3. Политический аспект. В настоящее время в российском законодательстве отсутствует понятие «распределенная энергетика», отрасль не регулируется. Исключения составляют постановление Правительства Российской Федерации № 320 от 21 марта 2020 г. «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов» [5], которое регламентирует до 2030 г. отработать в пилотном режиме технические и экономические условия участия АЭК в обороте электрической энергии на розничных рынках электроэнергии, и Федеральный закон от 27.12.2019 г. № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации» [6].

Говоря о перспективах развития распределенной энергетики, стоит отдельно рассмотреть изолированные энергосистемы и энергосистемы, которые имеют связь с единой энергосистемой (ЕЭС).

Для изолированных энергосистем актуальными являются следующие перспективы:

1. Декарбонизация — снижение выбросов углекислого газа в атмосферу может происходить при использовании ВИЭ или гибридных дизель-солнечных электростанций. На рисунках 3 и 4 представлены карты потенциала солнечной энергии и районирования по скорости ветра, из которых становится ясно, что использование ВИЭ в качестве источника энергии целесообразно не во всех регионах России. В этом случае перспективным является использование технологии CCS (Carbon Capture and Storage) — улавливание и хранение углекислого газа, или разработка ее отечественных аналогов. Тестирование данных систем возможно в условиях эксплуатации в районах с распределенной генерацией.

2. Совершенствование генерирующих установок — исследование перспектив использования гибридных электроустановок, сетевых накопителей электроэнергии для получения более высокого КПД электроустановок, более равномерного графика загрузки генерирующего оборудования.

3. Повышение надежности электроснабжения — реализация данного положения возможна в случае построения интеллектуальных сетей, в том числе с использованием мультиагентных систем, позволяющих децентрализованно управлять сетью.

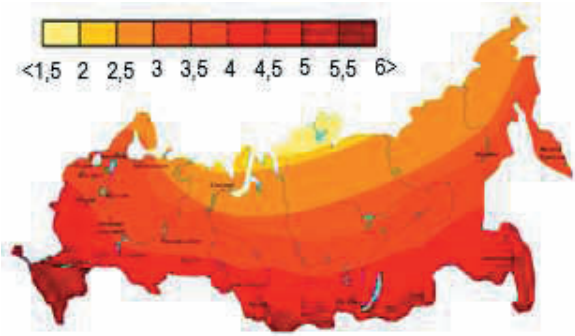


Рис. 3. Карта потенциала солнечной энергии, (кВт·ч)/м^2/день

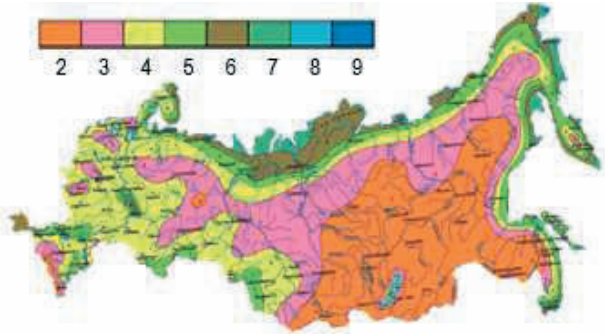


Рис. 4. Карта районирования по средней скорости ветра

Для энергосистем, имеющих связь с ЕЭС, в дополнение к указанным выше перспективам стоит отметить следующие:

1. Создание АЭК и выход на розничный рынок электроэнергии (в соответствии с [5]).

2. Частичная замена мощностей тепловых станций, подлежащих выводу из эксплуатации, мощностью АЭК, которая может поставляться в ЕЭС. При такой работе энергосистем не потребуется повторный запуск значительной части тепловой мощности за счет использования уже имеющейся генерации.

3. Снижение пиковой нагрузки энергосистемы за счет использования АЭК — часть мощности в пиковые часы может выдаваться из АЭК в ЕЭС, снижая загрузку традиционных электростанций. Анализ почасовых графиков генерации ЕЭС России за период апрель 2019 г. — апрель 2020 г. показал, что мощность в диапазоне 97—100 % максимальной за этот период используется всего в течение 1,2 % времени (рис. 5). Для покрытия потребности в мощности за этот промежуток времени в максимуме необходимо будет использовать 4,5 ГВт мощности распределенной генерации.

Рис. 5. Почасовая нагрузка ЕЭС России за апрель 2019 — апрель 2020 гг. с указанием нагрузок, составляющих 97—100 % максимального значения

В целом распределенная энергетика обладает огромным научно-исследовательским потенциалом, и одним из направлений его развития может также стать научно-техническое сотрудничество АЭК или крупных изолированных систем и научно-исследовательских институтов, когда системы распределенной энергетики смогут выступать в качестве объектов для опытной эксплуатации технических изобретений.

Для того, чтобы реализовать перспективы, обозначенные в предыдущем разделе, необходимо предпринять некоторые шаги для синхронизации развития распределенной энергетики и ЕЭС России.

В первую очередь необходимы изменения в законодательной базе технико-экономического сектора. Необходимо конкретно определить термин «распределенная энергетика», разработать единую целевую концепцию развития распределенной энергетики, рассмотреть вопросы снятия избыточных запретов и ограничений, мешающих развитию распределенной энергетики, проработать меры по технической регламентации и экономическому стимулированию выдачи в сеть и продажи излишков электрической энергии, производимой потребителями на принадлежащих им объектах распределенной генерации [4].

Также необходимы меры по поддержке российских производителей генерирующих установок. На российском рынке существуют как крупные, так и небольшие компании, которые в совокупности по своему потенциалу и при должной государственной поддержке в рамках инновационного развития смогут полностью покрыть необходимость России в энергоустановках для распределенной генерации .

Для реализации инновационного развития распределенной энергетики необходимо оказать государственную поддержку научно-техническим проектам, реализуемым на базе распределенной энергетики.

Анализ потенциала развития распределенной энергетики в России позволяет выделить следующие ожидаемые результаты:

1. Снижение затрат на электроснабжение и возможное получение прибыли от продажи электроэнергии в сеть для собственников генерирующего оборудования.

2. Возможность выхода активных потребителей электроэнергии на розничный рынок электроэнергии.

3. Выравнивание графиков нагрузок с помощью технологии управления спросом.

4. Снижение затрат на развитие сетевого комплекса и крупной генерации за счет использования уже существующей мощности распределенной генерации.

Вместе с тем были выделены следующие риски развития распределенной генерации.

Экономические:

1. Стоимость электроэнергии от установок распределенной генерации может быть более высокой в сравнении с ценами на электроэнергию, поставляемую из сети.

2. Неопределенность в отношении будущих цен на топливо и электроэнергию и возможности заключения договоров.

3. Отсутствие регулируемых тарифов и стимулов для распределенной генерации.

Технологические:

1. Сложности технического регулирования и лицензирования при строительстве объектов распределенной генерации.

2. Трудности при присоединении к электрическим сетям и оказании услуг по оперативно-диспетчерскому управлению.

3. Параллельная работа ЕЭС и источников распределенной генерации мало изучена.

4. Проектирование релейной защиты усложняется, так как сети с множеством генерирующих источников имеют более сложную конфигурацию и все связи становятся двухсторонними.

Социальные:

1. Информация о возможностях использования альтернативных источников энергии ограниченно доступна для бытовых потребителей, что может вызвать дополнительное недоверие потребителей.

2. Неквалифицированность потребителей, занимающихся эксплуатацией генерирующего оборудования.

Несмотря на внушительный список существующих рисков, распределенная энергетика развивается и будет развиваться с ростом технологий и при 3D-трансформации энергетики — децентрализации, декарбонизации, цифровизации. В настоящий момент задача всего технико-экономического комплекса России состоит в том, чтобы выработать стратегию наиболее успешного внедрения распределенной энергетики и реализации ее перспектив.

Литература

1. **Энергостратегия** Российской Федерации на период до 2035 года (проект).
2. **Неволина М**. Российская распределенная энергетика развивается // Энергетика и промышленность России. 2018. № 23–24. С. 55.
3. **Григорьев Л., Голяшев А.** Динамика потребления электроэнергии как индикатор экономической активности. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016.
4. **Распределенная** энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов и др. Сколково: Энергетический центр Московской школы управления, 2017.
5. **Постановление** Правительства Российской Федерации № 320 от 21 марта 2020 г. «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов».
6. **Федеральный закон № 471-ФЗ** «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике в части развития микрогенерации».

Б.Р. Кангожин, КазНУ им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан,
С.С. Даутов, Н. Избасарулы, izbassaruly@bk.ru,
ТОО «КИТР», г. Алматы, Казахстан

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЮЖНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА

Жамбылская область занимает 144,3 тыс. км^2 с численностью населения на 1 февраля 2013 г. 1072 тыс. человек, в том числе: городского населения — 422,7 тыс. (41,8 %), сельского — 588 тыс. человек (58,2 %). Число районов — 10, городов — 4 (Тараз, Жанатас, Каратау и Шу), аульных (сельских) округов — 140, аулов (сел) — 379. Из 379 населенных пунктов Жамбылской области 38 поселков имеют высокий потенциал развития, 300 — средний, 41 поселок — с низким потенциалом развития.

Энергоузел Жамбылской области входит в объединенную энергетическую систему Южного Казахстана и соединен линиями электропередачи, принадлежащими Национальной электроэнергетической системе (НЭС), с другими энергоузлами Южного региона, а также с Северной зоной

Казахстана. В настоящее время электроснабжение потребителей Жамбылской области осуществляется по электрическим сетям на напряжении 0,4–500 кВ [2].

Потребление электроэнергии в Жамбылской области осуществляется прямыми крупными потребителями, подключенными к сети АО «KEGOC», и остальными потребителями, подключенными к сети ТОО «Жамбылские электрические сети». Карта существующих сетей 35 кВ и выше представлена на рис. 1.

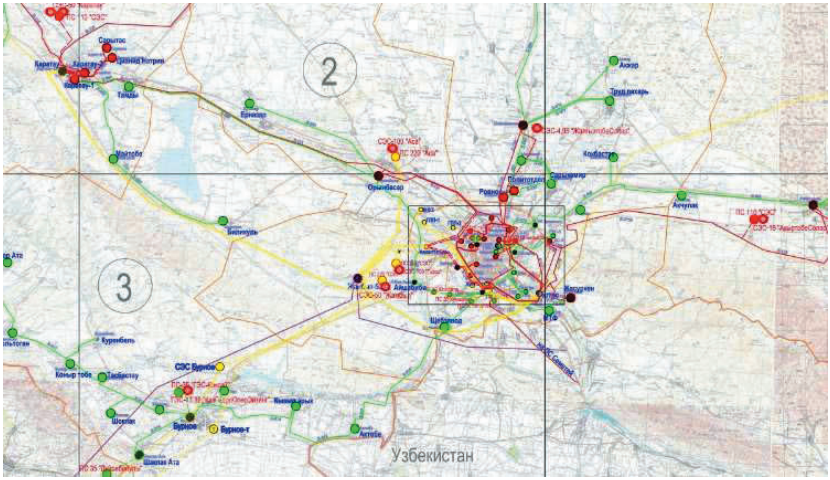


Рис. 1. Карта сетей Жамбылской области с учетом перспективы развития до 2030 года

Итоги 2019 г. показали положительную динамику роста промышленности региона, индекс физического объема составил 103,6 %, произведено промышленной продукции на 374,0 млрд тенге [1].

Из рисунка 2 видно, что основную долю в структуре электропотребления Жамбылской области составляет коммунально-бытовое потребление (43 %). Необходимо отметить, что значительную долю в структуре электропотребления занимают потери при передаче электроэнергии (10,7 %). Реализация инвестиционного проекта направлена прежде всего на снижение технических потерь электроэнергии при транспортировке [1].

В структуре промышленности во всех отраслях достигнут рост по сравнению с 2018 г.: в горнодобывающей промышленности и разработке карьеров на 12,8 % (43,6 млрд тенге), обрабатывающей промышленности — на 2,1 % (257,6 млрд тенге), электроснабжении, подаче газа, пара и воздушного кондиционирования — на 1,7 % (69,5 млрд тенге), водоснабжении, канализационной системе, контроле над сбором и распределением отходов — на 0,9 % (3,3 млрд тенге).

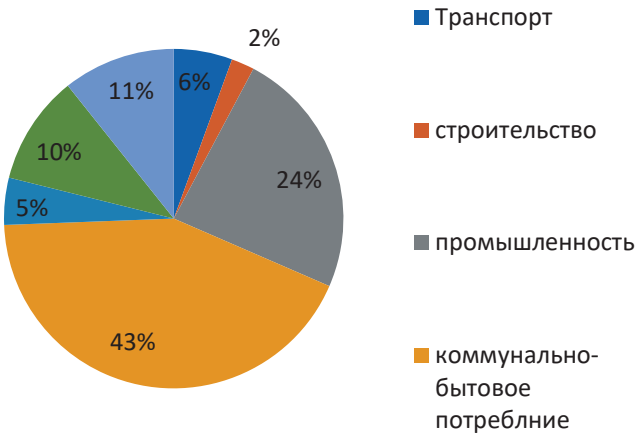


Рис. 2. Структура потребления электроэнергии по отраслям

В горнодобывающей отрасли, доля которой в общем объеме промышленности составляет 11,6 %, возросла добыча природного газа на 5,1 %, сырья фосфатного дробленого — на 52,9 %, сырья фосфатного тонкого помола — на 56,1 %, известняка и гипса — на 11,7 %.

В обрабатывающей промышленности (доля 68,9 %) выросли объемы производства напитков в 2,3 раза, продуктов химической промышленности — в 1,5 раза, машиностроения — в 1,3 раза, прочей неметаллической минеральной продукции — на 12,2 %, легкой промышленности и готовых металлических изделий — на 10,1 %, металлургической — на 9,5 %, мебели — на 8,8 %.

Из важнейших видов продукции увеличено производство азотных удобрений — в 2 раза, фосфорных удобрений — на 89,6 %, желтого фосфора — на 39,3 %, триполифосфата натрия — на 20,5 %, фосфорной кислоты — на 13,1 %, черной металлургии — на 5,8 %, услуги по литью металлов — на 27,1 %, выпуск клинкеров цементных — на 5,9 %, изделий из бетона — на 52,6 %, товарного бетона — на 98,0 %.

Вместе с тем сократились объемы производства продуктов питания на 17,3 %, продуктов нефтепереработки — на 50,4 %, резиновых и пластмассовых изделий — на 21,3 %.

В электроснабжении, подаче газа, пара и воздушном кондиционировании рост на 1,7 % произошел за счет увеличения выработки электроэнергии на 4,4 %, тепловой энергии — на 0,9 % [1].

Баланс электрической мощности и электроэнергии до 2030 г. в целом по области. Для анализа баланса электроэнергии использованы

материалы, представленные филиалом АО «KEGOC» «Южные МЭС», а также данные по балансу (покупке) электроэнергии ТОО «ЖЭС».

Современный рынок электроэнергии и мощности Жамбылского энергоузла формируется из поставок электрической энергии от собственных энергоисточников и при наличии дефицита — за счет получения из Северной зоны и импорта из стран Центральной Азии. Вовлечение в баланс возобновляемых источников энергии (малые ГЭС, ВЭС, СЭС) предусматривается на основе использования имеющегося значительного потенциала малой гидроэнергетики, ветровой и солнечной энергии с целью обеспечения оптимальной структуры генерирующих мощностей для снижения общего расхода ТЭР и минимального экологического воздействия на окружающую среду [2].

Суммарная установленная мощность электростанций составляет 1458,7 МВт, в том числе: АО «Жамбылская ГРЭС» — 1230 МВт; Жамбылская ТЭЦ-4 (АО «Таразэнергоцентр») — 60 МВт; ВИЭ — 168,7 МВт (рис. 3). Выработка электрической энергии в 2016 году составила 1402,2 млн кВт·ч по сравнению с 2015 г. (1337,0 млн кВт·ч) и увеличилась на 4,64 %.

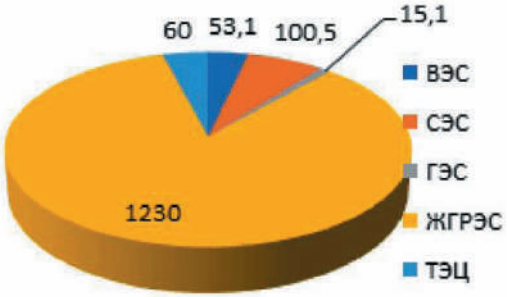


Рис. 3. Выработка электрической мощности (МВт) на электростанциях

В настоящее время работа энергоузла Жамбылской области осложняется рядом серьезных проблем. Налицо высокая степень изношенности основных фондов распределительной электросетевой компании (РЭКа), что обусловливает высокий уровень потерь электроэнергии при ее транспортировке. Уровень материально-технической базы энергетической отрасли не отвечает современным требованиям. Существует недостаток собственных генерирующих мощностей.

Развитие электростанций в Жамбылской области намечается осуществить по следующим основным направлениям:

- техперевооружение и модернизация оборудования действующих электростанций;
- ввод новых мощностей на действующих электростанциях;
- строительство новых электростанций;

- вовлечение в баланс возобновляемых источников энергии (малых ГЭС, ВЭС, СЭС).

В связи с неопределенностью по срокам и необходимостью уточнения тепловых нагрузок в ходе реализации мероприятий по программе энергосбережения и энергоэффективности вводы новых мощностей будут рассмотрены вариантно.

Расчеты электрических режимов. В целях проверки загрузки элементов сети и определения возможности покрытия электрических нагрузок потребителей Жамбылского энергоузла с учетом развития электрических сетей на период до 2030 г. были выполнены расчеты электрических режимов.

Расчеты потоков мощности и уровней напряжения выполнены для существующей схемы электрических сетей 500—35 кВ Жамбылской области с целью проверки загрузки элементов сети, выбора и уточнения параметров элементов сети разработки рекомендаций по режиму работы сети, а также, в случае необходимости, определения мероприятий, позволяющих обеспечить допустимые уровни напряжения и загрузки электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах [3].

Расчеты выполнены по схеме электрических сетей Жамбылской области с использованием программного комплекса EnergyCS (рис. 4). Для оценки допустимых перетоков нормальных и ремонтных схем в нормальных и послеаварийных режимах и анализа влияния параметров элементов электрической сети на величину пропускной способности сделаны расчеты статической устойчивости. Требование устойчивости является одним из основных требований, предъявляемых к технической (в том числе электроэнергетической) системе и определяет, как правило, работоспособность этой системы.

Расчеты статической устойчивости выполнены на уровни 2022 и 2030 гг. с учетом ввода новых генерирующих мощностей (ВИЭ) с использованием траектории утяжеления [4]:

- утяжеление Актюбинского энергоузла тремя точками на ПС Актюбинск, Кимперсай, Чилисай с покрытием дефицитов станциями ЭГРЭС-1, ЭГРЭС-2.

Величина максимального допустимого перетока определена из условий:

- соответствия коэффициента запаса устойчивости по активной мощности не менее 20 % с учетом нерегулярных колебаний:

$$P_{\text{мдп}} = \frac{P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{нк}}}{1,2}; \qquad (1)$$

- соответствия коэффициента запаса по напряжению во всех узлах нагрузки не менее 15 %; $U_{\text{кр110кВ}}$ принято 0,75·110 = 82,5 кВ, $U_{\text{кр220кВ}}$ принято 0,75·220 = 165 кВ;

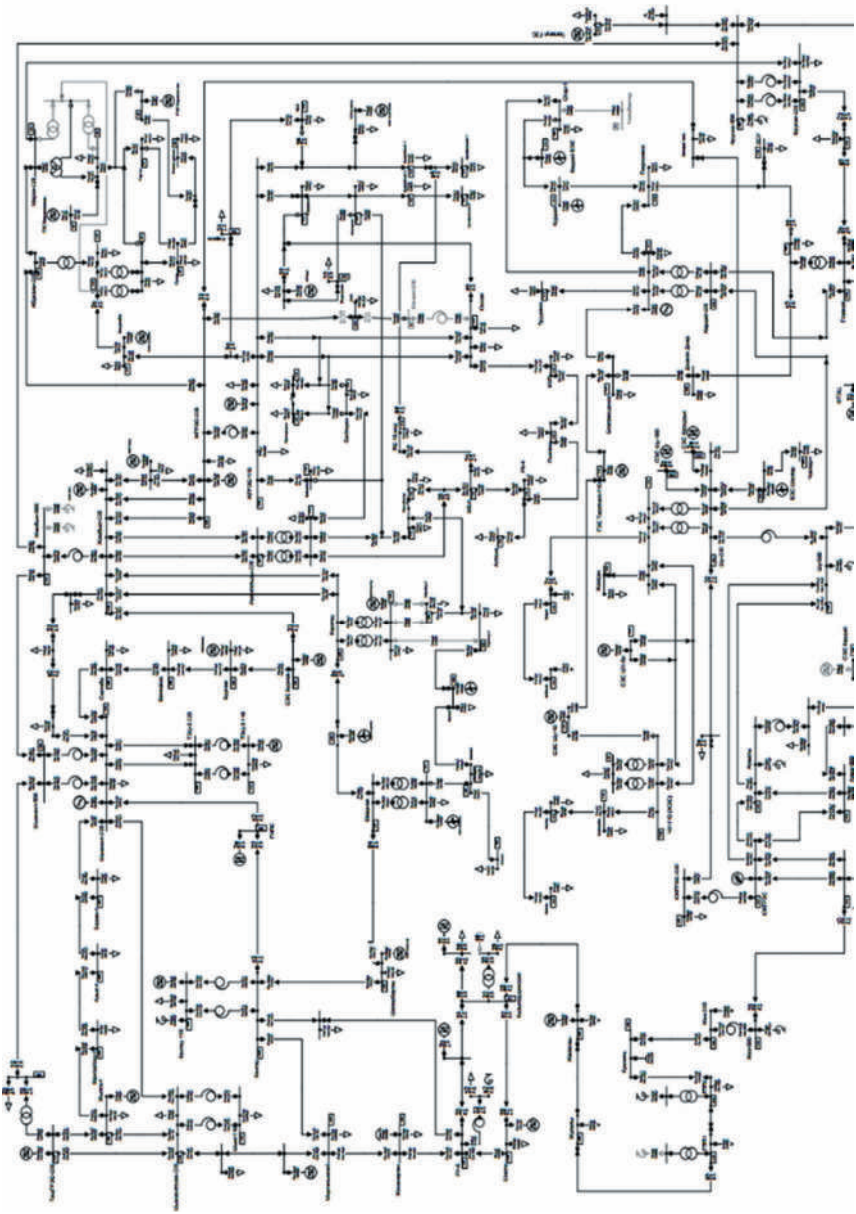


Рис. 4. Расчетные режимы потокораспределения мощности сетей 110—500 кВ с использованием программного комплекса EnergyCS

- соответствия коэффициента запаса устойчивости по активной мощности не менее 8 % для послеаварийных режимов:

$$P_{\text{адп}} = \frac{P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{нк}}}{1,08}; \qquad (2)$$

- соответствия коэффициента запаса по напряжению не менее 10 % во всех узлах нагрузки для послеаварийных режимов.

По итогам расчетов было выявлено, что с учетом развития собственных генерирующих источников энергии наблюдается существенное увеличение генерации в области. В Жамбылской области определены приоритеты в строительстве новых возобновляемых источников: ветряных, солнечных и гидроэлектростанций. На сегодняшний день до 50 % потребности области в электроэнергии смогут покрыть гидро-, ветро- и солнечные электростанции мощностью свыше 250 МВт, строительство которых намечено в регионе на предстоящие три года.

По выданным техническим условиям на 2019 г. на строительство ВИЭ в Жамбылской области намечается увеличение генерации в объеме более 1200 МВт [2].

Прогнозный баланс электроэнергии в Жамбылской области в связи с вводом большого объема ВИЭ переводит регион из дефицитного в избыточный, чего нельзя утверждать о прогнозе баланса мощности в связи с непредсказуемостью выдачи мощности ВИЭ.

Выводы

1. Существующая энергосистема Жамбылской области является энергодефицитной (более 115 МВт).

2. Ежегодный прирост потребления составляет 2−3 % в год. С учетом утвержденного баланса мощности и строительства новых ВИЭ можно прогнозировать максимальное потребление мощности на 2030 г. на уровне избыточных 1200 МВт.

3. Разработанные схемы развития электрических сетей 35—500 кВ до 2030 года статически устойчивы.

Литература

1. **Программа** развития Жамбылской области на 2016—2020 гг.
2. **Схема** развития электрических сетей Жамбылской области на 2018-2022 гг. с перспективой до 2030 года // Отчет № 36 ТОО «Казахский институт технического развития», 2019.
3. **Хрущев Ю.В.** Методы расчета устойчивости энергосистем. Томск: Издательство «STT», 2005. 140 с.
4. **Файбисович Д.Л.** Справочник по проектированию электрических сетей. М.: НЦ ЭНАС, 2005. 57 с.

А.П. Хлебцов, gergines@mail.ru,
Л.Х. Зайнутдинова, lzain@mail.ru, АГУ, г. Астрахань,
А.Н. Шилин, eltech@vstu.ru, ВолгГТУ, г. Волгоград

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АВАРИЙНОСТИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время на подстанциях используется физически и морально устаревшее оборудование, что может привести к сбоям и потере электроэнергии для потребителей.

Очевидно, что существующее положение создает тенденцию к возникновению явных и скрытых отказов оборудования в системе энергоснабжения потребителей. Аварийные очаги возникают в первую очередь из-за длительной наработки и значительного физического износа оборудования электрических сетей, в том числе из-за эксплуатации большого количества силовых трансформаторов и выключателей с физически изношенными вводами [1, 14, 15].

Основными причинами технологических нарушений на подстанциях являются [2, 3, 4, 16]:

- несоблюдение сроков или невыполнение объемов технического обслуживания;
- природное воздействие;
- устаревшее электрооборудование;
- сторонние воздействия;

Одним из самых важных основных элементов электрооборудования ТП является силовой трансформатор. Его ремонт в случае повреждения связан с большими затратами труда и денежных средств. Основными причинами повреждения силовых трансформаторов являются повреждение шпилек, переключателей, сгоревшие обмотки [5, 6, 19].

На статистику отказов трансформаторов сильно влияет срок работы трансформатора с момента ввода его в эксплуатацию. Согласно проведенному анализу отказов крупных силовых трансформаторов в системе электроснабжения, установлено, что основной возрастной пик приходится на срок службы от 17 до 26 лет [7, 18].

Анализ полученной зависимости прогнозируемых отказов по месяцам года показал следующее. Наибольшее количество отказов наблюдается в летний период (приблизительно 40 %), что связано с повышенной температурой окружающей среды и летним пиком загруженности [8, 9].

В настоящее время во многих регионах страны возобновился устойчивый рост электрических нагрузок из-за роста потребления электроэнергии в коммунально-бытовом секторе. За последние пять лет потребление

электроэнергии в этом секторе удвоилось, а электрические нагрузки увеличились в 2—4 раза. В такой ситуации рынок электроэнергии может предъявить очень серьезные санкции к распределительным сетевым компаниям по надежности и качеству электроснабжения потребителей. Если не готовиться к этому заранее, в самое ближайшее время сетевые компании будут нести серьезные материальные убытки.

Если же рассматривать ситуацию по повреждаемости силовых трансформаторов и ТП в технически развитых западных странах, то такие данные публикуются достаточно редко, бессистемно и, как правило, без комментариев. Тем не менее, анализ опубликованных данных показывает, что удельная повреждаемость силовых трансформаторов в развитых странах в основном оценивается не более 1,5—2 % в год. По данным ОАО «РОСЭП» в России длительность отключений потребителей составляет 70—100 ч в год, что на два порядка выше, чем в технически развитых западных странах [10, 4, 17].

Согласно данным Министерства энергетики РФ, приведенным в табл. 1, физический износ объектов электрических сетей ПАО «Россети ЮГ» составляет 23 % [11]. Уровень физического износа согласно [11] оценивается по табл. 2.

Таблица 1

Физический износ объектов электрических сетей

Субъект ЭЭ	Объект ЭЭ	Износ, %	
		субъекта	объекта
ПАО «Россети ЮГ»	Филиал «Ростовэнерго»	23	21
	Филиал «Волгоградэнерго»		25
	Филиал «Калмэнерго»		21
	Филиал «Астраханьэнерго»		24

Таблица 2

Уровень физического износа

Диапазон значений физического износа, %	Уровень физического износа	Вид технического воздействия
≥ 75	Критический	Эксплуатация недопустима. Требуется срочное воздействие на оборудование и (или) объект электроэнергетики
$50 \leq И \leq 75$	Неудовлетворительный	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$30 \leq И \leq 50$	Удовлетворительный	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$15 \leq И \leq 30$	Хороший	По результатам планового диагностирования
≤ 15	Очень хороший	Плановое диагностирование

В настоящей работе предлагается изучить вопросы аварийности и физического состояния силового электрооборудования трансформаторных подстанций на примере объекта ПАО «Россети ЮГ» филиала «Астраханьэнерго».

Если ссылаться на программу перспективного развития электроэнергетики Астраханской области [12], то фактический износ электросетевого комплекса по подстанционному оборудованию составляет 76,03 %. Согласно данным табл. 2, уровень физического износа электросетевого оборудования в Астраханской области достигает критической отметки.

Была поставлена задача провести анализ аварийности трансформаторных подстанций в зависимости от ряда факторов: класса напряжения, срока службы, организационных и технических причин повреждения оборудования, вида элементов оборудования. Анализ проведен на основе данных за 2019 г., приведенных в годовом отчете филиала ПАО «Россети Юг» [13].

Количество понизительных трансформаторных подстанций в Астраханской области составляет: ПС 110 кВ — 91 шт., ПС 35 кВ — 43 шт., ТП и РП 6—10 кВ — 4138 шт. Износ трансформаторных подстанций представлен на рис. 1.

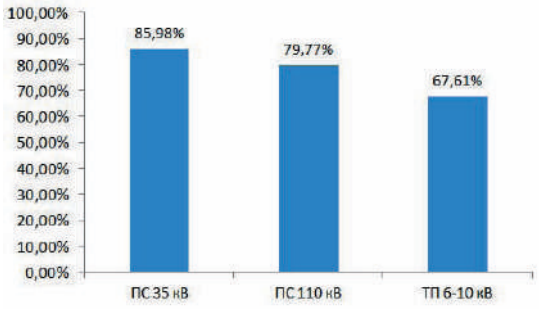


Рис. 1. Износ трансформаторных подстанций (2019 г.)

Установлено, что наиболее изношены трансформаторные подстанции классом напряжения 35 кВ. По способу присоединения к сети они в большей степени являются тупиковыми либо ответвительными. Подстанции 35 кВ, как правило, установлены в отдаленных объектах. Такими являются поселки, небольшие микрорайоны, где в основном находятся объекты третьей категории надежности. Отсюда можно сделать вывод, что техническое обслуживание таких подстанций не стоит в списке главных задач электросетевой компании. Куда важнее обслуживать более значимые подстанции с потребителями первой и второй категории надежности. Наименее изношены ТП 6—10 кВ. Это связано с тем, что оборудование, установленное на таких подстанциях, дешевле и проще в обслуживании.

В качестве основных организационных причин, приводящих к авариям, мы выделяем износ оборудования, воздействие посторонних и природных факторов, несвоевременное выявление дефектов и несоблюдение технического обслуживания. Распределение аварий по основным организационным причинам представлено на рис. 2.

Наибольшее количество аварий в 2019 г. происходили по причинам износа оборудования в результате длительной эксплуатации, а также за счет сторонних воздействий.

Кроме того, нами проведен анализ аварийности в зависимости от технических причин. Основные причины повреждения оборудования связаны с нарушениями электрической изоляции и электрического контакта, внешним механическим воздействием, попаданием инородных предметов, механическим разрушением, нарушением структуры материала, коррозийным износом, электродуговым повреждением и исчерпанием ресурса. Распределение аварий по признакам основных технических причин повреждаемого оборудования приведено на рис. 3.

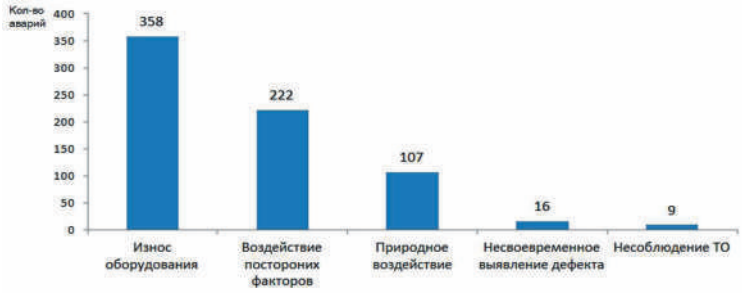


Рис. 2. Распределение аварий по основным организационным причинам (2019 г.)

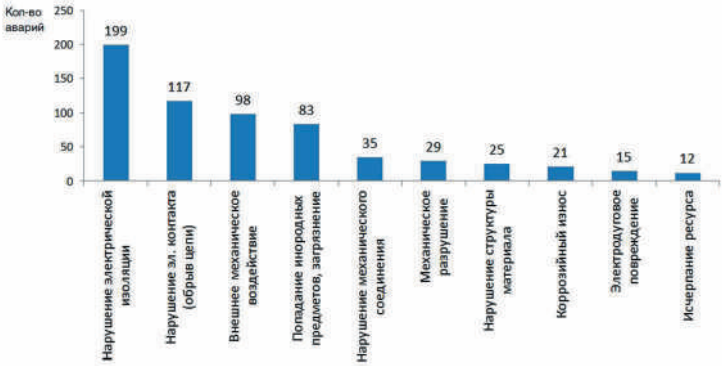


Рис. 3. Распределение аварий по основным техническим причинам (2019 г.)

Из информации, представленной на рис. 3, видно, что наибольшее количество аварий происходило по причинам нарушения электрической изоляции и электрического контакта, а также внешних механических воздействий.

Статистика повреждения элементов электрооборудования подстанций на 2019 год приведена на рис. 4.

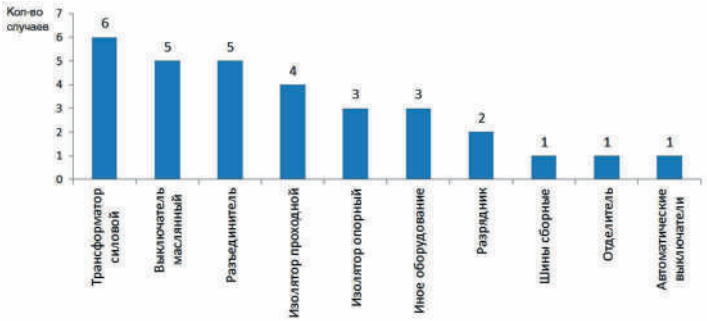


Рис. 4. Статистика повреждения элементов электрооборудования подстанций (2019 г.)

Наиболее повреждаемым является маслонаполненное оборудование – силовой трансформатор и высоковольтные выключатели. Чаще всего это происходит вследствие несвоевременной замены масла и превышения нормативного срока эксплуатации. Силовой трансформатор и высоковольтные выключатели являются главным и самым дорогим оборудованием на подстанции, их техническое обслуживание и диагностика — главная задача обслуживающего персонала. Прочее оборудование – разъединители, изоляторы, сборные шины и др. – недорогое и не требует больших затрат на обслуживание и ремонт.

Проведенный анализ показал, что наибольшее количество повреждений оборудования приходится на класс напряжения 6−10 кВ (рис. 5). Это связанно с тем, что трансформаторных подстанций и распределительных пунктов классом напряжения 6—10 кВ в Астраханской области подавляющее большинство.

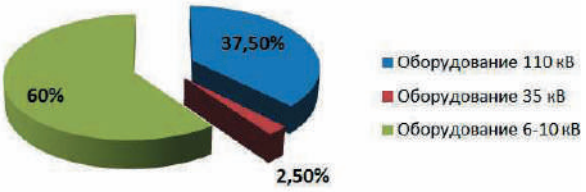


Рис. 5. Статистика повреждений в зависимости от класса напряжения подстанций

Мы установили, что наибольшее количество аварий произошло на оборудовании со сроком эксплуатации свыше 20 лет, что составляет 81,2 % (на 2,7 % больше, чем в аналогичном периоде прошлого года) (рис. 6). Аварийные очаги и узкие места возникают в первую очередь из-за значительного физического износа оборудования электрических сетей вследствие сверхнормативного срока эксплуатации.

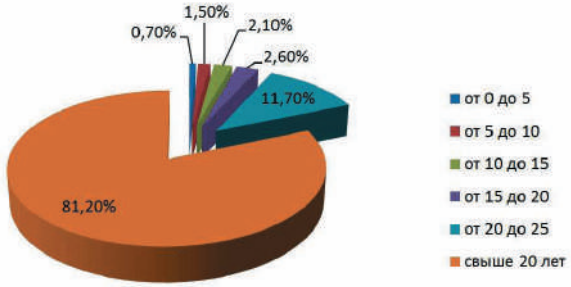


Рис. 6. Распределение аварий по сроку службы повреждаемого оборудования

Что касается оборудования со сроками эксплуатации свыше 20 лет, то здесь большое количество силовых трансформаторов 6—10 кВ, отработавших один нормативный срок и более (около 70 % их общего количества); значительное количество устройств релейной защиты на электромеханической базе, малоэффективные (морально устаревшие) средства защиты от перенапряжений (необходима модернизация оборудования электрической сети в части замены разрядников на ОПН).

Выводы.

1. Основные причины технологических нарушений в работе подстанций связаны с физически и моральным износом электрооборудования. К тому же причинами аварий становятся несвоевременное соблюдение норм технического обслуживания оборудования и некачественное их выполнение.

2. Наиболее повреждаемым является маслонаполненное оборудование, которое все еще остается основным и главным оборудованием на подстанциях. К тому же оно является одним из самых дорогих как в приобретении, так и в обслуживании.

3. Более 60 % случаев повреждения приходится на класс напряжения 6—10 кВ. На это стоит обратить особое внимание, ведь в системе насчитывается 4138 трансформаторных подстанций и РП 6—10/0,4 кВ общей мощностью 1147,2 МВ·А. Это оборудование особо уязвимо для технологических нарушений, так как системы защиты на таких подстанциях часто являются технически упрощенными и морально устаревшими.

Для решения всех вышеперечисленных проблем необходима реконструкция и техническое перевооружение объектов. Но так как замена силового оборудования на трансформаторных подстанциях повлечет за собой серьезные экономические затраты, будет актуально устанавливать различного рода диагностические и экспертные системы слежения за состоянием режима работы электрооборудования. Такие системы позволят своевременно обнаруживать предаварийные ситуации, что в итоге приведет к продлению сроков эксплуатации оборудования. Также потребуется меньше затрат на техническое обслуживание.

Литература

1. **Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х.** Анализ состояния износа электрооборудования подстанций и методы диагностирования аварийных режимов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 2(27). С. 17—20.
2. **Анализ** аварийности в электросетевом комплексе / С.Г. Захаренко, Т.Ф. Малахова, С.А. Захаров и др. // Вестник КузГТУ. 2016. № 4(116). С. 94—99.
3. **Федотова А.А.** Анализ статистических показателей аварийности //Экономика, Бизнес, Инновации. 2019. С. 66—69.
4. **Астахов С.М., Беликов Р.П.** Состояние и пути повышения эффективности функционирования **распределительных** сетей в агропромышленном комплексе // Вестник ОрелГАУ. 2011. № 2. С. 106—108
5. **Виноградов А.В., Перьков Р.А.** Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей // Вестник НГИЭИ. 2015. № 12 (55). С. 12—20.
6. **Хабрат А.Р., Никишин А.Ю.** Анализ аварийности в распределительных сетях среднего напряжения филиала АО «Янтарьэнерго» Западные электрические сети // Вестник молодежной науки. 2019. № 2. С. 15—22.
7. **Вильданов Р.Г., Кутырев Д.Н., Вахитова А.Р.** Анализ отказов крупных силовых трансформаторов в системе электроснабжения и методы их диагностики //Успехи современной науки. 2017. Т. 5. № 4. С. 62—65.
8. **Ланин А.В., Наумов И.В.** Прогнозирование повреждаемости изоляторов в сельских линиях электропередачи для повышения эффективности комплектования запаса // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. 2018. С. 221—231.
9. **Комаров М.В., Зуенков А.Г.** Аварийность распределительных электрических сетей г. Пензы // НиКа. 2011. № 3. С. 187—189.
10. **Львов М.Ю.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше //Электричество. 2010. № 2. С. 27—31.
11. **Показатель** технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ). [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/17860 (дата обращения 21.07.2020).

12. **О схеме** и программе перспективного развития электроэнергетики Астраханской области на 2021 — 2025 годы. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/570790464 (дата обращения 20.07.2020).
13. **Годовой** отчет за 2019 год ПАО «Россети ЮГ». [Электронный ресурс]. URL: https://rosseti-yug.ru/aktsioneru-investoru/godovoy-otchet-za-2019-god/ (дата обращения 17.07.2020).
14. **Анализ** аварийности в электрических сетях 6—110 кВ Кузбасской энергосистемы / С.А. Захаров и др. // Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения. 2017. С. 404—404.
15. **Коннов А.А.** Анализ аварийности в электрических сетях 0,4 кВ Нижегородской области // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. С. 127—130.
16. **Классификация** перенапряжений и аварийность силовых трансформаторов предприятий электрических сетей / В.Г. Гольдштейн и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2006. № 41. С. 148—158.
17. **Васильев А.П., Турлов А.Г.** Средства обеспечения надежности электроснабжения потребителей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 3-4. С. 19—35.
18. **Саидов С.Р, Бобоев Б.А.** Анализ состояния электрического оборудования в городских электрических сетях города Душанбе // Modern science. 2020. № 2. С. 341—346.
19. **Бурлюк В.В., Жерко С.Н.** Расчет ресурса трансформаторов и автотрансформаторов в АСУ ТП подстанций // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. № 5. С. 42—48.

М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,
Э.М. Баширова, bashirova-elmira@yandex.ru,
И.Г. Хуснутдинова, ilvina011@mail.ru,
УГНТУ, г. Салават; ИСИ АН РБ, г. Стерлитамак

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

На всех электрических станциях в качестве источников переменного тока используются синхронные генераторы. Различают турбогенераторы (первичный двигатель — паровая или газовая турбина) и гидрогенераторы (первичный двигатель — гидротурбина). Генераторы относятся к основному оборудованию электростанций. Они состоят из большого количества электрических и механических элементов, являются сложным объектом с точки зрения оценки технического состояния, прогнозирования ресурса и поддержания в исправном техническом состоянии. Устойчивость и бесперебойность электроснабжения потребителей во многом определяется надежностью энергетических агрегатов и оптимизацией затрат на их

техническое обслуживание и ремонт. В связи с этим уделяется большое внимание созданию систем мониторинга и диагностики генераторов электрических станций. Такие системы позволяют контролировать техническое состояние узлов и элементов генераторов, на раннем этапе выявлять зарождение и контролировать развитие дефектов, оптимизировать режимы эксплуатации агрегатов [1].

Большинство повреждений генератора вызывается нарушением изоляции обмоток статора и ротора, которые происходят вследствие старения изоляции, ее увлажнения, наличия в ней дефектов, а также в результате перенапряжений, механических повреждений, например, из-за вибрации стержней обмоток и стали магнитопровода. В обмотке статора возникают междуфазные КЗ, замыкание одной фазы на корпус, замыкание между витками обмотки одной фазы. Из-за значительных механических усилий, обусловленных большой частотой вращения роторов турбогенераторов, наблюдаются случаи повреждения изоляции и замыкания обмотки ротора на корпус.

Из-за нарушения симметрии магнитного потока в воздушном зазоре между ротором и статором, обусловленного замыканием части витков обмотки ротора, возникает сильная вибрация, опасная для генератора. Повышенная вибрация генераторов может быть вызвана дефектами сборки, исполнения, конструкции или повреждением какого-либо элемента генератора, а также неправильной эксплуатацией. Причины появления повышенной вибрации могут быть обусловлены механическими неисправностями или электромагнитными процессами. Вибрация может возникнуть вследствие таких причин, как неправильная центровка вала турбогенератора, разбалансировка роторов турбины и генератора, дефекты соединительных муфт, неравномерность вращающихся по окружности элементов роторов по массе, а также совпадение собственных частот колебания отдельных узлов (торцевых щитов, элементов корпуса и т.д.) с частотой возмущающих сил 50 и 100 Гц. Ненормальными режимами генератора являются: опасное увеличение тока в статоре или роторе сверх номинального значения; несимметричная нагрузка фаз статора; опасное повышение напряжения на статоре; асинхронный и двигательный режимы генератора. Для своевременного обнаружения неисправностей на ранних стадиях их развития разрабатываются новые методы контроля и диагностики [2].

Техническая диагностика энергоагрегатов включает два основных направления — оперативное и ремонтное диагностирование. Оперативное диагностирование используется на работающем оборудовании, ремонтное — на выведенном из работы в ремонт оборудовании. В отечественной энергетике ремонтное диагностирование является основным средством выявления дефектов генерирующего оборудования, что связано с существующей планово-предупредительной системой технического обслуживания и

ремонта оборудования. В последние годы за рубежом и в России все больше предприятий переходят на систему обслуживания и ремонта оборудования по фактическому техническому состоянию и, соответственно, растет интерес к оперативному диагностированию, являющемуся основным условием для такого перехода.

Оперативная диагностика основана на методах раннего обнаружения дефектов. Методы первой группы используют инструментальные средства, входящие в систему штатного контроля (например, методы обнаружения витковых замыканий в обмотке ротора турбогенераторов, перегревов в обмотке статора турбо- и гидрогенераторов, основных дефектов масляных уплотнений вала). При разработке таких методов необходимо выбрать достаточно информативные измеряемые величины и наиболее эффективно обработать результаты измерений.

Методы второй группы основаны на использовании инструментальных средств, не входящих в штатный контроль. В этом случае необходимы разработка и совершенствование этих средств. Общими требованиями для обеих групп методов являются: возможность оценки текущего состояния и прогнозирования развития выявленных отклонений технического состояния; архивирование результатов контроля современными техническими средствами; анализ существующих критериев контроля и установление новых; наличие системы отображения результатов контроля для нескольких пользователей. По мере совершенствования систем контроля и диагностики технического состояния энергетических агрегатов методы первой и второй группы интегрируются в единую систему.

Основными направлениями работ по совершенствованию систем контроля и диагностики технического состояния генераторов являются: разработка, внедрение и совершенствование интегрированных систем оперативного контроля; разработка, внедрение и совершенствование систем комплексной оценки технического состояния и остаточного ресурса генераторов, в том числе их составных частей, при выполнении ремонтных операций с минимальными объемами разборки генераторов (системы комплексной оценки основаны на результатах прогнозирования развития обнаруженных дефектов и технико-экономических показателях, связанных с последствиями возможных отказов или их своевременным предотвращением); продолжение работ по дефектоскопии бандажных колец роторов турбогенераторов без их снятия с вала ротора, по методам измерения частичных и пазовых разрядов, по оценке интенсивности короны статорных обмоток генераторов, по методам выявления распушений крайних пакетов активной стали на основе спектральной обработки виброакустических сигналов; совершенствование методов тепловизионного контроля; накопление и анализ результатов новых методов контроля с целью определения критериев; решение

проблемы информационного обеспечения контроля технического состояния генераторов (сбор информации, обработка, передача, хранение) [3—5].

Большинство дефектов генераторов электростанций можно выявить с помощью датчиков температуры, вибраций, расходомеров хладоагентов, измерительных катушек для выявления короткозамкнутых витков ротора, датчиков вибраций, измерителей частичных разрядов, акустического шума. В составе систем диагностики должны быть еще устройства, регистрирующие анормальные режимы работы, пуски и остановки агрегата, сбросы и наброс нагрузки, работу с частотой и напряжением, отличающимися от номинальных.

В настоящее время самыми применяемыми для диагностики генераторов электростанций и самыми информативными являются системы вибродиагностики. Большинство повреждений генераторов приводит к появлению механических вибраций, анализ параметров которых на характерных частотах позволяет выявить и идентифицировать дефекты на самых ранних стадиях их зарождения и развития [2].

Для повышения надежности и безопасности генераторов, снижения затрат на обслуживание и ремонт на электростанциях начали внедряться АСУ техническим состоянием оборудования (ТОРО), в состав которых входят системы автоматической вибрационной диагностики, которые позволяют осуществить переход на систему обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию. Но широкое внедрение этих систем сдерживается высокой стоимостью и сложностью применяемых в них датчиков вибрации, аппаратных и программных средств обработки информации, в основном зарубежного производства. Вибрационный метод предполагает установку непосредственно на корпусе каждого агрегата несколько первичных датчиков для измерения параметров вибрации в характерных точках, при этом на сигналы вибрационных датчиков влияет вибрация других агрегатов, расположенных поблизости.

В течение ряда лет в ФГБО ВО «УГНТУ» разрабатываются электромагнитный спектральный метод диагностики динамического оборудования и реализующие этот метод программно-аппаратные комплексы, отличающиеся от вибрационных аналогов простотой и существенно низкой стоимостью, что позволяет организовать их массовое производство, использовать как в виде мобильных устройств диагностики, так и в составе АСУ ТОРО, осуществить реальный переход на систему обслуживания и ремонта генераторов по фактическому техническому состоянию [6, 7].

Из-за конструктивных особенностей напряжение на выходе любого генератора изначально не является идеально синусоидальным, всегда содержатся высшие гармонические составляющие (рис. 1).

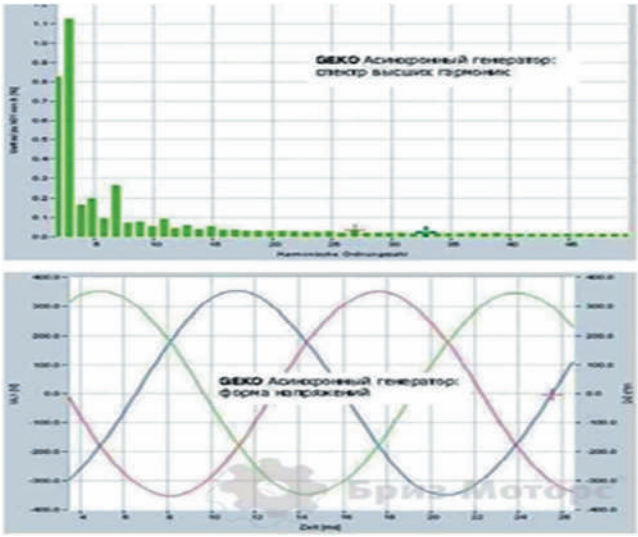


Рис. 1. Спектр высших гармонических составляющих в выходном напряжении генератора компании GEKO

Отклонения формы напряжения и тока генераторов от идеальной синусоиды регламентирует ГОСТ IEC 60034-1—2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики». Согласно этому стандарту значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения K_u и тока K_i, количественно характеризующих наличие высших гармоник в выходном напряжении и токе генератора, не должны превышать 5 % [8]:

$$K_u = \sqrt{\sum_{n=2}^{k} u_n^2}\ , \quad K_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{k} i_n^2}\ ,$$

где u_n и i_n — отношения напряжения U_n и тока I_n гармонических составляющих n к номинальным значениям напряжения $U_{\text{ном}}$ и тока $I_{\text{ном}}$; n — номера гармонических составляющих напряжения и тока.

Содержание конкретной гармонической составляющей напряжения и тока количественно оценивается коэффициентами гармонических составляющих напряжения K_{u_n} и тока K_{i_n}:

$$K_{u_n} = \frac{U_n}{U_1}100\ \%\,, \quad K_{i_n} = \frac{I_n}{I_1}100\ \%\,,$$

где U_1 и I_1 — значения напряжения и тока первой гармоники.

Изменение режимов работы, возникновение и развитие дефектов электрической и механической частей генератора являются причиной генерации дополнительных высших гармонических составляющих с определенными параметрами [9]. Измерение и анализ с использованием искусственных нейронных сетей параметров гармонических составляющих токов и напряжений энергетического агрегата позволяют идентифицировать его техническое состояние и режим работы [10].

Совокупность нормированных значений диагностических параметров, в том числе коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока, анализируется искусственной нейронной сетью 1, которая выдает результат — код режима работы и поврежденности элементов энергетического агрегата D_m. Для определения уровня поврежденности агрегата в целом используется интегральный диагностический параметр поврежденности D_Σ. Совокупность значений показателей D_m анализируется искусственной нейронной сетью 2, которая выдает результат — значение интегрального диагностического параметра поврежденности D_Σ [7]:

$$D_\Sigma = F\left(\sum_{m=1}^{p} W_m D_m\right),$$

где W_m — весовые коэффициенты нейронной сети 2; m — число входов нейронной сети 2; p — число выходов нейронной сети 1.

При этом генератор выступает и как объект диагностики, наравне с турбиной, и как высокочувствительный датчик, воспринимающий изменения в техническом состоянии и режимах работы всего агрегата (рис. 2).

Рис. 2. Структурная схема программно-аппаратного комплекса, реализующего электромагнитный спектральный метод диагностики энергетических агрегатов

Для обучения нейронной сети используется запатентованный метод, основанный на теории планирования эксперимента, позволяющий на несколько порядков снизить число обучающих опытов. На основе паспортных и каталожных данных генераторов создаются математические модели для безэталонной настройки системы диагностики [6].

В отличие от вибрационного метода диагностики, данный метод не требует установки датчиков на корпусе агрегата, достаточно измерять фазные токи и напряжения на выходе генератора стандартными измерительными датчиками тока и напряжения. В остальном организация и функционирование системы на основе электромагнитного спектрального метода диагностики совпадает с организацией и функционированием автоматической вибрационной системы диагностики — так же организованы каналы связи, те же интерфейсы, те же технические и программные средства, так же организовано управление агрегатом с использованием измеряемых технологических параметров. Предлагаемая система может быть использована совместно с уже функционирующими системами виброзащиты и вибромониторинга [11].

Литература

1. **Буянов И. Е.** К вопросу об организации техобслуживания // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 7—10.
2. **Дефекты** турбогенераторов и методы их диагностики на начальной стадии появления / Д.В. Кузнецов, В.В. Маслов, В.А. Пикульский и др. // Электрические станции. № 8. 2004. С. 51—58.
3. **Диагностика** технического состояния электрооборудования систем электроснабжения: учеб. пособие / В.А. Шабанов, М.Г. Баширов, П.А. Хлюпин и др. под ред. В.А. Шабанова. Уфа: Нефтегазовое дело», 2012. 372 с.
4. **Current** envelope analysis for defect identification and diagnosis in induction motors / J. Wang, S. Liu, R.X. Gao, R. Yan // Journal of Manufacturing Systems. 2012. No 31. P. 380—387.
5. **Совершенствование** методов оценки технического состояния силовых трансформаторов / М.Г. Баширов, И.В. Прахов, А.С. Хисматуллин, И.Г. Хуснутдинова // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 2—10.
6. **Способ** диагностики механизмов и систем с электрическим приводом / И.Р. Кузеев, М.Г. Баширов, И.В. Прахов и др. // Патент на изобретение RU 2431152 C2, 10.10.2011. Заявка № 2009143292/28 от 23.11.2009.
7. **Баширов М.Г., Миронова И.С.** Разработка интегральных критериев для оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового производства // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2015. № 1. С. 46—55.
8. **ГОСТ IEC 60034-1—2014.** Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.
9. **Гуков Д. В., Загуляев С. Д.** Определение намагничивающего тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с помощью регистратора

показателей качества электрической энергии // Промышленная энергетика. 2018. № 4. С. 29—36.
10. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г.** Интеллектуальная система управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов нефтегазового производства с электрическим приводом // Промышленная энергетика. 2019. № 6. С. 32—41.
11. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г.** Управление техническим состоянием и режимом работы машинных агрегатов с электрическим приводом // Федоровские чтения — 2019: Тр. 49-й Межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 43—48.

Е.Н. Соснина, sosnyna@yandex.ru,
Н.В. Шумский, shumskii.n@gmail.com,
И.И. Семенов, bagavix99@gmail.com,
ФГБОУ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

О РАЗРАБОТКЕ ААСУ ИРПМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Процесс цифровизации электроэнергетики и создания «умных» электрических сетей, поддерживаемый указами и постановлениями Президента и Правительства РФ [1—3], может получить новый толчок в развитии при реализации комплекса технических решений, лежащих в основе концепции «Энергетический интернет» [4]. Под интернетом энергии подразумевается сеть производителей, накопителей и активных потребителей электроэнергии, беспрепятственно участвующих в общей инфраструктуре и обменивающихся электроэнергией. При этом потребители будут обеспечены бесперебойным электроснабжением и высоким качеством электроэнергии [5].

Ключевой особенностью интернета энергии являются двунаправленные потоки мощности в распределительной электрической сети (РЭС) при обмене электроэнергией (ЭЭ) между источниками распределенной генерации, накопителями, активными потребителями и традиционными источниками энергии (ТЭЦ, ГЭС, АЭС и др.). Для решения задачи управления потоками мощности как по направлению, так и по величине, предлагается использовать тиристорный регулятор вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) [6]. ТРВДН позволяет управлять потокораспределением и качеством ЭЭ в РЭС 6−20 кВ путем введения вольтодобавочного напряжения в линию электропередачи при поперечном и продольном регулировании напряжения в точке подключения [7].

Активно ведутся работы по созданию активно-адаптивной системы управления (ААСУ) ТРВДН. ААСУ является децентрализованной системой управления (СУ) верхнего уровня и отвечает за измерение текущих

параметров ЭЭ, их анализ, реализацию оптимизационных алгоритмов и формирование управляющего сигнала для системы управления тиристорными ключами (СУ нижнего уровня). Предполагается установка СУ на каждый ТРВДН или группу ТРВДН в составе одного узла РЭС. ААСУ собирает информацию на своем участке сети и самостоятельно принимает решение о необходимости регулирования вольтодобавочного напряжения в соответствии с заложенным в нее алгоритмом. Разрабатываемая ААСУ позволяет говорить о ТРВДН как об интеллектуальном регуляторе потоков мощности (ИРПМ), способном стать базовым устройством сети, функционирующей по принципу интернета энергии. При этом ААСУ должна удовлетворять критериям быстродействия, точности, эффективности, гибкости к конфигурации сети и способности к масштабированию. Использование технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет выполнить требования, предъявляемые к СУ ИРПМ.

Цель исследования — разработка методики обучения и тестирования системы управления верхнего уровня ИРПМ на основе искусственной нейронной сети.

Под обучением ИНС подразумевается внедрение в ААСУ алгоритма управления одним из способов:

- обучение с учителем. ИНС обучается на размеченном наборе данных и предсказывает ответы, используемые для оценки точности алгоритма на обучающих данных;
- обучение без учителя. ИНС использует неразмеченные данные, из которых алгоритм самостоятельно пытается извлечь признаки и зависимости;
- обучение с подкреплением. Тренировка алгоритма при помощи системы поощрений. ИНС получает обратную связь в виде вознаграждений за правильные действия.

Разработана методика обучения ИНС с учителем. Методика заключается в разработке математической модели участков сети, установлении функциональной зависимости исследуемых параметров сети от величины вольтодобавки и формировании обучающего набора данных на основе компьютерного моделирования участка РЭС с ИРПМ. Под математической моделью подразумевается система нелинейных уравнений для схемы замещения участка РЭС с ИРПМ. Под функциональной зависимостью понимается функция выбранного критерия в зависимости от величины и угла вольтодобавочного напряжения. Разработан алгоритм оптимизации функциональной зависимости, позволяющий в динамике оптимизировать функциональную зависимость исследуемого критерия от вольтодобавочного напряжения в соответствии с месторасположением ИРПМ в РЭС.

Рассмотрены четыре характерных места установки ИРПМ в РЭС (рис. 1): узел генерации; узел потребителя; транзитный узел; узел просьюмера (активного потребителя) [8].

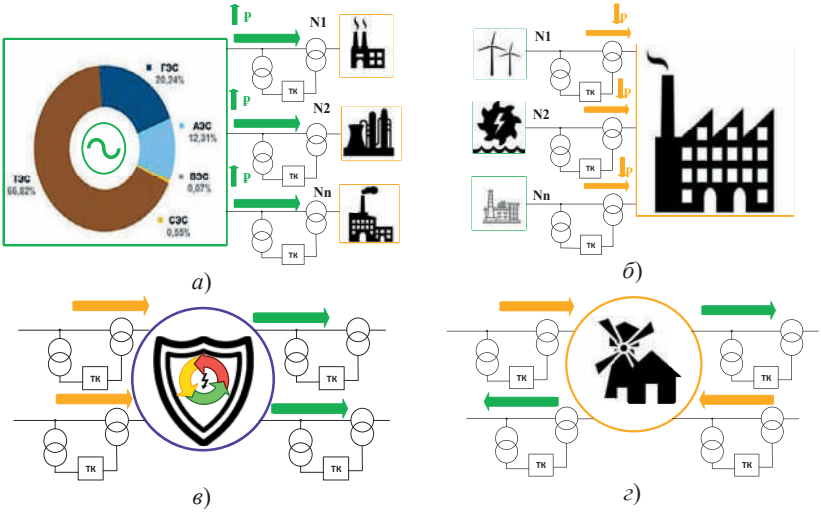


Рис. 1. Объекты исследования: *а* — узел генерации; *б* — узел потребителя; *в* — транзитный узел; *г* – узел просьюмера

При установке ИРПМ в узел генерации (рис. 1, *а*) оптимизационная задача ААСУ заключается в максимизации выгоды производителя, получаемой от поставки ЭЭ с требуемыми параметрами качества ЭЭ *N*-количеству потребителей, готовых закупить определенный объем ЭЭ по определенной цене.

При установке ИРПМ в узел потребителя (рис. 1, *б*) оптимизационная задача ААСУ заключается в минимизации затрат потребителя на закупку ЭЭ с требуемыми параметрами качества ЭЭ у *N*-количества производителей, готовых предоставить определенный объем ЭЭ по фиксированной цене.

При установке ИРПМ в транзитный узел (рис. 1, *в*) задача ААСУ заключается в оптимизации системы электроснабжения с точки зрения снижения потерь и повышении параметров качества ЭЭ при ее передаче от *N*-производителей к *M*-потребителей.

При установке ИРПМ в узел просьюмера (рис. 1, *г*) задачей ААСУ является оптимизация затрат просьюмера на закупку, продажу и накопление ЭЭ с требуемыми параметрами качества для обеспечения непрерывной прибыли от купли-продажи ЭЭ.

Исследована модель участка РЭС с ИРПМ в соответствии со схемой типового транспортного узла [9]. Для этого была создана математическая модель участка РЭС с ИРПМ, расчет которой позволил получить набор электрических параметров установившихся режимов. Для этого набора данных

произведены сортировка и оптимизация в соответствии с алгоритмом [10]. Полученный набор данных использован для обучения и тестирования системы управления в компьютерной модели участка РЭС с ИРПМ (рис. 2).

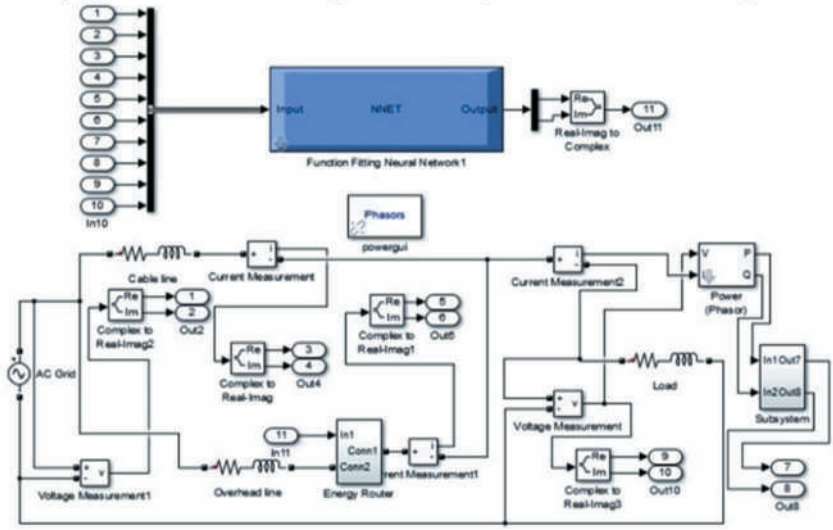
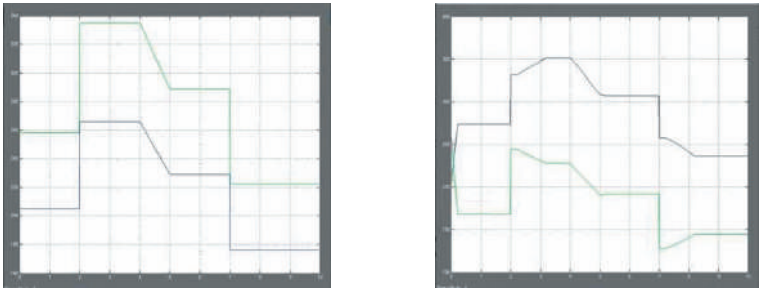


Рис. 2. Компьютерная модель участка РЭС с ИРПМ и СУ

В качестве эксперимента было решено позволить ААСУ в рамках компьютерной модели проводить регулирование вольтодобавки для поддержания требуемых параметров ПКЭ с увеличением КПД системы электроснабжения на 1,5 % (рис. 3).



а) *б*)

Рис. 3. Осциллограмма токов в ЛЭП № 1 (зеленый) и ЛЭП № 2 (черный) без СУ (*а*) и с СУ (*б*)

При заданных условиях задачи ток в ЛЭП №1 на 0-й секунде превышал длительно-допустимое значение, а ток в ЛЭП № 2 был существенно меньше длительно-допустимого уровня. ААСУ вводила в сеть вольтодобавку, при которой часть тока из ЛЭП № 1 перераспределилась в ЛЭП № 2. На 3-й секунде произошло увеличение потребляемой мощности нагрузкой, что привело к значительному увеличению токов в обеих ЛЭП. ААСУ скорректировала вольтодобавку и удержала режим в допустимой зоне. На 5-й секунде произошло уменьшение напряжения на источнике питания, при этом, благодаря ААСУ, режим остался в допустимой зоне. Далее, на 7-й секунде нагрузка уменьшилась, и ААСУ выровняла значения токов, снизив потери напряжения в ЛЭП.

В ходе экспериментов была доказана эффективность применения методики обучения ИНС с учителем для типового транспортного узла. В качестве функциональной зависимости была выбрана функциональная зависимость КПД от величины вольтодобавки с поддержанием требуемого уровня качества ЭЭ. Исследование показало возможность перераспределения потоков мощности в режиме реального времени. Однако для ИНС потребовался значительный набор обучающих данных, получить который в реальных условиях представляется проблематичным. Дальнейшая работа направлена на изучение методик обучения ИНС без использования обучающего набора данных для всех видов типовых узлов РЭС с ИРПМ.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 20-19-0054).

Литература

1. **Приказ** Минэнерго России от 16.09.2019 № 977 «Об организации в Минэнерго России работы по реализации Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 2042».
2. **Указ** Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
3. **Россети.** Концепция «Цифровая трансформация 2030». Москва, 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения 14.09.2020).
4. **Siebel T.** The Internet of Energy, Articles, C3.ai, Apr 1, 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://c3.ai/the-internet-of-energy/ (дата обращения 14.09.2020).
5. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
6. **Патент** на изобретение RU 2621062. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / А.А. Асабин, Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, Е.В. Крюков; опубл. 31.05.2017. Бюл. № 16.

7. **Voltage** Control with Thyristor-Regulated Booster Transformer / E. Sosnina, A. Asabin, A. Kralin, E. Kryukov// 6th IEEE International Conference on Smart Grid, icSmartGrids 2018. P. 202—207, Feb. 2019.
8. **Тоффлер Э**. Третья волна [пер. с англ. К. Ю. Бурмистрова и др.]. М.: АСТ, 2009. 795 с.
9. **Garza-Ulloa J.** Application of mathematical models in biomechatronics: artificial intelligence and time-frequency analysis // Applied Biomechatronics using Mathematical Models, 2018.
10. **Разработка** алгоритма определения оптимальных параметров функционирования ТРВДН / Е.Н. Соснина, А.И. Гадин, Н.В. Шумский, Л.А. Пюро// XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. Том I. Княгинино: НГИЭУ, 2018. С. 172—178.

Ю.Ю. Каракулова, yu.karakulowa@yandex.ru, КузГТУ, г. Кемерово

ВЫРАВНИВАНИЕ ОПТОВЫХ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ПО ТЕРРИТОРИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Оптовый рынок электроэнергии — это торговая площадка, на которой продается практически вся производимая электроэнергия России. Участники оптового рынка могут продавать и покупать электрическую энергию. Это генерирующие компании, операторы экспорта и импорта электроэнергии, энергосбытовые организации, крупные потребители и сетевые компании [1].

В российской электроэнергетике существует механизм перераспределения платежей за электроэнергию, т.е. перекрестное субсидирование. Промышленность и бизнес частично оплачивают электроэнергию, потребляемую населением и социальными объектами.

Предприятиям, подключенным к региональным сетевым компаниям, которые предоставляют услуги по передаче электроэнергии и подключают абонентов к сетям в своем регионе, приходится платить за электроэнергию по завышенным тарифам, чтобы покрыть заниженные тарифы для населения. Это вызвано тем, что весь объем перекрестного субсидирования населения устанавливается в тарифах только для региональных сетевых компаний.

Крупные промышленные предприятия, подключенные к магистральным сетям, не несут социальной нагрузки перекрестного субсидирования, что, по мнению Минэнерго, создает для них дополнительные экономические преференции по отношению к малому и среднему бизнесу.

По данным Минэнерго России, тариф для потребителей ФСК, который составляет 0,35 руб/(кВт·ч), является самым низким на сегодняшний день. Он в 4 раза ниже тарифа для потребителей, подключенных к высокому

уровню напряжения [1,2 руб/(кВт·ч)], и в 9 раз меньше тарифа для потребителей, которые подключены к низкому уровню напряжения [2].

Кроме того, это обстоятельство привело к значительному различию платежей за услуги по передаче электроэнергии для промышленных потребителей со схожими характеристиками потребления электроэнергии, но подключенных к сетям разного напряжения.

Так, в 2019 г. самые высокие тарифы на электроэнергию были установлены на Камчатке, Чукотке и в Магаданской области, где стоимость 1 кВт·ч составляла в среднем 7—8 руб. Самая низкая цена была зафиксирована в Иркутской области, которая достигла чуть более 1 руб/(кВт·ч) [3].

Вследствие увеличения цен на электроэнергию на розничном рынке перекрестное субсидирование увеличивается, что влечет за собой повышение тарифов на услуги для промышленных потребителей территориальных сетевых организаций. Вследствие этого у потребителей будет дополнительный стимул переходить от распределительных к магистральным сетям, что негативно скажется на развитии малых и средних предприятий: им придется платить за энергию по постоянно растущим тарифам, поскольку нагрузка распределяется между потребителями, оставшимися питаться от территориальных сетевых организаций.

Чтобы исключить повышение тарифов на электроэнергию для населения и снизить их для малых и средних предприятий, Министерство энергетики подготовило поправку к закону «Об электроэнергетике». В законопроекте предлагается равномерное распределение перекрестного субсидирования среди всех категорий покупателей, за исключением населения и эквивалентных категорий потребителей, независимо от того, подключены ли они к магистральным или распределительным сетям. Так, с 2021 г. планируется снизить тарифы на получение электроэнергии через распределительные сети малому и среднему бизнесу, а на магистральных сетях повысить тариф на передачу энергии. В то же время при равномерном распределении перекрестного субсидирования увеличится плата за электроэнергию для крупных промышленных предприятий [2].

Чтобы уйти от высоких тарифов на электроэнергию региональных сетевых компаний, крупный промышленный бизнес может строить блок-станции. Но это далеко не всегда возможно и экономически оправдано.

Для того, чтобы избежать проблем с перекрестным субсидированием, предлагается изменить модель рынка электроэнергии.

На данный момент в Единой энергосистеме России (ЕЭС России) действует конкурентный рынок. Переход к рынку «Единый покупатель» позволит сделать следующее:

- установить организацию, отвечающую за бесперебойное энергоснабжение страны и своевременное развитие ЕЭС, имеющей для этого необходимые финансовые ресурсы;
- устранить «ценопринимающие» заявки, не содержащие информации о фактических затратах станций на производство электроэнергии, следовательно, не позволяющие правильно оптимизировать режим работы энергосистем;
- сделать оптимизацию режимов работы ЕЭС России прозрачной и контролируемой.

В модели рынка «Единый покупатель» (конкуренция между поставщиками) один покупатель («агентство по закупкам») покупает электроэнергию у всех поставщиков. Электрогенерирующие компании (ЭГК) конкурируют друг с другом за поставку электроэнергии «агентству по закупкам». «Закупочное агентство» продает электроэнергию всем покупателям по ценам, которые формируются как средневзвешенная цена поставок электроэнергии поставщикам за расчетный период (период может быть произвольным) с добавлением «инвестиционной составляющей», необходимой для строительства новых электростанций. «Агентство по закупкам» отвечает за развитие системы электроснабжения.

Данная модель рынка позволяет:

- вследствие конкуренции между поставщиками создать стимул для снижения издержек генерирующих компаний;
- исключить колебание цен на электроэнергию для покупателей вследствие несистемных факторов (перегруз сечений, загрузка небольших, неэкономичных электростанций);
- обеспечить возможность получения средств, необходимых для строительства новой инфраструктуры (линий электропередач, новых подстанций и др.), путем включения «инвестиционной составляющей» в тарифы всех покупателей и за счет этого полностью управлять развитием энергетической системы [4].

Вывод. Смена модели конкурентного рынка электроэнергии на модель «Единый покупатель» позволит выровнять тарифы на электроэнергию между промышленными предприятиями, подключенными к сетям разного напряжения, снизить проблему перекрестного субсидирования.

Литература

1. **Рынок** электроэнергии и мощности [Электронный ресурс]. URL: https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm (дата обращения: 28.04.2020)
2. **Энергетика** на перекрестке [Электронный ресурс]. URL: https://lenta.ru/articles/2020/02/19/energetika/ (дата обращения: 27.05.2020)

3. **Выравнивание** тарифов на электроэнергию [Электронный ресурс]. URL: https://aif.ru/realty/utilities/chto_za_vyravnivanie_tarifov_na_elektroenergiyu_planiruyut_v_rossii (дата обращения: 27.04.2020).
4. **Беляев Л.С., Шурупов В.В.** Сравнительный анализ моделей оптового рынка электроэнергии //Электрические сети в Системе: (электр. журн.). 2007. URL: https://electricalnet.ru/blog/viktor-shurupov-proizvyol-sravnitelnyi-analiz-modelei-optovogo-rynka-elektroenergii (дата обращения: 01.05.2020).

С.А. Хорьков, horkov_07@mail.ru, УдГУ, г. Ижевск

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИНЦИПА САМОПОДОБИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ЦЕХА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Самоподобный объект в точности или приближенно совпадает с частью себя самого, т.е. объект как целое имеет ту же форму, что и одна или несколько его частей. Считается, что самоподобие есть геометрическое понятие, хотя иногда говорят и о статистическом самоподобии, в этом случае части и целое объекта имеют одно и то же статистическое распределение. Обычно самоподобный объект представляют через скейлинг – масштабно-инвариантное распределение частей. Самоподобные структуры реального мира являются носителями материальных, энергетических или информационных ресурсов. Поэтому теоретический и практический интерес представляет установление качественной и/или количественной связи между самоподобной гиперболической структурой и распределенным на ней ресурсом.

Для промышленной электроэнергетики этот вопрос трансформируется в установление количественной связи между величиной и самоподобной (древесной, гиперболической) структурой электропотребления многономенклатурного цеха. Геометрически ресурс и его части могут быть представлены через площадь графика нагрузки, а самоподобная (древесная) структура — через фракталы, *p*-адические числа, ветвящиеся процессы, гиперболические *H*-распределения [1]. Интерес также представляет исследование древесной структуры системы электроснабжения промышленного предприятия при помощи модели ветвящегося детерминированного или случайного процесса.

Поэлементный расчет электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия (ЭМЦПП) позволяет получить потребление цеха через его составляющие, а также гиперболическое распределение номенклатуры этих составляющих. Проблема поэлементного расчета заключается в том, что расчетное ЭМЦПП (W) через составляющие всегда

превышает ЭМЦПП, полученное по приборам учета (V) за тот же период времени [2, 3].

Эмпирической основой методологии самоподобия ЭМЦПП и основным ее противоречием является тот факт, что величина электропотребления цеха аддитивна и конечна, а гиперболическая структура мультипликативна и не имеет естественной границы.

Двухслойная модель многономенклатурного цеха, в которой разделены величина и самоподобная структура электропотребления, имеет вид

$$W_* \leftarrow W \rightarrow W^*, \qquad (1)$$

где W_*, W^* — ресурсный слой электропотребления, выраженный через вещественное число, и структурный слой, выраженный через p-адическое число, соответственно; W — ресурс электропотребления, выраженный через рациональное число; $\leftarrow$ и $\rightarrow$ — знаки отображения [2, 3].

Формально модель (1) связывает рациональные числа (Q) с вещественными (R) и p-адическими числами (Q_p). Вещественные числа получают пополнением (расширением) поля рациональных чисел в обычной топологии. Топологии, которые нумеруют простыми числами, являются полями p-адических чисел.

Поле вещественных чисел получают расширением поля рациональных чисел за счет архимедовой нормы, а поле p-адических чисел — за счет неархимедовой нормы.

Архимедовой нормой называют отображение поля Q в множество неотрицательных вещественных чисел (R_+), обозначаемое выражением $\| \ \| : Q \rightarrow R_+$. Оно удовлетворяет трем условиям: 1) $\|x\| = 0$ тогда и только тогда, когда $x = 0$; 2) норма от произведения чисел равна произведению норм этих чисел, т.е. $\|x \cdot y\| = \|x\| \cdot \|y\|$; 3) норма от суммы чисел меньше или равна сумме норм этих чисел, т.е. $\|x + y\| \le \|x\| + \|y\|$. Это условие называют неравенством треугольника.

Примером архимедовой нормы на поле рациональных чисел является абсолютная величина $\|x\| \equiv |x|$. Архимедову норму обозначают $|x|_\infty$.

Архимедова норма индуцирует функцию (метрику), позволяющую определить расстояние между двумя точками. Архимедова метрика удовлетворяет трем условиям: 1) $\rho(x, y)) = 0$ тогда и только тогда, когда $x = y$; 2) $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ — условие симметрии; 3) $\rho(x, y) = \rho(x, z) + \rho(z, y)$ — условие неравенства треугольника.

Норму, для которой выполняют два первых условия архимедовой нормы, а условие неравенства треугольника заменяют на условие усиленного треугольника $\|x+y\| \le \max(\|x\|,\|y\|)$, называют неархимедовой.

Неархимедова норма *p*-адического числа имеет вид $|\ |_p : Q \to R_+$. Ее записывают через кратность вхождения *m* простого числа *p* в разложение ненулевого целого числа *a* на простые множители, т.е. через степень наибольшего целого неотрицательного числа *m,* для которого $a \equiv 0 \pmod{p^m}$. Причем $|x|_p = (p^m)^{-1}$, если $x \neq 0$ и $|x|_p = 0$, если $x = 0$ [4].

Неархимедову метрику отличают от неархимедовой тем, что условие неравенства треугольника заменяют на условие неравенства усиленного треугольника $\rho(x,y) \le \max(\rho(x,z),\rho(z,y))$.

Это условие означает, что все треугольники *p*-адического пространства являются равнобедренными, причем их основание не превышает стороны треугольника. Метрику с условием неравенства усиленного треугольника называют ультраметрикой, а пространство – ультраметрическим. Ультраметрическое пространство позволяет естественным образом устанавливать на нем порядок. С геометрической точки зрения целое *p*-адическое число представляет собой граф-дерево.

Таким образом, поле вещественных чисел позволяет моделировать величину электропотребления, а поля *p*-адических чисел — его самоподобную структуру.

Двухслойная модель (1) позволяет также вводить и исследовать меры, размерности и нормы слоев ЭМЦПП.

Мера ресурсной части может быть получена на основе покрытия множества ресурса конечным числом шаров *N(a)* радиуса *a*:

$$W_* = \lim_{a \to 0} N(a)\, a^2, \qquad (2)$$

где $N(a)$ — количество шаров покрытия; $a > 0$ — радиус шара покрытия; 2 — размерность ресурсного пространства.

Выражение (2) показывает, что с геометрической точки зрения величина ЭМЦПП представляет собой площадь, имеющую размерность 2.

Меру иерархической части ЭМЦПП следует записать в виде:

$$W^* = \lim_{a \to 0} N(a)\, a^d, \qquad (3)$$

где *d* — размерность иерархическоой структуры ЭМЦПП.

Иерархическая структура имеет размерность, которая не равна целому числу. В выражении (3) размерность структуры есть размерность Хаусдорфа—Безиковича

$$d = \lim_{a \to 0} \ln(N(a))(\ln(a^{-1}))^{-1}. \qquad (4)$$

Она заключена в диапазоне $1 < d < 2$. Поэтому в модели ЭМЦПП иерархическую структуру следует считать фракталом. Его размерность находят экспериментально.

Выражение (2) позволяет получить величину ЭМЦПП на евклидовой плоскости, а выражение (3) представляет собой числовую характеристику фрактала-дендрита и/или целого *p*-адического числа [2].

Размерность площади ресурса и размерность структуры иерахического дерева связаны через показатель Херста *h*. Связь этих размерностей на самоаффинном пространстве имеет вид $h = 2 - d$ [2].

Если рассматривать проекции двухслойной модели ЭМЦПП как пространства, то на пространстве W вводят нормы для получения ресурсной $\|W_*\|$ и иерархической $\|W^*\|$ частей модели ЭМЦПП. Произведение этих норм, по аналогии с двойной характеризацией рационального числа по теореме Островского [2], позволяет получить значение некоторой величины ЭМЦПП, выраженной через рациональное число

$$\|W_*\| \cdot \|W^*\| = c, \qquad c - \text{const} \in W. \qquad (5)$$

Нетрудно увидеть, что нормы в выражении (5) связаны самоподобной гиперболической зависимостью [2].

В двухслойной модели ЭМЦПП (1) параметры структуры *p*-адического дерева можно выразить через параметры ветвящегося случайного процесса [5]. Ветвящийся случайный процесс записывают через случайную величину

$$\xi = (p_0, p_1, p_2, 0, ...). \qquad (6)$$

где p_0, p_1, p_2 означают вероятность исчезновения элементов, вероятность постоянства (неизменности) элементов, вероятность появления новых элементов на каждом новом уровне ветвления соответственно.

Для детерминированного *2*-адического дерева из выражения (6) имеем

$$P(\xi = 0) = 0 \;\; , P(\xi = 1) = 0 \;\; , P(\xi = 2) = 1 \;\; , P(\xi = 3) = 0. \qquad (7)$$

Другими словами, для описания *2*-адического дерева ξ не является случайной величиной, поскольку вероятность появления новых элементов на каждом новом уровне ветвления равна единице, а остальные вероятности равны нулю.

Тогда производящая функция на основе (7) имеет вид $F(s) = p_2 s^2$, где $p_2 = 1$, а после *n*-й итерации она будет равна

$$F_n(s) = F(F_{n-1}(s)) = \underbrace{F(F(...F(s)...))}_{n} = \left\{...\left\{\left\{s^2\right\}^2\right\}^2...\right\}^2 = \left\{s^2\right\}^n.$$

Математическое ожидание числа элементов после *n*–й итерации будет равно

$$M(S_n) = \left.\frac{\partial F_n(s)}{\partial s}\right|_{s=1} = 2^n \left\{s^{2^n - 1}\right\}\Big|_{s=1} = 2^n.$$

Очевидно, что размеры элементов на каждом уровне деления будут равны 2^{-n}.

Связь между древесной и гиперболической структурами ЭМЦПП можно представить через случайный ветвящийся процесс чистого размножения Юла $p_i(t)$, который может быть прерван в любой момент времени с известной вероятностью $p(t)$ [6].

Процесс чистого размножения Юла представляет собой геометрическое распределение с экспоненциальным основанием.

Распределение вероятности для него имеет вид

$$p_i(t) = 0, \quad i = 0; \quad p_i(t) = e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t})^{i-1}, \quad i = 1, 2, ..., \tag{8}$$

где λ — коэффициент пропорциональности.

Вероятность прекращения ветвления имеет вид

$$p(t) = \mu\, e^{-\mu t},. \tag{9}$$

где μ — коэффициент пропорциональности.

Стационарное распределение процесса ветвления на основе (8) и (9) за достаточно большой промежуток времени следует усреднить по параметру времени *t*:

$$p(i) = \int_0^{\infty} p_i(t)\ p(t)\, dt\,. \qquad (10)$$

Результат вычисления (10) имеет вид

$$p(i) = \alpha\ B(i, \alpha + 1), \quad i = 1, 2, ..., \qquad (11)$$

где $B(i, \alpha + 1) = \dfrac{\Gamma(i)\Gamma(\alpha + 1)}{\Gamma(i + \alpha + 1)}$ — бета функция; $\Gamma(i) = (i - 1)!$ — гамма-функция; $\alpha = \mu\ \lambda^{-1}$ — характеристический показатель.

При $\lambda > \mu$ вероятность вырождения случайного процесса меньше единицы. На основе формулы Стирлинга при $i \to \infty$ имеем

$$\frac{\Gamma(i)}{\Gamma(i + \alpha + 1)} \to \frac{1}{i^{1+\alpha}}\,. \qquad (12)$$

Окончательно из (11) с учетом выражения (12) получаем

$$p(i) = \frac{\Gamma(\alpha + 1)\ \alpha}{i^{1+\alpha}} = \frac{A}{i^{1+\alpha}}\,. \qquad (13)$$

Модель (10) в виде (13) иллюстрирует связь между случайным ветвящимся процессом и гиперболическим распределением.

Гиперболическое распределение ЭМЦПП позволяет найти связь между его расчетной величиной (W) и величиной, полученной по приборам учета (V) [2, 3]. Площади электропотребления, ограниченные гиперболами, вычисляют по выражениям

$$\int_1^a \frac{dw}{w} = \ln W, \qquad \int_1^a \frac{dv}{v} = \ln V. \qquad (14)$$

Если существует отношение площадей в виде

$$d = \frac{\ln W}{\ln V} - \text{const}, \qquad (15)$$

то выражение (15) позволяет записать закон масштабирования ЭМЦПП в виде

$$W = V^d\,. \qquad (16)$$

Закон масштабирования ЭМЦПП (16) можно получить также через теорию категорий. Элементарный топос есть конечно полная категория, с классификатором подобъектов, декартово замкнутая. В данном случае он имеет вид

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ \downarrow! & & \downarrow\chi \\ 1 & \xrightarrow{T} & \Omega, \end{array} \qquad (17)$$

где V, W — фактическое и расчетное пространство ЭМЦПП соответственно; 1 и Ω – конечный объект и классификатор подобъектов соответственно. Знаки $f, T, !, \chi$ — исходная стрелка, стрелка «истина», единственная стрелка, характеристическая стрелка соответственно [2].

Из декартовой замкнутости элементарного топоса (17) следует существование декартово замкнутого выражения:

$$\begin{array}{ccc} v \times c & \rightarrow & v, \\ \downarrow & & \downarrow \\ w & \rightarrow & w^c. \end{array} \qquad (18)$$

На основе выражения (18) можно записать

$$\hom(v \times c, w) \cong \hom(v, w^c), \qquad (19)$$

где $v \in V$, $w \in W$, c — показатель степени, $v \times c$ — декартово произведение.

Другими словами, из выражений (18) и (19) видно, что топос содержит экспоненты. Тогда существует степенная связь расчетного и фактического (приборного) ЭМЦПП в виде

$$V = W^C. \qquad (20)$$

Коэффициент подобия является инвариантом гиперболических распределений. Он связан с отношением площадей ЭМЦПП (15):

$$d = C^{-1} = \log_V W. \qquad (21)$$

Выводы

1. Двухслойная модель электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия, соединяющая величину в виде вещественного

числа и самоподобную структуру в виде *p*-адического числа, позволяет установить гиперболическую зависимость между нормами этих чисел.

2. Древесная и гиперболическая структуры электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия связаны через ветвящийся случайный процесс.

3. Закон масштабирования между расчетным и фактическим (приборным) электропотреблением многономенклатурного цеха промышленного предприятия устанавливают на основе гиперболических структур этих распределений, а также на основе модели электропотребления в виде элементарного топоса.

Литература

1. **Кудрин Б. И.** Математика ценозов: видовое, ранговидовое, ранговое по параметру гиперболические *H*-распределения и законы Лотки, Ципфа, Парето, Мандельброта. В кн.: Философские основания технетики. «Ценологические исследования». Вып. 19. М.: Центр системных исследований, 2002. С. 357—412.
2. **Хорьков С.А.** Проблема расчета электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия, модели и методики для ее решения: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. 124 с.
3. **Хорьков С.А.** Числовая модель электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия // Промышленная энергетика. 2018. № 5. С. 44—51.
4. **Коблиц Н.** *P*-адические исла, *p*-адический анализ и дзета-функции / Пер. с англ. В.В. Шокурова; под ред. и с пред. Ю.И. Манина. М.: Мир, 1981. 192 с.
5. **Иванов С.А.** Основы теории случайных кластерных процессов и ее практическое применение. М.: ЛЕНАНД, 2017. 224 с.
6. **Яблонский А.И.** Модели и методы исследования науки. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 400 с.

А.С. Исаев, ASIsaew@nirhtu.ru,
Е.Ю. Фатюшина, EYFatyushina@nirhtu.ru,
Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНЫХ КУРСОВ В СДО

Современное развитие IT-сферы приводит к возможности построения качественно новых и принципиально более точных моделей систем электроснабжения (СЭС). Особенно актуально подобное в условиях невозможности проведения учебного процесса в виде контактных, традиционных аудиторных занятий. В этой связи необходимо адаптировать имеющиеся учебные курсы дисциплин, включая лабораторный практикум, к системе дистанционного обучения (СДО).

Ранее дисциплины кафедры ЭПП НИ РХТУ использовали при проведении лабораторных занятий комплекс «Электроэнергетика» [1], включающий в себя модульные лабораторные стенды с выводом информации на IBM PC. Нужно заметить, что эта установка обладает низкой степенью возможности «цифровизации» в виде непосредственного использования видеоматериалов, так как нет возможности удаленно обрабатывать результаты эксперимента — программа «Электронный осциллограф» может функционировать только при установке на компьютере платы АЦП (поставляется с каждым модулем комплекса, сопряженным с IBM PC, в единичном экземпляре).

Наряду с общими проблемами СДО (недостаточная подготовка в области информационных технологий, технические проблемы, отсутствие необходимого контента) для технических дисциплин существуют свои особенности. Преподавание гуманитарных дисциплин в известной мере решает задачу организации СДО проведением веб-конференций на различных платформах (Zoom, Skype) или использованием мессенджеров (прежде всего WhatsApp). Для технических задач, использующих серьезный математический аппарат, подобное достаточно лишь в виде информатизации, но не дает возможности глубоко изучить дисциплину.

Поэтому нами была решена задача алгоритмической разработки и программной реализации виртуального стенда. В качестве инструментального средства принят MatLab, впервые и наиболее полно использовавшийся для подобных задач в ПГУ [2]. MatLab принят как инструментальное средство ввиду широких функциональных возможностей — моделирование объектов СЭС в библиотеке Simulink. Отличие нашей разработки в том, что СЭС рассматривается как некая целостность — электроэнергетический комплекс, включающий в себя элементы генерации (энергосистема или местные источники энергии), распределения, трансформации и потребления электроэнергии. Для построения модели использована библиотека электротехнических устройств Simulink, модуль SimPowerSystems, функции приняты согласно [3].

Таким образом, построена более точная (в сравнении с моделями, использующими линеаризованные допущения инженерных методик) модель СЭС. При это режим можно рассматривать пофазно, отказавшись от искусственной системы координат «d−q», связанной с движущимся ротором синхронной машины. Поэтому может использоваться для широкого круга вопросов учебного процесса. Наряду с классическими (анализ токов КЗ в электромагнитных переходных процессах; расчет различных видов устойчивости — в электромеханических) можно исследовать удаленные КЗ, устойчивость при коммутационных переключениях, пуск и самозапуск двигательной нагрузки.

Разработанный программный комплекс создает информационную основу для учебных, прикладных и проектировочных задач СЭС.

Рассмотрим работу стенда на примере исследования начального момента короткого замыкания. Для лабораторного практикума студенты получают «собранную схему» в формате slx-файла (введен в Simulink вместо формата mdl в 2012 г.). Пример модели приведен на рис. 1. Она включает в себя аналог силовой части (Источник — ЛЭП — Трансформатор — Нагрузка) и цифровые измерительные приборы.

Ввод данных осуществляется традиционно через контекстное меню элементов. Рассмотрим задание исходных параметров на примере источника питания (рис. 2). Для него помимо традиционных номинальных величин задается мощность короткого замыкания (в рассматриваемом примере $S_{КЗ}$ = = 1000 МВ·А), варьируя которую, можно получить зависимости для различных моделей (источник бесконечной или соизмеримой мощности). Таким образом, обеспечивается исследование переходного процесса при изменении исходных данных (параметров системы).

Исходный (предшествующий) режим задается плагином «*Load Flow*» в блоке «*Powergui*» на вкладке «*Tools*». Для выбора вида КЗ используется блок «*Короткозамыкатель*», в котором задается вид КЗ, время возникновения КЗ (по отношению к исходному режиму), сопротивление контактов и заземлителей. Заметим, что MatLab использует стандарт расчета [4], отличающийся от ГОСТов РФ, поэтому определить аналоги отечественных методик нам удалось не для всех величин (в частности, параметр «*Snubber resistance and capacity*», определяющий характеристики обмотки выключателя, шунтирующей коммутационный аппарат). Они установлены при моделировании в положение «по умолчанию».

На рисунке 3 показан результат моделирования КЗ в сети 6 кВ, точка КЗ — РУ НН ГПП, приведен график периодической составляющей и полного тока КЗ. При вариации исходных данных аналогичные графики получены для несимметричных КЗ (с декомпозицией симметричных составляющих обратной и нулевой последовательности).

Результаты показывают корректность применения модели для качественного анализа переходных процессов. В области количественных оценок наблюдается заметное отклонение величин по модели от расчетных. Это объясняется особенностями стандарта ANSI/IEEE (которому соответствует модель MatLab) как в терминологической, так и в расчетной части. Стандарт ГОСТ РФ [5] предполагает учет дополнительного сопротивления в зависимости от места КЗ, стандарт ANSI/IEEE — общее эквивалентирование схемы. Сравнение различных стандартов расчета тока КЗ в области терминологического и понятийного аппаратов представляется дальнейшим продолжением теоретической части данной работы. Пока можно сделать некоторые выводы по полученным результатам.

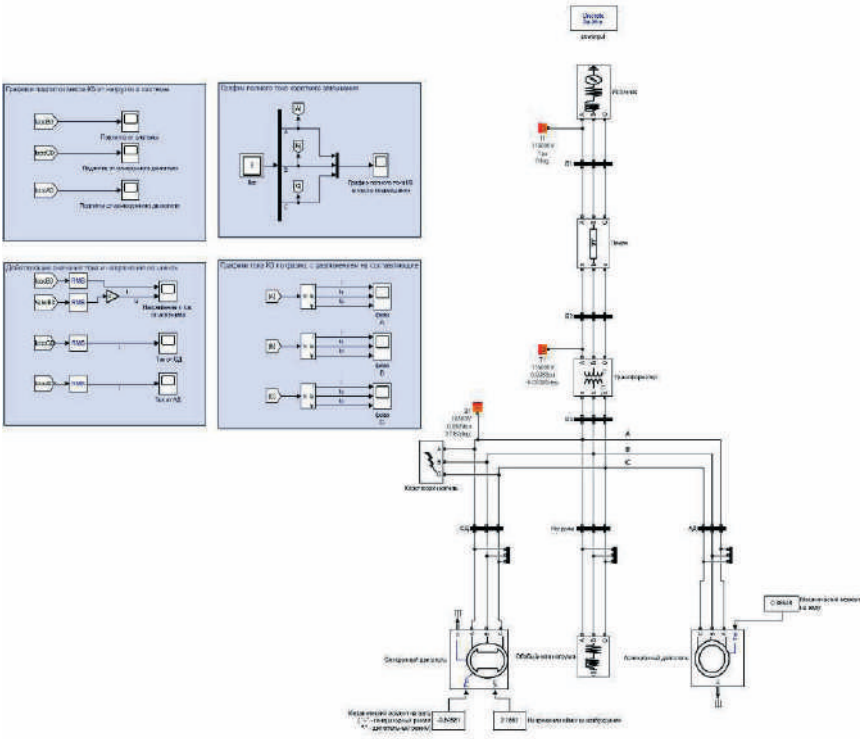


Рис. 1. Модель СЭС — MatLab Simulink

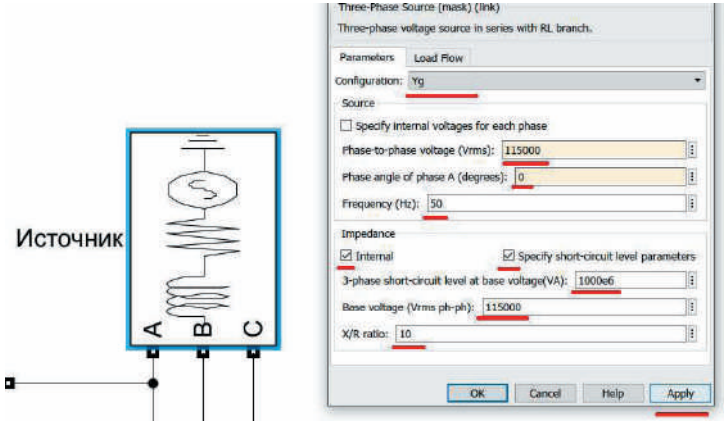


Рис. 2. Ввод данных для источника питания

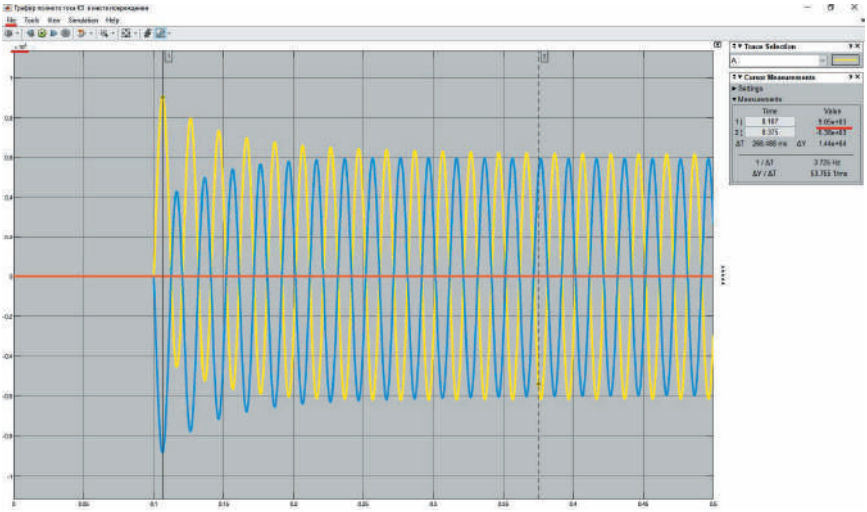


Рис. 3. Результаты моделирования трехфазного КЗ

В расчетной части стандарт ANSI/IEEE существенно отличается от ГОСТ РФ при формировании начальных условий расчета, прежде всего, для источников энергии. В соответствии с ним параметры схемы замещения каждого отдельного источника не рассчитываются по параметрам предшествующего режима, а принимаются по номинальному режиму (величина ЭДС принимается близкой к номинальному напряжению — 0,9÷1,1 $U_{\text{НОМ}}$); большинство источников принимаются как работающие на холостом ходу (подпитка от них игнорируется); отсутствует такое понятие как «обобщенная нагрузка» (согласно ГОСТ РФ — эквивалентный источник, включающий в себя мелкие асинхронные двигатели и осветительную нагрузку).

Помимо этого повреждение в области РУ НН ТП выносится за пределы расчета. В соответствии со стандартом ANSI/IEEE это называется током включения трансформатора, определяется броском тока намагничивания не расчетом, а по каталожным данным в зависимости от напряжения и мощности силового трансформатора.

Согласно ГОСТ РФ полный ток КЗ представляет собой сумму двух составляющих (слагающих): $i_{\text{п}}$ — периодическая составляющая (ток нового установившегося режима); $i_{\text{а}}$ — апериодическая составляющая (ток свободного процесса, отражающего обмен энергии между источником и сетью). Стандарт ANSI/IEEE направлен на определение полного тока КЗ, который назван несимметричным током. При этом нет классификации режимов на симметричные и несимметричные. Также определяются и параметры трехфазного КЗ, которое является режимом симметричным.

Таким образом, установлено существенное расхождение отечественных и зарубежных методик анализа аварийных режимов СЭС, что препятствует гармонизации стандартов расчета токов КЗ и требует критического анализа проектных документов на основе стандартов МЭК. Поэтому затруднено использование в проектной практике специализированных программ выбора электрооборудования, в частности — NEPLAN (Швейцария) и PSS/E (Германия).

Машинный эксперимент проведен на примере СЭС ООО «Щекиноазот» — производство серной кислоты. Особенностью функционирования данного предприятия являются тесные связи с зарубежными партнерами: в области технологии фирмы Германии («Top Werk GmbH») и Дании («Haldor Topsøe»), в области проектирования и монтажа объектов — Китая (концерн «China National Chemical Engineering»). При этом наблюдается существенное расхождение принятых режимных параметров по сравнению с опытом проектирования подобных отечественных объектов (значения аварийных режимов и принятые на их основе уставки РЗиА).

Нами проведен расчет токов КЗ для объекта исследования двумя способами: непосредственно на основе ГОСТ РФ и построением модели в MatLab (использует стандарт ANSI/IEEE). Основные результаты расчета сведены в таблицу, а качественный вид переходного процесса соответствует проведенным ранее расчетам и практике проектирования аналогичных объектов.

Таблица

Результаты расчета токов КЗ в сети ООО «Щекиноазот»

Параметр	Расчет по ГОСТ РФ	Расчет в MatLab (стандарт ANSI/IEEE)
Положение точки КЗ	РУ ВН ГПП (110 кВ)	
Начальное значение тока КЗ, кА	5,94	5,4
Максимальное значение тока КЗ, кА	9,53	9,2
Положение точки КЗ	РУ НН ГПП (6 кВ)	
Начальное значение тока КЗ, кА	9,29	10,0
Максимальное значение тока КЗ, кА	18,51	19,7
Положение точки КЗ	РУ НН КТП (0,4 кВ)	
Начальное значение тока КЗ, кА	13,41	26,4

Можно сделать вывод о хорошем соответствии параметров режима в сети напряжением выше 1 кВ (для практических задач могут использоваться как ГОСТ РФ, так и стандарт ANSI/IEEE) и значительном

расхождении — в сети до 1 кВ. Это объясняется тем, что ГОСТ РФ учитывает в сети до 1 кВ дополнительное активное сопротивление, учитывающее переходное сопротивление контактов и измерительных трансформаторов тока. Если в модель MatLab принудительно ввести такое сопротивление, то начальное значение тока КЗ уменьшается с 26,4 до 15 кА. Результат моделирования сети до 1 кВ следует оценить компромиссно. Максимальное значение тока КЗ согласно ANSI/IEEE можно использовать для выбора оборудования (хотя при этом и возможен чрезмерный запас), но для проверки устройств РЗиА по минимальному току его использование недопустимо (значение тока существенно завышено). А в целом использование разработанного виртуального стенда успешно и создает информационную основу для СДО кафедры «ЭПП» НИ РХТУ при преподавании ряда дисциплин.

Литература

1. **«ГалСен»** — учебная техника. [Электронный ресурс]. URL: https://galsen.ru/catalog/elektroenergetika/ (дата обращения: 20.09.2018).
2. **Горячев В.Я.** Электромагнитные переходные процессы: лабораторный практикум. Пенза: Изд-во ПГУ, 2009. 52 с.
3. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
4. **ANSI C37.13-1973** (IEEE 20-1973): American National Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
5. **ГОСТ 28249—93**. Короткие замыкания в электроустановках переменного напряжения до 1 кВ. М.: Издательство межгосударственных стандартов, 1994.

СЕКЦИЯ 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru,
А.А. Иващенко, alexandr_ivashchenko@mail.ru,
ООО КИЦ «Техноценоз», г. Калининград

МЕТОДИКА МС-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСХОДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА АРКТИКИ РОССИИ

На сегодняшний день ПАО «НОВАТЭК» входит в тройку крупнейших в мире компаний по объему доказанных запасов природного газа. По состоянию на 31 декабря 2019 г. доказанные запасы углеводородов Компании составили 16 265 млн баррелей нефтяного эквивалента (бнэ), в том числе 2234 млрд м^3 газа и 193 млн т жидких углеводородов [1].

На динамику запасов в 2019 г. повлияли успешные результаты геологоразведочных работ на Геофизическом, Утреннем и Харбейском месторождениях, эксплуатационное бурение на Уренгойском, Восточно-Уренгойском, Восточно-Тазовском, Северо-Русском и Южно-Тамбейском месторождениях, а также открытие Няхартинского месторождения и новых Ачимовских залежей на Гыданском полуострове.

Компания значительно увеличила объем геологоразведочных работ в 2019 г. и приобрела новые лицензионные участки на полуострове Гыдан. Включение в запасы по международным стандартам крупных геологических открытий будет способствовать успешной реализации будущих крупных СПГ-проектов «НОВАТЭКа» в Арктике и поддержанию уровня добычи трубного газа. Доказанные и вероятные запасы углеводородов составили 28 725 млн бнэ, в том числе 3901 млрд м^3 газа и 373 млн т жидких углеводородов (рис. 1).

Основной реализуемый проект в настоящее время — «Ямал СПГ», ресурсной базой для которого является Южно-Тамбейское месторождение, расположенное на северо-востоке полуострова Ямал на берегу Обской губы. Доказанные и вероятные запасы месторождения оцениваются в 926 млрд м^3 газа и 30 млн т жидких углеводородов. Проектный уровень добычи составляет около 27 млрд м^3 газа в год на протяжении как минимум 20 лет [1].

Проект разработки месторождения предусматривает бурение 208 наклонно направленных эксплуатационных скважин с горизонтальным окончанием (с длиной горизонтального участка не менее 500 м) с 19 кустовыми площадками [1].

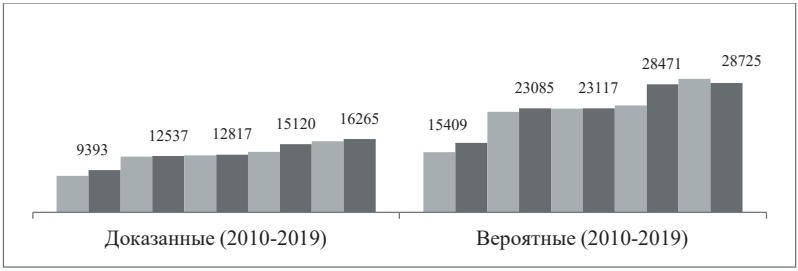


Рис. 1. Суммарные запасы углеводородов с 2010 по 2019 гг., млн бнэ

Специально для проекта были разработаны и изготовлены буровые установки «Арктика». Установки предназначены для работы в сложных природно-климатических условиях Ямала, они полностью защищены от ветров, что обеспечивает качественно иные условия труда для персонала и непрерывность бурения независимо от погодных условий.

Для повышения эффективности разработки месторождения применяются инновационные и экологически-безопасные технологии, оборудование и материалы. Бурение скважин осуществляется с использованием буровых растворов на углеводородной (масляной) основе, что позволяет сохранить естественные фильтрационно-емкостные свойства продуктивного пласта [1].

Используется модульный принцип монтажа, что значительно сокращает затраты на строительство в условиях Арктики и оптимизирует график реализации проекта. Производственный комплекс будет включать четыре технологические линии сжижения газа. Первая очередь запущена в декабре 2017 г. [1].

Углеводородная смесь со скважин поступает на единый интегрированный комплекс подготовки и сжижения природного газа. На входных сооружениях комплекса происходит сепарация, т.е. отделение от газа механических примесей, воды, метанола и конденсата. В составе входных сооружений предусмотрены установки регенерации метанола и стабилизации конденсата [1].

Для проекта «Ямал СПГ» спроектированы и построены специальные танкеры усиленного ледового класса «Arc7», позволяющие осуществлять круглогодичную навигацию без ледокольной проводки в западном направлении и в течение арктического лета — в восточном направлении по Северному морскому пути.

Отсепарированный газ поступает на технологические линии сжижения и последовательно проходит очистку от кислых газов и следов метанола, осушку и удаление ртути, извлечение сжиженных углеводородных газов. Далее очищенный газ поступает на предварительное охлаждение и сжижение. Для предварительного охлаждения газа используется пропановый холодильный контур, для сжижения — контур со смесевым хладагентом. Готовый СПГ подается на хранение в криогенные резервуары (рис. 2).

Рис. 2. Криогенные резервуары «Ямал СПГ», стилизованные под банки со сгущенным молоком

Интегрированный комплекс включает в себя также установки фракционирования сжиженных углеводородных газов, парки хранения стабильного конденсата и хладагентов, электростанцию мощностью 376 МВт, общезаводские инженерные системы и факельные установки.

В разработке арктического танкера для транспортировки сырья принимали участие российские и зарубежные классификационные общества и ведущие проектные и конструкторские институты, судоверфи и компании-судовладельцы. Танкер обладает системой двойного действия — носовая часть приспособлена для навигации в открытой воде и в условиях тонкого льда, а кормовая оптимизирована для самостоятельной навигации в сложных ледовых условиях [1].

В федеральной собственности находятся оградительные ледозащитные сооружения, операционная акватория, подходные каналы, системы управления движения судов и навигационного обеспечения, здания морских служб. К объектам «Ямал СПГ» относятся технологические причалы по перевалке сжиженного природного газа и газового конденсата, причалы накатных грузов, причалы строительных грузов, причалы портофлота, складские помещения, административно-хозяйственная зона, инженерные сети и коммуникации.

Строительство порта велось в два этапа — подготовительный и основной. Подготовительный этап — строительство грузового порта для приемки строительных грузов и технологических модулей завода СПГ. Вторая

очередь порта — строительство технологических причалов для отгрузки СПГ и газового конденсата [1].

Для целей проекта «Ямал СПГ» на территории лицензионного участка построен международный аэропорт. Аэропортовый комплекс включает в себя аэродром I категории ИКАО, взлетно-посадочную полосу 2704×46 м, ангары для авиатехники, служебно-пассажирское здание, в том числе международный сектор. Оператором аэропорта является 100%-ное дочернее предприятие ОАО «Ямал СПГ» — ООО «Международный аэропорт Сабетта». Первый технический рейс с посадкой самолета был выполнен 4 декабря 2014 г., на данный момент действуют регулярные рейсы из Нового Уренгоя, Москвы и Самары [1].

Поселок Сабетта, расположенный на восточном берегу полуострова Ямал, является опорным пунктом проекта «Ямал СПГ», крупнейшей ОТС в Арктике. Кроме того, это колоссальный припортовый энергетический комплекс, одновременно являющийся как производителем, так и крупным потребителем энергетических ресурсов. В поселке создана вся необходимая инфраструктура для проживания строителей. Возводятся вспомогательные объекты комплекса жизнеобеспечения: склад хранения ГСМ, котельная, энергоцентр, столовые, медпункты, прачечная, бани, спорткомплекс, административно-бытовой комплекс, гостиница, пожарное депо, канализационные и водоочистные сооружения, теплая стоянка для автомобилей, склады хранения продовольствия.

В июле 2012 г. был дан старт строительству завода «Ямал СПГ» на базе Южно-Тамбейского месторождения и морского порта Сабетта. Всего через пять лет, 8 декабря 2017 г., в присутствии президента России Владимира Путина состоялась загрузка сжиженным газом первого танкера-газовоза «Кристоф де Маржери» с первой технологической линии мощностью 5,5 млн т в год. Всего же после ввода в строй всех четырех линий предприятие будет производить 17,4 млн т СПГ в год [2].

Для реализации задачи, обозначенной главой государства, а Владимир Путин предложил увеличивать число таких перспективных проектов и поставил задачу занять на рынке СПГ достойную нишу, компания «НОВАТЭК» приступила к реализации своего второго СПГ-проекта «Арктик СПГ 2» [2].

«Арктик СПГ 2» — очередной проект «НОВАТЭКа», связанный с производством сжиженного природного газа. Проект предусматривает строительство трех технологических линий по производству сжиженного природного газа мощностью 6,6 млн т в год каждая и стабильного газового конденсата до 1,6 млн т в год. Общая мощность трех линий составит 19,8 млн т СПГ в год. Проект основан на инновационной концепции строительства с использо-

ванием оснований гравитационного типа (ОГТ). Оператором проекта и владельцем всех активов является ООО «Арктик СПГ 2» [2].

Ресурсной базой проекта «Арктик СПГ 2» является Утреннее месторождение, расположенное на полуострове Гыдан в Ямало-Ненецкого автономного округа, примерно в 70 км от проекта «Ямал СПГ» через Обскую губу (рис. 3) [2].

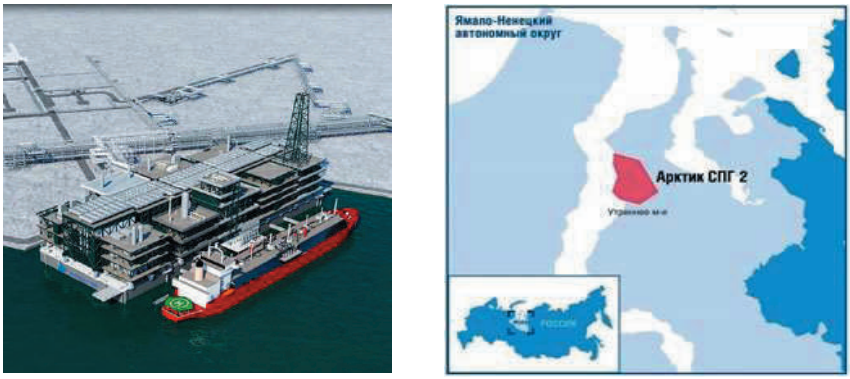


Рис. 3. Проект «Арктик СПГ 2»

В 2018 г. были завершены основные технические решения и проектная документация, начато выполнение инженерной подготовки территории, строительство первоочередных объектов энергоснабжения и бурение эксплуатационных скважин, строительство причальной набережной [2].

Участники «Арктик СПГ 2» приняли окончательное инвестиционное решение по проекту в сентябре 2019 г. Капитальные вложения для запуска проекта на полную мощность оцениваются в эквиваленте $21,3 млрд.

Применение технологической концепции строительства на ОГТ, а также обширная локализация производства оборудования и материалов в России позволят существенно снизить капитальные затраты на тонну производимого СПГ в рамках данного проекта. Это обеспечит низкую себестоимость производимой продукции и максимальную конкурентоспособность на всех рынках СПГ.

Для обеспечения изготовления ОГТ, сборки и установки модулей верхних строений недалеко от Мурманска вблизи п. Белокаменка строится Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС, бывшая Кольская верфь, рис. 4). Центр будет включать два сухих дока для строительства ОГТ и мощности для изготовления модулей верхних строений. Он создаст современную техническую базу СПГ-технологий в России, новые рабочие места в области инженерных разработок и производства, а также внесет вклад в экономическое развитие региона.

Рис. 4. Строительство Центра крупнотоннажных морских сооружений, планируемое размещение оснований гравитационного типа

Верфь будет вести строительство и оснащение плавучих железобетонных конструкций для создания ОГТ, т.е. транспортируемых к месту базирования на плаву и погружения на дно за счет собственного веса. Назначение платформ — заводы по сжижению и перегрузке природного газа. Модули самого завода сжижения газа также планируется изготавливать на верфи [3].

Завод имеет причальный фронт протяженностью 1290 м, который включает шесть причалов, в том числе достроечную набережную длиной 384 м, которая предназначена для достроечных и пусконаладочных работ. С ее учетом мощности ЦСКМС позволят одновременно изготавливать три платформы для сжижения природного газа [4].

15 июня 2017 г. подписано распоряжение Правительства РФ о сооружении четырех искусственных островов в Кольском заливе для нужд Центра строительства крупнотоннажных морских сооружений [5].

Строительство заводов на ОГТ является более рентабельным, нежели стандартный способ конструирования. Это дешевле ввиду доступности материалов, необходимых для изготовления. Время транспортировки в любой регион и установки на дно невелико. Что касается ОГТ, которые будут собираться на ЦСКМС, то на них разместится сложнейшее технологическое оборудование, состоящее из 14 модулей общим весом 140 тыс. т [2].

Данный проект очень важен для Мурманской области, которая уникальна не только своим географическим положением: выходом через незамерзающий Кольский залив в Атлантический и Северный Ледовитый океаны, но и своими месторождениями полезных ископаемых. Немного найдется областей в России, где столько говорилось бы о реализации крупномасштабных проектов. Наибольшие ожидания жители региона связывают с возведением и работой ЦСКМС. Этот проект компании «НОВАТЭК» действительно принесет огромную пользу региону и России.

Прежде всего будет создано более 10 тысяч рабочих мест. Однако для получения работы в ЦСКМС необходимо уже на данном этапе осваивать

востребованные специальности. ЦСКМС позволит развивать кадровый потенциал области, увеличить конкурентоспособность предприятий региона в масштабах России. Сюда будут привлечены инвестиции, которые станут мощным импульсом для развития высокотехнологичных производств страны.

В логистических схемах работы ЦСКМС уже активно задействованы судоходные компании, доставлявшие строительную технику из Сабетты и Архангельска, а также Мурманский морской торговый порт и железная дорога. И масштабы их загрузки будут только возрастать. Безусловно, востребован и научный потенциал Мурманской области. Кроме того, ЦСКМС обеспечит дополнительные налоговые поступления в бюджеты всех уровней.

Впервые за постсоветский период в Мурманской области реализуется столь масштабный проект, имеющий огромное значение не только для Северо-Западного региона, но и для всей России. Наконец, еще один крупномасштабный проект, связанный с «Арктик СПГ-2», будет реализован в Мурманской области и, в частности, в районе бухты Ура, где будет построен перевалочный комплекс СПГ мощностью до 20 млн т. Главный фактор — это доступность бухты 365 дней в году, а также минимизация расходов бюджета на создание портовой инфраструктуры. Планируется установить здесь два судна — хранилища СПГ. Аналогичный перевалочный комплекс должен появиться на Камчатке. Строительство перегрузочного комплекса в Ура-губе позволит повысить эффективность доставки газа в Европу с действующего завода «Ямал СПГ» и с планируемого «Арктик СПГ-2».

В этот перегрузочный комплекс танкеры-газовозы усиленного ледового класса будут выгружать СПГ, а отсюда он будет вывозиться потребителям обычными танкерами-газовозами.

Реализация проектов «НОВАТЭК», а также деятельность крупных промышленных предприятий привела к тому, что потребление электроэнергии в Мурманской области превысило в 2019 г. более 9 млрд кВт·ч, при этом наблюдается положительная динамика роста. Потребление электроэнергии в энергосистеме Мурманской области в сентябре 2019 года составило 962,8 млн кВт·ч, что на 3,3 % больше объема потребления за аналогичный месяц 2018 г. [6].

29 января 2020 г. губернатор Мурманской области Андрей Чибис и председатель правления ПАО «НОВАТЭК» Леонид Михельсон запустили линию электропередач класса напряжения 150 кВ для электроснабжения ЦСКМС [7].

Новая ЛЭП протяженностью более 55 км построена с учетом климатических особенностей Заполярья. При ее строительстве впервые на северо-западе России применен уникальный термостойкий провод отечественного производства с повышенной на 60 % пропускной способностью, антигололедной поверхностью и абсолютной устойчивостью к ветровым нагрузкам,

характерным для районов Крайнего Севера. Это обеспечит максимальную надежность электроснабжения стратегически важного потребителя [7].

Таким образом, ПАО «НОВАТЭК» своими проектами вдохнул свежую струю в экономическое развитие Мурманской области и Ямало-Ненецкого автономного округа. Реализация данных проектов в западном секторе Арктики существенно влияет на динамику потребления энергетических ресурсов, анализ расходования которых показывает масштабные трансформации, прогнозирование которых возможно осуществлять методологией с учетом техноценологического подхода.

Как известно, под эффективностью вообще понимается свойство неживой, биологической или технической системы функционировать с оптимальным (в соответствии с избранным критерием) соотношением интегральных показателей, характеризующих положительный эффект и затраты. Подобное определение дано в [8] как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами.

В эффективном МС-объекте [9, 10] реализуется принцип получения максимального положительного эффекта от функционирования при минимальных затратах на обеспечение данного процесса («минимакс»).

Эффективное расходование ресурсов — преобразование энергии с экономически оправданной эффективностью использования энергоресурсов, обусловленной существующим уровнем развития техники, а также необходимостью соблюдения требований к охране окружающей природной среды. Оценка эффективности расходования энергоресурсов и функционирования МС-объектов может быть оценена по результатам сопоставления двух интегральных показателей, один из которых характеризует положительный эффект, а второй — затраты [9, 10].

Положительный эффект от внедрения методологии прогнозирования в оценке эффективности расходования энергетических ресурсов организационно-технической системы, под которой понимается множество материальных объектов (технических средств и персонала, обеспечивающих их применение по назначению), предназначенных для непосредственного выполнения операции (упорядоченной совокупности протекающих во времени взаимосвязанных действий, направленных на достижение поставленной цели в соответствии с назначением объекта) оценивается интегральным показателем вида:

$$IP_w^{\mathrm{MDC}} = \left(\int_0^\infty W(x)\,\mathrm{d}x \int_0^\infty W^{\mathrm{MDC}}(x)\,\mathrm{d}r \right) \Bigg/ \int_0^\infty W(x)\,\mathrm{d}x;$$
$$IP_w^t = \left(\int_0^\infty W(x)\,\mathrm{d}r \int_0^\infty W^t(x)\,\mathrm{d}x \right) \Bigg/ \int_0^\infty W(x)\,\mathrm{d}x, \qquad (1)$$

где IP_w^{MDC} — целевой интегральный показатель, определяемый на основе методики МС-прогнозирования и процедуры DC-анализа [9]; IP_w^t — текущий интегральный показатель качества, определяемый на t-м временном интервале; $W(x)$ — аппроксимационная кривая, полученная для эмпирических значений энергопотребления (ЭП) объектов на начальном этапе внедрения методики; $W^{\mathrm{MDC}}(x)$ — нижняя граница переменного доверительного интервала, получаемого по итогам методики МС-прогнозирования и уточняющей процедуры DC-анализа; $W^t(x)$ — аппроксимационная кривая, получаемая для модельных значений электропотребления объектов на t-м временном интервале по результатам стандартных процедур [9, 10].

Результирующий интегральный показатель, отражающий степень близости полученной в результате моделирования текущей аппроксимационной кривой рангового параметрического распределения по электропотреблению к нижней границе переменного доверительного интервала (ПДИ) (ограничивающей результаты, полученные по результатам методики МС-прогнозирования и уточняющей процедуры DC-анализа), определяется как отношение интегрального показателя качества, рассчитанного для текущего момента времени, к показателю, соответствующему нижней границе [9, 10]:

$$IP_w = \frac{IP_w^t}{IP_w^{\mathrm{MDC}}} = \frac{\int_0^{\infty} W(x)\,\mathrm{d}x \int_0^{\infty} W^t(x)\,\mathrm{d}x}{\int_0^{\infty} W(x)\,\mathrm{d}x \int_0^{\infty} W^{\mathrm{MDC}}(x)\,\mathrm{d}x}. \qquad (2)$$

Оценка эффективности расходования энергетических ресурсов и функционирования МС-объектов может осуществляться исключительно в границах переменного 95%-ного доверительного интервала. В данном случае смысл оптимизации заключается не в традиционном поиске оптимального значения целевой функции в области варьирования параметров, а в определении оптимальной стратегии изменения параметров, которая минимизирует издержки процесса оценки эффективности расходования энергетических ресурсов на пути движения МС-объекта к состоянию, обеспечивающему эффективность расходования энергетических ресурсов на нижней границе ПДИ (рис. 5) [9, 10].

Подобная задача может быть квалифицирована как шаговая задача динамического программирования с закрепленными левым и правым концами траектории (левый закрепленный конец — по результатам стандартных процедур, правый — нижняя граница переменного доверительного

интервала от результатов, полученных в результате методики МС-прогнозирования и уточняющей процедуры DC-анализа на рис. 5) [9, 10].

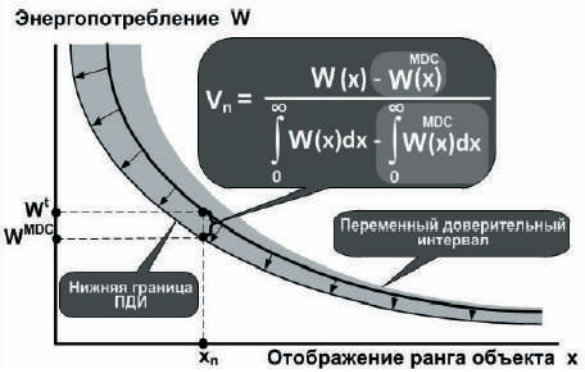


Рис. 5. К понятию эффективности расходования энергетических ресурсов МС-объектом (стрелками показано направление оптимизации)

Исследования, проведенные в [9, 10], позволяют задать оптимальную стратегию управления электропотреблением МС-объекта, заключающуюся в следующем. Управляющее воздействие, направленное на снижение электропотребления, для каждого объекта на каждом временном интервале должно быть поставлено в линейную зависимость от потенциала энергосбережения объекта.

В соответствии с вышеизложенными теоретическими положениями, эффективное снижение расходования энергетических ресурсов представляет собой процедуру анализа ресурсопотребления, заключающуюся в разработке плана и предусматривающую для каждого объекта, входящего в МС-объект, на каждом временном интервале индивидуальные управляющие воздействия, направленные на ресурсосбережение и поставленные в зависимость от значения электропотребления на нижней границе ПДИ. Процедура планирования эффективного расходования энергетических ресурсов может иметь различные стратегии, например: 1) достижение к заданному временному интервалу требуемого уровня снижения ЭП; 2) достижение МС-объектом требуемого потенциала энергосбережения к заданному временному интервалу [9, 10].

Инструментом управления расходования энергетических ресурсов становится критерий эффективности *IP*, являющейся показателем, отражающим последствия решений по управлению ЭП. По результатам проведенных процедур МС-прогнозирования и DC-анализа осуществляется определение норм электропотребления объектов, которые являются одновременно нижней границей ПДИ. Оценка эффективности расходования энергетических ресурсов

заключается в максимальном приближении электропотребления объектов к данной границе с учетом технологического процесса, связанного с выполнением задач ОТС. Постоянный контроль критерия эффективности позволяет устранить ошибки, возникающие при необоснованном занижении либо завышении норм потребления энергетических ресурсов для объектов.

Исходя из всего вышесказанного методика оптимального управления техноценозом [10], предложенная в работах известных ученых Б.И. Кудрина и В.И. Гнатюка, а также С.А. Цырука [11], дополненная методикой МС-прогнозирования в оценке эффективности расходования энергетических ресурсов ОТС, позволят эффективно управлять затратами таких крупных инвестиционных предприятий как ПАО «НОВАТЭК».

Реализация контроля эффективного расходования энергетических ресурсов на данных по энергопотреблению двух крупных промышленных ОТС расположенных в Калининградской и Мурманской областях, произведена после получения прогноза на основе методики МС-прогнозирования и построения трансформированных ранговых параметрических распределений, в результате анализа которого и проведен расчет критерия эффективности IP на каждый временной прогнозный интервал [9].

Расчет интегрального показателя эффективности и его графическое представление (рис. 6) позволяет сделать вывод, что уже на третий год ис-

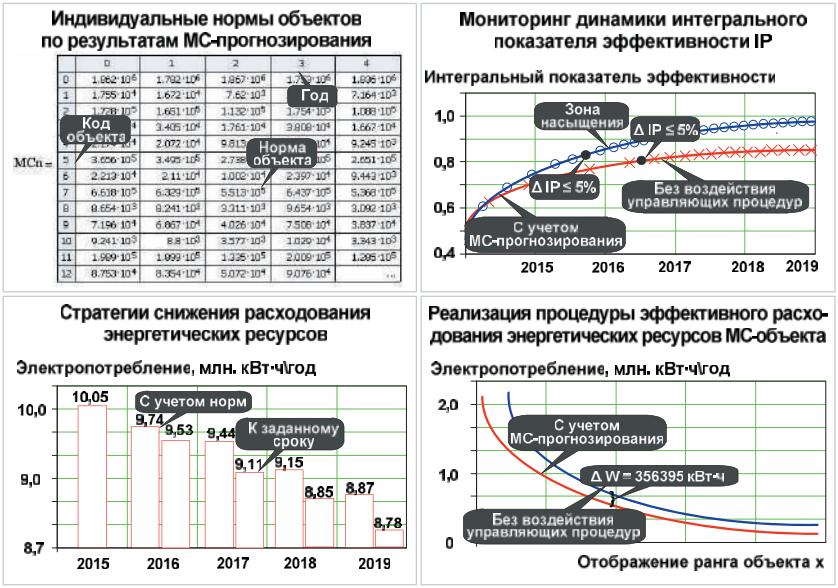


Рис. 6. Оценка эффективности расходования энергетических ресурсов

пользования методики МС-прогнозирования в оценке эффективности расходования энергетических ресурсов, вследствие перехода графика IP в зону насыщения (определяемую как начало точки перегиба кривой из-за снижения прироста критерия эффективности на 5 % во временной интервал, а также отсутствия его дальнейшего роста) необходимо переходить от организационно-технических мероприятий по снижению энергопотребления к мероприятиям по модернизации оборудования.

Таким образом, оценка полученных результатов дает основание утверждать, что в результате контроля *IP* и воздействия на электропотребление МС-объекта коэффициентом управляющего воздействия появляется возможность эффективно расходовать энергетические ресурсы и тем самым выполнять требования по снижению электропотребления без потери качества выполнения задач ОТС. Кроме того, мониторинг *IP* позволяет определить эффективность мер, принимаемых руководством по управлению электропотребления объектов, предъявлять требования к нормированию объектов без срыва задач ОТС.

Анализ качественной оценки эффективности расходования энергетических ресурсов путем мониторинга графиков критерия эффективности показывает, что уже на третий год применения методики МС-прогнозирования необходимо переходить от организационно-технических мероприятий по снижению расходования энергетических ресурсов к мероприятиям по модернизации ОТС.

В результате сравнения установлено, что применение методики МС-прогнозирования расходования энергетических ресурсов обладает существенным преимуществом по сравнению с другими имеющимися. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с помощью методики МС-прогнозирования появляется возможность эффективно расходовать около 10,5 млн руб. в год только по одной региональной ОТС, и в целом более 150 млн руб. за всю инфраструктуру, что дает возможность при целевом своевременном расходовании денежных средств экономить до 30 млн руб. в год с учетом показателей инфляции на сегодняшний день.

Таким образом, методика МС-прогнозирования по сравнению с другими ТЦ-методами обладает существенным преимуществом по экономическим показателям, что в нынешних условиях политики жестких финансовых ограничений очень актуально, кроме того появляется возможность учета и планирования модернизации инфраструктуры с учетом мониторинга критерия эффективности ОТС в целях экономии денежных средств.

Литература

1. **Официальный** сайт ПАО «НОВАТЭК». [Электронный ресурс]. Режим доступа http://www/novatek/ru/busines/yamal-ing (дата обращения 01.05.2020).

2. **Масштабы** и темпы впечатляют. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.mvestnik.ru/economy/masshtaby-i-tempy-vpechatlyayut (дата обращения 31.05.2020).
3. **Центр** строительства крупнотоннажных морских сооружений заработает в 2019 году. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.korabel.ru/news/comments/centra_stroitelstva_krupnotonnazhnyh_morskih_sooruzheniy_zarabotaet_ v_2019_ godu.html (дата обращения 31.05.2020).
4. **Центр** строительства крупнотоннажных морских сооружений − беспрецедентный проект «НОВАТЭК» // Гидротехника. 2018. № 2 (51). С. 42.
5. **Распоряжение** Правительства РФ от 15 июня 2017 г. № 1245-р.
6. **Потребление** электроэнергии в Мурманской области превысило 900 миллионов киловатт. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://b-port.com (дата обращения 31.05.2020).
7. **К стройке** «НОВАТЭК» в Белокаменке подвели ЛЭП. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://vmnews.ru/novosti/2020/01/29/k-stroyke-novateka-v-belokamenke-podveli-lep (дата обращения 28.05.2020).
8. **ГОСТ Р ИСО 9000-2015.** Система менеджмента качества.
9. **Иващенко А.А., Гнатюк В.И., Рученин И.А.** МС-прогнозирование в оценке эффективности организационно-технических систем // Федоровские чтения — 2017. XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 16–18 ноября 2017 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 86–94.
10. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Электронный ресурс]: Изд-во ТГУ «Центр системных исследований», 2005–2019. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/ind.html.
11. **Кудрин Б.И., Цырук С.А.** Электроснабжение, инвестиционное проектирование и закрытие проблемы расчета электрических нагрузок // Электрика. 2006. № 4. С. 3–11.

Д.В. Птицын, ptitsyndv@mail.ru,
Е.В. Птицына, evptitsyna@yandex.ru, ОмГТУ, г. Омск
А.Б. Кувалдин, KuvaldinAB@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ СИСТЕМ ОБОГРЕВА

Применение тока сложной формы в электротехнологии позволяет получать позитивные технологические и энергетические эффекты. Объектом и предметом исследования являются установки с инфракрасными керамическими лампами, гибкие греющие пластины систем обогрева и режимы их работы при питании ТСФ.

Предпосылки применения ТСФ. Согласно [1, 2], в металле могут распространяться электромагнитные волны низкой частоты (геликоны и альфвеновские волны), а в газоразрядной плазме возбуждаться ленгмюровские колебания частотой от 16 до 2000 Гц. Энергоэффективность можно

повысить различными способами. В электротехнологических установках, использующих сверхвысокие частоты (СВЧ ЭТУ) для процессов сушки, плавления, высокотемпературного нагрева диэлектриков, при производстве керамических изделий, огнеупорных, теплоизоляционных материалов, в технологиях обеззараживания материалов, утилизации отходов повышение эффективности возможно за счет разработки адекватных математических моделей и методик моделирования с учетом динамики изменений свойств диэлектриков и взаимосвязи физических процессов при воздействии на диэлектрики гармонических СВЧ электромагнитных колебаний с применением современного программного обеспечения (программного пакета COMSOL Multiphysica).

Математическая модель самосогласованной задачи электродинамики и тепломассопереноса при СВЧ термообработке капиллярно-пористых диэлектриков впервые сформулирована Ю.С. Архангельским в трехмерной постановке и в последующих работах для СВЧ ЭТУ с камерами бегущей волны и лучевого типа апериодического и методического действия [3, 4].

Согласно [5, 6] нагрев диэлектрических материалов в высокочастотных электромагнитных полях обеспечивает высокую скорость нагрева, экологичность (отсутствие продуктов сгорания топлива), простоту управления температурным режимом. Высокочастотный нагрев (1,76÷152,5 МГц) используется в процессах сушки: для порошковых; капиллярных; пористых; капиллярно-пористых и коллоидных материалов (сушка паковок нитей и других изделий легкой промышленности, брикетов сена и т.д.). Основная проблема — это неравномерность температурного поля и снижение качества продукции. Недостатки — сложность и высокая стоимость оборудования.

В [7] установлено повышение эффективности газоразрядных излучателей низкого давления при низкочастотном внешнем воздействии: в люминесцентных лампах низкого давления уменьшается величина анодно-катодного падения потенциала и анодно-катодных потерь мощности, наблюдается рост световой отдачи столба при частоте 200–400 Гц. Подобное изменение световой отдачи столба разряда происходит за счет уширения радиального распределения возбужденных атомов ртути на уровнях 63P, что облегчает выход резонансного излучения. Тепловое движение излучающих (поглощающих) атомов вызывает в линейчатых спектрах газового разряда дополнительное уширение энергетических уровней и соответствующих спектральных линий. Известен способ усиления электромагнитного излучения (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного, радиодиапазонов), основанный на явлении индуцированного испускания.

В работах Г. Меккера и В. Филькенбурга установлено влияние частоты тока на излучение газового разряда [8]. В работах О.А. Попова и С.А. Свитнева доказано повышение эффективности источников ультрафиолетового

излучения на основе разряда низкого давления. Трубчатые бесферритные индукционные ультрафиолетовые лампы, наполненные смесью аргона и ртути целесообразны для обеззараживания воды и воздуха. Они имеют высокий коэффициент полезного действия и высокие мощности 150÷500 Вт [9].

В [10] доказано, что эффективно воздействующими частотами для инфракрасных излучателей являются частоты в диапазоне 102÷103 Гц. В установках со светлыми излучателями электромагнитная составляющая способна повлиять на процесс излучения. При протекании тока в излучателе возникает омический нагрев. Энергия передается электронам, находящимся в тепловом движении. Под действием поля электроны перемещаются со средней дрейфовой скоростью. При неупругих столкновениях происходит термическое возбуждение атомов, которые переходят в состояние с меньшей энергией и испускают фотоны. Имеет место процесс излучения электромагнитных волн. При передаче тепла излучением часть тепловой энергии на поверхности излучателя превращается в энергию электромагнитных колебаний (видимые лучи). Следовательно, внешняя вынуждающая сила (электромагнитная составляющая), наряду с температурной составляющей, в условиях резонансного совпадения частот обусловливает изменение его фотометрических и радиометрических, колориметрических параметров.

В [11] доказано применение инфракрасного нагрева для повышения качества сварных соединений.

На предприятиях широко используются различные электронагреватели. На нефтеперерабатывающих заводах находят применение погружные нагреватели, фланцевые погружные нагреватели, проточные электронагреватели, канальные нагреватели воздуха, мощность которых может составлять более 5 МВт, температура нагрева до 800 ºС [12].

Таким образом, другим направлением повышения энергоэффективности темных и светлых инфракрасных излучателей является применение ТСФ. Однако в литературе не нашло отражение влияние ТСФ на эффективность работы устройств обогрева с инфракрасными керамическими лампами, гибкими греющими пластинами.

Экспериментальные исследования. Проведены с использованием методов теоретических основ электротехники, теории колебаний, теории электрических машин.

Целью работы являются исследования режимов инфракрасных керамических ламп, гибких греющих пластин систем обогрева при изменении параметров электрических режимов (амплитуды и частоты питающего напряжения (тока)) для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов при их совместной работе.

Достижение поставленной цели потребовало решения задач:

– разработать методику исследований на физических моделях установок с инфракрасными керамическими лампами, гибкими греющими пластинами систем обогрева;

– по результатам исследований разработать рекомендации по выбору эффективных режимов работы технологической нагрузки, что необходимо для разработки алгоритмов автоматического управления режимами установок с инфракрасными излучателями, гибкими греющими пластинами систем обогрева.

Представленные в работе результаты получены при сравнении двух электрических режимов: в обычном режиме с питанием током частотой 50 Гц, и в новом режиме при питании ТСФ без постоянной составляющей. В обычном режиме питание нагрузки осуществлялось от однофазного трансформатора 220/110 В с переключением ступеней напряжения без возбуждения А-Х1, А-Х3. Во втором режиме — через однофазный трансформатор и дроссель насыщения. Для регулирования формы питающего напряжения (тока) можно использовать тиристоры и дроссели насыщения. В работе представлены результаты исследований при подключении дросселя.

Объекты исследования. Эксперименты выполнены на физической модели установки с инфракрасными керамическими лампами (черными), используемыми для систем обогрева мощностью 150 Вт и цоколем Е27 [13]. Электронагреватель пластинчатый марки «Keenovo» серии KE 100-220-1-0-3M-101x127. Мощность нагревателя — 100 Вт, напряжение нагревателя — 220 В, 1 — внешний температурный датчик (датчик температуры StarLine PCM ZQ29), 0 — толщина дополнительного теплоизоляционного слоя в мм, 3М — высокотемпературный монтажный клеевой слой на одной из сторон нагревателя с предельной температурой 150 ºС, — размер нагревателя 101×127 мм.

Гибкая греющая пластина имеет трехслойную структуру. Верхний и нижний слой — силикон, армированный стекловолокном. Средний слой — нити из сплава вольфрама и нихрома. Толщина нагревателя 1,5 мм. Отсутствуют поры и пустоты в структуре пластины. Гибкая греющая пластина соответствует требованиям ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования», ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств» [14].

Приборы. Для измерения электрических параметров использован анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060, а также амперметр и вольтметр. Для измерения температуры поверхности излучения использована термопара в комплекте мультиметра EM5512, а также таймер. Для исследования температурных полей инфракрасных излучателей использовали тепловизор типа Testo 885-2. По результатам исследований получены файлы радиометрических термограмм, обработанные с использо-

ванием программного обеспечения, входящего в комплект портативного тепловизора Testo 885-2. Тепловизор визуализировал ИК-излучение (мощность излучения) от каждой точки ИК-излучателя и бесконтактно измерял температуру его поверхности, т.е. пересчитывал мощность излучения в температуру поверхности излучателя.

Результаты исследования индивидуальных показателей работы темных, светлых инфракрасных излучателей, элементов нагревательных гибких и др., а также совместной работы темных и светлых инфракрасных излучателей и силовой нагрузки отражены в работах [15, 16]. Функциональная схема установки для темных излучателей показана на рис. 1. В [15, 16] установлено снижение потерь в силовом трансформаторе в новом режиме работы при переходе на более низкую ступень РПН за счет уменьшения индуктивности его обмоток.

В работе даны результаты исследования режимов работы установок с инфракрасной керамической лампой, гибкой греющей пластиной систем обогрева. Показатели работы в обычном и новом режимах при питании соответственно переменным током частотой 50 Гц и ТСФ без постоянной составляющей даны в табл. 1 и 2. В таблице 3 даны индивидуальные характеристики гибких греющих пластин систем обогрева. В опытах определяли форму и спектральный состав питающего напряжения в сети для исследуемых режимов. Анализ осциллограмм показывает, что перевод установки в режим с питанием ТСФ не вызывает дополнительного увеличения гармоник в питающем напряжении.

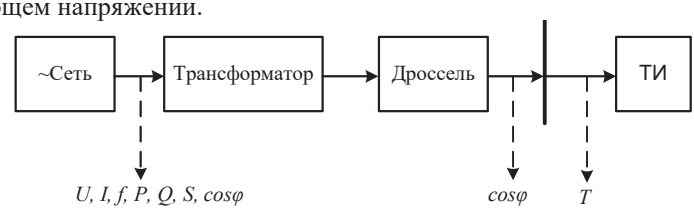


Рис. 1. Функциональная схема установки с темным излучателем

Таблица 1

Показатели работы в сети установки с инфракрасной керамической лампой системы обогрева

Электрический режим	Мощность из сети			cosφ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ·А		
1. **Обычный режим**: переменный ток 50 Гц	0,053	0,105	0,118	0,45	115,0
2. **Новый режим**: ТСФ без постоянной составляющей	0,044	0,021	0,049	0,90	115,0

Таблица 2

Показатели работы в сети установки с гибкой греющей пластиной системы обогрева

Электрический режим	Мощность из сети			cosφ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ·А		
1. **Обычный режим**: переменный ток 50 Гц	0,041	0,098	0,107	0,38	115,0
2. **Новый режим**: ТСФ без постоянной составляющей	0,0347	0,010	0,037	0,94	115,0

Таблица 3

Индивидуальные показатели работы установки с гибкой греющей пластиной системы обогрева

Электрический режим	Мощность из сети			cosφ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ·А		
1. **Обычный режим**: переменный ток 50 Гц	0,024	0,007	0,025	0,96	115,0
2. **Новый режим**: ТСФ без постоянной составляющей	0,024	0,007	0,025	0,96	115,0

Экспериментально установлено, что для установки с инфракрасной керамической лампой при обеспечении в технологическом процессе заданной температуры обогрева появляется возможность улучшения энергетических показателей установки при переходе на более низкую ступень ПБВ (РПН) силового трансформатора. Мощность, потребляемая из сети, составила 0,118 и 0,049 кВ·А соответственно, значения коэффициента мощности — 0,45 и 0,90. Индивидуальные показатели нагрузки в исследуемых режимах: коэффициент мощности 0,95–0,97, а потребляемая мощность 0,39–0,37 кВ·А.

Для установки с гибкой греющей пластиной мощность, потребляемая из сети в сравниваемых режимах, составила 0,118 и 0,049 кВ·А, значения коэффициента мощности — 0,45 и 0,90. За исследуемый интервал 10 минут диапазон нагрева пластины в обычном режиме составил от 23 до 33 ºС, а в новом — от 23 до 36 ºС. Значение коэффициента мощности в сравниваемых режимах составило 0,96.

Выводы

1. Исследованиями установлено, диапазон эффективно воздействующих частот для темных и светлых инфракрасных излучателей составляет 102÷103 Гц. В темных излучателях электромагнитная составляющая влияет на электрон-фононные взаимодействия и на тепловое излучение [15, 16].

2. Экспериментально доказано, что применение ТСФ с эффективно воздействующими частотами 102÷103 Гц позволяет получить положительные эффекты:

- в установках с темными излучателями систем обогрева (элементами нагревательными гибкими ленточными, с инфракрасными керамическими лампами, гибкими греющими пластинами) возможно регулирование скорости подъема температуры;

- возможно обеспечить работу установок с элементами систем обогрева на более низкой ступени ПБВ (РПН) силового трансформатора с более высоким значением коэффициента мощности при снижении индуктивности его обмоток [15, 16].

3. Установлено, что индивидуальные показатели работы установок с элементами нагревательными гибкими ленточными, с инфракрасными керамическими лампами не снижаются при совместном питании в узле нагрузки ТСФ [16].

4. Для получения позитивных технологических и энергетических эффектов целесообразно регулировать форму и амплитуду питающего напряжения (тока). Этот принцип регулирования разумно использовать и при совместном подключении в узле питания установок с темными и светлыми инфракрасными излучателями, элементов нагревательных ленточных гибких и установок с инфракрасными керамическими лампами, гибкими греющими пластинами систем обогрева [15, 16].

Литература

1. **Крэкнелл А., Уонг К.** Поверхность Ферми: пер. с англ. М.: Атомиздат, 1977. 352 с.
2. **Грановский В.Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Изд-во Наука, 1971. 543 с.
3. **Kalganova S., Trigorly S., Zakharov V.** Computer Simulation of Microwave Heat-Treatment of Dielectrics // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO). 2018. P. 1—5.
4. **Trigorly S., Zakharov V.** Mathematical Modeling of the Processes of Microwave Thermal Processing of Extended Dielectrics with the Use of Mobile Radiation Systems // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2018. P. 125—131.

5. **Качанов А.Н.** Моделирование процесса высокочастотного нагрева влажной древесины в вакуумно-диэлектрической сушильной камере // Вестник КрасГАУ. 2016. № 9 (120). С. 113—121.
6. **Качанов А.Н.** Описание электромагнитного поля в плоском конденсаторе при высокочастотном нагреве длинномерных диэлектриков // Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 23—27.
7. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1981. 720 с.
8. **Финкельбург В.** Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
9. **Svitnev S.A., Popov O.A.** Plasma parameters spatial distribution of low-pressure ferrite-free inductive discharge // Light and Engineering. 2011. No 1. P. 79—82.
10. **Птицына Е.В, Птицын Д.В., Кувалдин А.Б.** Влияние электромагнитной составляющей на процессы в темных и светлых инфракрасных излучателях // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). XXVII Междунар конф.: материалы. М.: МЭИ. 2019. С. 494—504.
11. **Борзаковский В.М., Кирпач Н.С.** Инфракрасный нагреватель для сварных соединений. А. с. 1682101 SU, МКП В23К 37/00. заявл. 31.05.89; опубл. 07.10.1991. Бюл. № 37.
12. **Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б.** Элементы нагревательные гибкие ленточные в режиме с питанием током сложной формы // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 36—44.
13. **http://www.farmer-help.ru.** Сайт интернет-магазина сельскохозяйственных товаров (Дата последнего обращения 03.05.2020 г.)
14. **http://www.keenovo.com.** Официальный сайт ООО «Киново Рус» (Дата последнего обращения 03.05.2020 г.)
15. **Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б.** Исследование режимов работы установок с темными и светлыми излучателями при питании током сложной формы // Промышленная энергетика. 2019. № 12. С. 50—56.
16. **Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б.** Режимы совместной работы темных инфракрасных излучателей, элементов нагревательных гибких ленточных и силовой нагрузки // I юбилейные чтения Бойко Ф.К.: материалы междунар. науч.-техн. конф. (21 февраля 2020 г.). Павлодар: С. Торайгырова ун-т, 2020. Т. 1. С. 413—420.

А.Б. Баламетов, balametov.azniie@gmail.com,
Э.Д. Халилов, elmanxalilov2010@mail.ru, АзНИ и ПИ ИЭ, г. Баку,
Т.М. Исаева, taranaisaeva@rambler.ru, АГУНП, г. Баку

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ШУНТИРУЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Исследованы вопросы определения оптимальных значений напряжений и реактивных мощностей компенсирующих устройств ВЛ СВН. Оптимизация режима линии электропередачи сверхвысокого напряжения осуществ-

ляется с целью обеспечения минимальных потерь активной мощности на нагрев проводов и на корону при поддержании напряжения в допустимых пределах. Для оптимального управления компенсирующими устройствами (КУ) ВЛ СВН разработан алгоритм минимизации потерь активной мощности по реактивной мощности ЛЭП СВН с помощью установок УШР и STATCOM. Управление регулирующими и компенсирующими устройствами на основе местных параметров более надежно обеспечено исходной информацией. На примере ВЛ 500 кВ даны соответствующие рекомендации по управлению УШР на основе измерения параметров режима на концах электропередачи.

Регулирование напряжения линий электропередач (ЛЭП) сверхвысоких напряжений (СВН) выполняется в целях: поддержания напряжения в допустимых пределах в линии и оборудовании при различных режимах работы по условиям изоляции, исключения общего коронирования, недопустимых радиопомех и акустических помех; ограничения генерируемой линией зарядной мощности в систему и генераторы в режимах, близких к холостому ходу; обеспечения устойчивости электропередачи при больших нагрузках; обеспечения минимума суммарных потерь активной мощности ЛЭП СВН и сетей более низкого напряжения. Исходя из этого целью регулирования напряжения, кроме обеспечения минимума потерь, является снижение суммарного потребления в ЭС, особенно для режимов совпадения максимума нагрузки и максимальных потерь на корону.

В докладе исследована задача оптимального управления КУ на концах ЛЭП СВН в зависимости от режима передачи. Представлен алгоритм минимизации потерь активной мощности на основе измерения параметров режима на концах электропередачи.

В настоящее время в энергосистемах большое значение придается созданию управляемых или гибких линий электропередач со средствами FACTS [1]. Для контроля режимов напряжения и реактивной мощности в дополнение к генераторам, синхронным и статическим компенсаторам, переключающим реакторам в последние время широко используются управляемые шунтирующие реакторы (УШР) [1].

Создание управляемых шунтирующих реакторов (УШР), позволяющих регулировать напряжения линии с точностью 1–2 % [1, 2], обусловили возможность эффективной реализации систем регулирования ЛЭП СВН. Более точное изменение режима по напряжению линии возможно при совместном использовании регулирующих и КУ.

Управление на основе местных параметров имеет самостоятельное значение для случаев отсутствия верхнего уровня (scada), а также выполняет функции резервной системы управления в случаях получения недостоверной информации об управляющих воздействиях на регулирующие и комп-

енсирующие устройства подстанции и при отсутствии этой информации по техническим причинам.

Местная система управления, в которой используется только информация о потоках активной мощности, потерях на корону в примыкающих к данной подстанции участках ВЛ, и регулирование напряжения осуществляется по упрощенной модели ЛЭП.

В [6] рассматривались методики, алгоритмы и программы оптимизации режима работы ЛЭП СВН путем регулирования реактивной мощности на подстанциях КУ. Наличие в схеме сети ЛЭП СВН, трансформаторов продольно-поперечного регулирования и шунтирующих сетей более низкого напряжения требует координации их действий с целью получения оптимального допустимого режима.

Уровень напряжения на передающем конце линии можно устанавливать генераторами ЭС, а также автотрансформаторами с РПН.

В настоящее время объекты FACTS, являясь одной из наиболее перспективных технологий электрических сетей, образуют комплексную техническую и информационную систему для автоматического контроля параметров линии электропередачи [1, 2]. FACTS первого поколения охватывают управляемый реактор SCR, последовательно управляемый конденсатор SCR, фазосдвигающий трансформатор и т. д. FACTS второго поколения включает средства, которые обеспечивают регулирование параметров режима на основе полностью управляемой силовой электроники. Средства FACTS этого типа осуществляют векторное регулирование, т.е. регулируют как фазу вектора напряжения, так и модуль вектора, и имеют новое качество регулирования. Такие средства включают в себя синхронный статический компенсатор.

Повышение экономичности работы отдельных ВЛ путем регулирования напряжения достаточно изучено и широко освещено. Определению целесообразных пределов регулирования уровня напряжения отдельных ЛЭП СВН посвящен ряд исследований [3–6]. Оптимизация режима ВЛ по напряжению с учетом потерь мощности на корону и нагрев проводов рассматривалась в работах [7–9].

Предложен способ [5] регулирования напряжения в отдельной ЛЭП СВН, основанный на сравнении приращений потерь мощности на корону и нагрев проводов по напряжению:

$$\frac{d\Delta P}{dU} = \frac{d\Delta P_{\text{н}}}{dU} + \frac{d\Delta P_{\text{к}}}{dU} = 0 \ .$$

По этому выражению можно определить направление изменения напряжения линии электропередачи, снижающее суммарные потери.

Разработан метод для выявления оптимальной соразмерности потерь на корону и потерь на нагрев проводов для определения закона управления напряжением ВЛ СВН. Оптимальная соразмерность потерь на корону и нагрев проводов, выраженная в долях от суммарных потерь для конкретной ВЛ 500 кВ, рассмотрена в работе [6]; для хорошей погоды и сухого снега для потерь на корону она составляет 19—20 %, на нагрев проводов — 80—81 %, а при дожде — 32—35 % и 67—68 %.

Наибольший эффект от оптимального управления можно получить при SCADA путем комплексного управления регулирующими и компенсирующими устройствами ЭЭС.

Оптимальное напряжение ВЛ СВН с сосредоточенными параметрами по π-модели по U_1 и Q_2 (УШР). Целевая функция при оптимизации режима ВЛ СВН в виде суммы потерь мощности на нагрев проводов $\Delta P_{\text{н}}$ и на корону $\Delta P_{\text{к}}$:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{к}} . \tag{1}$$

Ограничения на наибольшие напряжения ВЛ и электрооборудования подстанций

$$U_{i\min} \le U_i \le U_{i\max}, \tag{2}$$

где $U_{\min}$, $U_{\max}$ — наименьшее и наибольшее допустимые напряжения линии и оборудования электропередачи.

Для потерь на нагрев проводов имеем

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{\left(P_2 + 0,5G_k U_2^2 + GrU_2^2\right)^2 + \left(-Q_2 - Qr + 0,5B_{\text{c}}U_2^2\right)}{U_2^2} R. \tag{3}$$

Для потерь на корону проводов имеем

$$\Delta P_{\text{к}} = GrU_2^2 + 0,5G_k\left(U_1^2 + U_2^2\right);$$

$$I_{21}^2 = \frac{P_{21}^2 + Q_{21}^2}{U_2^2}, \quad \Delta P_{\text{н}} = I_{21}^2 R,$$

где P_2, Q_2, U_2 — соответственно активная, реактивная мощности и напряжение конца π-образной схемы замещения линии; R — фактическое активное сопротивление проводов ВЛ.

Приравнивая нулю частную производную суммарных потерь ВЛ по напряжению для оптимального напряжения конца линии, имеем

$$U_2 = U_{\text{н}} \sqrt[(\rho+2)]{\frac{4[(P_2^2 - g^2U^4) + Q'^2]R}{\rho(1+k_U^{\rho})\Delta P_k U_{\text{н}}}}. \qquad (4)$$

Здесь $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение ВЛ; P_2 — активная мощность в конце ВЛ; R — активное сопротивление; $\Delta P_k = L\,\Delta P_{k0}$; L — длина ВЛ.

Для практических расчетов по формуле (4) оптимальное напряжение ВЛ СВН можно определить расчетом режима линии при заданном напряжении в начале и конце линии и перетоке активной мощности. В точке оптимума суммарных потерь в ВЛ СВН потери на корону составляют 0,5ρ потерь на нагрев проводов. При этом отметим, что значение ρ = 4 обычно соответствует характеристике потерь для плохой погоды [3, 6]. Значение ρ = 6 соответствует среднегодовым потерям, при этом в точке оптимума потери на корону составляют 1/3 потерь на нагрев проводов. Значение ρ = 8 соответствует хорошей погоде, при этом в точке оптимума потери на корону составляют 1/4 потерь на нагрев проводов.

Определение оптимальных U и Q по уравнениям линии с распределенными параметрами и учете короны в виде характеристики от напряжения ρ-й степени требует относительно сложного алгоритма оптимизации с использованием методов нелинейного программирования.

Оптимальный перепад напряжения ЛЭП СВН зависит от конструкции фазы, длины линии, передаваемой активной мощности и уровня потерь на корону. В общем виде зависимость для оптимального перепада напряжения можно представить в виде

$$l_{*\text{э}} = \frac{1}{L}\int_0^L \left(\frac{U_x}{U_2}\right)^{\rho} \mathrm{d}x = \psi\ \{R_0,\ P_2,\ \Delta P_{\text{к}},\ L\}\ .$$

При расчете потерь мощности в ВЛ обычно активное сопротивление r_0 принимается постоянным. В действительности сопротивление провода зависит от его температуры. В частности, температура проводов ЛЭП определяется нагревом протекающего по ним тока и условиями охлаждения в окружающей среде. Поэтому в оптимизационных расчетах режимов ЛЭП необходимо учитывать уточненные значения активного сопротивления линии с учетом температуры. Определены выражения для оптимального перепада напряжения ЛЭП СВН путем аппроксимации результатов, полученных по полной модели оптимизации ЛЭП СВН [8] в зависимости от передаваемой активной мощности, длины линии, уровня удельных потерь мощности

на корону и погонного активного сопротивления линии полиномом второго степени. Значение $l^*_э$ растет с ростом длины линии и уменьшается с ростом передаваемой активной мощности линии, значения удельных потерь на корону и погонного активного сопротивления линии.

Зависимость (4) для оптимальных перепадов напряжения получена из условия достижения минимальных потерь активной мощности без учета ограничения на напряжение линии. Для ЛЭП СВН необходимо учитывать ограничения по длительно допустимому напряжению проводов ВЛ $U_{двл}$ из условий исключения общего коронирования и недопустимых радиопомех.

Для более точного моделирования режима работы линия передачи представлена в виде элементов, соединенных цепью. Эквивалентная схема состоит из секций π-модели, связанных цепью [7—9] (рис. 1).

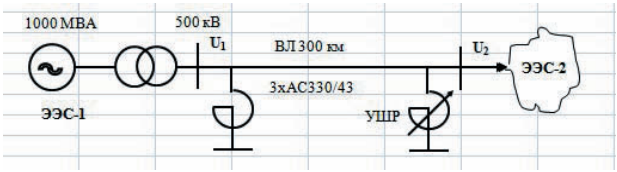


Рис. 1. Схема участка ЛЭП с реакторами

Полный алгоритм оптимизации режима ЛЭП СВН по уравнениям линии в гиперболических функциях с учетом характеристики потерь мощности на корону от напряжения и распределения напряжения вдоль линии является относительно сложным, трудоемким и требует значительных затрат времени ЭВМ. При выборе алгоритмов регулирования напряжения ЛЭП СВН необходимо учитывать информационную обеспеченность задачи оптимизации. Систему управления на основе местных параметров можно использовать как самостоятельно, так и в качестве резервной системы управления. Поэтому задача управления регулирующими и компенсирующими устройствами на основе местных параметров имеет важное значение.

Потери мощности на корону ЛЭП СВН при условиях плохой погоды соизмеримы с единичной мощностью генератора электростанции, для их покрытия требуются дополнительные мощности. Исходя из этого, целью регулирования напряжения, кроме обеспечения минимума потерь, является снижение суммарного потребления в ЭС, особенно для режимов совпадения максимума нагрузки и максимальных потерь на корону.

Управление на основе местных параметров имеет самостоятельное значение для случаев отсутствия верхнего уровня АСДУ, а также выполняет функции резервной системы управления в случаях получения недостоверной информации об управляющих воздействиях на регулиру-

ющие и компенсирующие устройства подстанции и линии при отсутствии этой информации по техническим причинам.

Пример. Параметры ВЛ 500 кВ и конструкция фазы: марка провода 3*АС-330/43, шаг расщепления 0,4 м, r_0 = 0,029 Ом/км, x_0 = 0,299 Ом/км, b_0 = 3,74·10^{-6} См/км, удельные потери на корону, соответствующие хорошей погоде, ΔP_{k0} = 4 Вт/м, показатель степени для зависимости потерь на корону ρ = 5. Длина ВЛ составляет 300 км. В таблице 1 отражены зависимости оптимального перепада напряжения от активной мощности и удельных потерь на корону.

Таблица 1

Результаты расчета режимов 500 кВ

P_2, МВт	Q_2, Мвар	U_1, кВ	ΔP_{sum}, МВт	ΔP_n, МВт	ΔP_k, МВт	U_1/U_2, о.е.
900	55	524,984	29,15	27,799	1,363	1,0499
700	120	522,909	18,149	16,778	1,3708	1,045
500	125	513,225	10,0038	8,683	1,32	1,026
300	100	500,638	4,583	3,333	1,249	1,0012

Зависимость оптимального перепада напряжения ВЛ 500 кВ от активной мощности приведена на рис. 2.

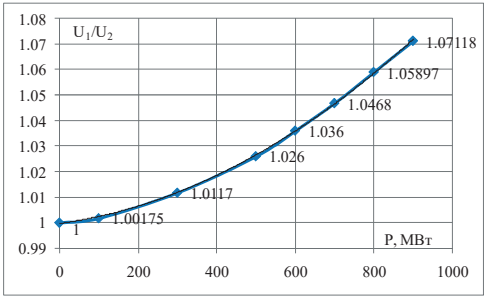


Рис. 2. Кривая зависимости оптимального перепада напряжения ВЛ 500 кВ от активной мощности

Результаты расчетов показывают, что оптимальное напряжение в начале линии в зависимости от длины линии, величины передаваемой мощности, удельных потерь на корону на 0—5 % больше номинального напряжения конца линии, т.е. оптимальному режиму ВЛ длиной 300 км соответствует режим с перепадом напряжения равном 1—1,05.

Обычно эквивалентные характеристики приемной ЭЭС неизвестны. Для этого необходимо рассматривать полную схему ЭЭС с ЛЭП СВН.

Характеристики можно получить из экспериментальных данных в процессе управления по измерениям на основе потоков в примыкающих к узлу участков.

УШР можно установить на положение, соответствующее оптимальному режиму ЛЭП СВН по минимуму потерь активной мощности. К примеру, автоматическим регулированием УШР можно добиваться поддержания напряжения в узле, близким к 500 кВ.

Зависимость оптимального напряжения ВЛ 500 кВ от реактивной мощности приведена на рис. 3.

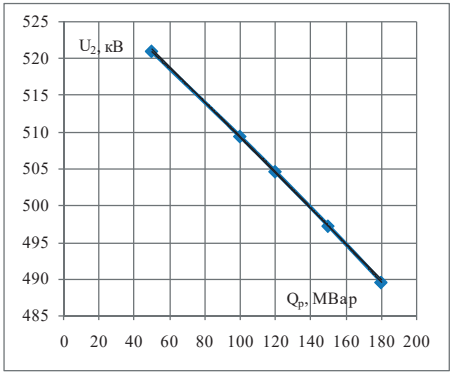


Рис. 3. Зависимости оптимального напряжения ВЛ от реактивной мощности УШР

На рисунке 4 приведены графики зависимости потерь активной мощности ВЛ 500 кВ от реактивной мощности.

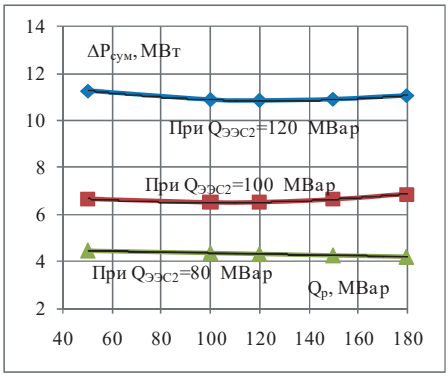


Рис. 4. Зависимости потерь активной мощности от реактивной мощности

В процессе эксплуатации ЛЭП СВН по результатам слежения за параметрами режима можно построить эквивалентную характеристику приемной ЭЭС в виде регрессионной зависимости $Q_{\text{ekv.pr.EES}} = b_0 + b_1 U$, и использовать ее для управления.

Оптимальные значения напряжения и реактивной мощности ВЛ СВН в зависимости от величины передаваемой мощности, погодных условий трассы ВЛ меняются в пределах 1− 1,05.

Величина оптимального перепада напряжения растет с ростом длины ЛЭП, передаваемой мощности, уровня удельных потерь на корону.

Применение УШР в ЛЭП СВН наряду с известными положительными эффектами позволяет снижать потери активной мощности и повышает экономичность эксплуатации.

Литература

1. **Александров Г.Н.** К методике расчета управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа // Электричество. 1994. № 6.
2. **Кочкин В.И.** Управляемые шунтирующие реакторы для линий электропередачи высокого напряжения // Энергетик. 1999. № 5.
3. **Баламетов А.Б.** Закономерности оптимального регулирования напряжения и реактивной мощности ВЛ СВН // Электричество. 1998. № 9.
4. **Тамазов А.И.** Корона на проводах воздушных линий переменного тока. М.: Спутник, 2002.
5. **Астахов Ю.Н., Москаленко В.В.** Закон регулирования напряжения управляемой ЛЭП СВН // Сб. научных трудов: Управление режимами электропередач. Кишинев: Штиинца, 1988.
6. **Баламетов А.Б.** Коронирование проводов ВЛ СВН. Моделирование в установившихся режимах. Монография. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 310 с.
7. **Balametov A.B., Halilov E.D.** Power flow and thermal balance equations for power system simulation // The 13th International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE-2018), 17−20 October Nakhchivan, Azerbaijan. P. 17—20.
8. **Balametov A., Khalilov E., Isaeva T.** On the increasing of accuracy of power transmission lines modes mathematical modeling // The 6th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications — COIA 2018. 11−13 July 2018. Baku, Azerbaijan. Volume II. P. 98—100.
9. **Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М.** Специализированная система мониторинга электрических параметров воздушных линий переменного тока // XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 103—105.

Е.Г. Андреева, leandr02@yandex.ru,
И.А. Семина, semina_ia@mail.ru, ОмГТУ, г. Омск

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ОТКРЫТОГО ТИПА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И УПРАВЛЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЯМИ

Рассматриваются проблемы исследования, моделирования и построения расчетных моделей воздействия электрического и магнитного полей на проводящие элементы наножидкостей — молекулы, капли, порошкообразные частицы металлов.

Магнитные системы открытого типа [1, 2] широко используются в промышленности для воздействия и управления магнитоуправляемыми наножидкостями [1, 2, 3].

К наножидкостям относят ультрадисперсные системы с жидкой дисперсионной средой (эмульсии, гели и т.п.). В зависимости от размера молекул (до 1 нм) вещества она носит название микро- или наноэмульсии. В качестве наножидкостей для получения высокодисперсных порошков стабильных металлов также используют золи, в которых распределены твердые наночастицы, или коллоидные растворы наночастиц.

К основным свойствам наножидкостей относят теплопроводность. Тепловые наножидкости (жидкости с теплоотдачей до 60 % по объему) способны эффективно переносить тепловую энергию с минимальными потерями. Добавление всего лишь 5 объемных процентов наночастиц оксида меди увеличивает эффективную теплопроводность воды на 20 %, а небольшой процент углеродных нанотрубок в теплонесущей жидкости изменяет ее теплопроводность в несколько раз [1—3].

Теплопроводность наночастиц существенно повышает теплообмен наножидкостей. В таблице приведены значения теплопроводности при комнатной температуре для некоторых материалов, используемых при приготовлении наножидкостей.

Таблица 1

Тепловые свойства наноматериалов

Название материала	Теплопроводность k, Вт/(м·К)
Глинозем (окись алюминия, Al_2O_3)	20
CuO (окись меди)	40
Si C (карбид кремния)	120
Au (золото)	317
Cu (медь)	401
Углеродные нанотрубки	~3000
Вода	0,55
Масло машинное	0,145
Этиленгликоль	0,2

Из таблицы 1 видно, что теплопроводность углеродных нанотрубок выше, чем у металлов, что может привести к значительным изменениям теплофизических свойств наножидкостей и усилению теплообменных процессов [6].

Возможно воздействовать на наножидкости с помощью электрического поля (ЭП) или электролиза. Электролиз биологических клеток — это полный распад клеточных мембран, обусловленный критическим уровнем электрических полей воздействия на биологическую клетку. При этом критическими можно считать электрические поля промышленной частоты 50 Гц с пределом напряженности 25 кВ/м и критическим временем воздействия 10 минут, менее безопасен уровень ЭП с напряженностью 5 кВ/м и критическим временем воздействия 12 часов.

Воздействие электрического поля на наножидкости можно проиллюстрировать на примере из области медицины. Здесь исследуют воздействие на наножидкость электрическим полем внутри микроканала микрофлюидных устройств.

При моделировании электрических полей наножидкостей внутри микроканала микрофлюидных устройств применяется численный метод — метод конечных элементов (МКЭ, FEM) [1, 2].

Электрический потенциал φ через канал воздействия внешним электрическим полем можно оценить при решении уравнения Пуассона с граничными условиями первого и второго рода:

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}. \qquad (1)$$

Оно используется для оценки объемной плотности зарядов ρ электрического поля внутри микроканала микрофлюидных устройств [3—5].

При расчете электрического поля внутри микроканала микрофлюидных устройств можно принять объемную плотность зарядов ρ равной нулю, и тогда переходим к уравнению Лапласа

$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0 \qquad (2)$$

с нулевыми граничными условиями.

При расчетах распределения электрических зарядов внутри микроканала микрофлюидных устройств необходимо учитывать параллельную поверхность электрода, что требует учета граничных условий. Кроме того, материал «твердое тело—жидкость» имеет электрический двойной слой (EDL), характеризующийся толщиной и длиной, который оказывает существенное влияние на поведение ионных проводников. Эти факторы приводят к

появлению ошибки при использовании выражения (2), которое становится все более критичным, поскольку размеры микроканала уменьшаются, и это общая тенденция в микрофлюидике и нанофлюидике [3–5].

Результаты анализа электрического поля наножидкостей внутри микроканала показывают, что движение клеток внутри микроканала не является равномерным. Это обусловлено тем, что клетки прилипают к стенкам канала при миграции через микроканал.

Примером воздействия на наножидкость магнитного поля является сфера жилищно-коммунального хозяйства, где широко распространена экономичная и энергоэффективная магнитная обработка жидкостей. Это воздействие на жидкости постоянным магнитным полем, при котором растворенные в ней ионы кальция, кремния и магния теряют свою способность к солеобразованию (накипи) на сорбирующих поверхностях. При этом нерастворимые соли находятся во взвешенном состоянии, а уже существующие отложения разрыхляются и легко удаляются [3–5].

Магнитоуправляемые наножидкости применяются при изготовлении деталей с напылением металлов, вакуумной сушке, в вакуумных печах, в производстве полупроводниковых приборов. Дисперсная фаза магнитных наножидкостей (эмульсии-теплоносители) представляют собой распределенные в объеме дисперсионной среды однодоменные магниты. Под воздействием магнитного поля наночастицы выстраиваются по направлению поля, и жидкость намагничивается. Наножидкости, удерживаемые магнитным полем, активно используют для герметизации вводов, так как они позволяют обеспечить абсолютную герметизацию вакуумных устройств.

В настоящей работе приведен расчет энергоэффективной магнитной системы открытого типа, используемой для магнитной обработки эмульсии, относящейся к магнитоуправляемой наножидкости [4, 5].

Физический эксперимент проводился на экспериментальной установке. Питание экспериментальной установки при исследовании опытного образца осуществлялось от однофазной сети постоянного напряжения 24 В. Опытный образец представлял собой магнитную систему открытого типа [4, 5]. Магнитная система открытого типа изготовлена из электротехнической стали диаметром 90 мм и высотой 25 мм с медной обмоткой, где число ампер-витков составляет Iw = 2225 А (рис. 1).

При экспериментальном исследовании магнитной системы открытого типа с габаритными размерами, представленными на рис. 1, измерительные приборы фиксировали следующие показания: постоянный ток в обмотке I = = 0,089 А; сопротивление R = 160 Ом; напряжение U = 14,26 В.

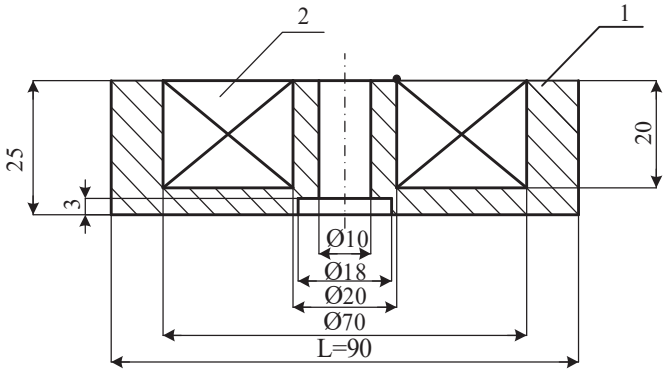


Рис. 1. Магнитная система открытого типа: *1* — обмотка; *2* — магнитопровод

В результате расчета магнитного поля методом конечных элементов в программе ELCUT (профессиональная версия) получены графики распределения составляющих магнитной индукции (осевой Br и радиальной Bz) магнитной системы открытого типа вдоль оси *L* (рис. 2).

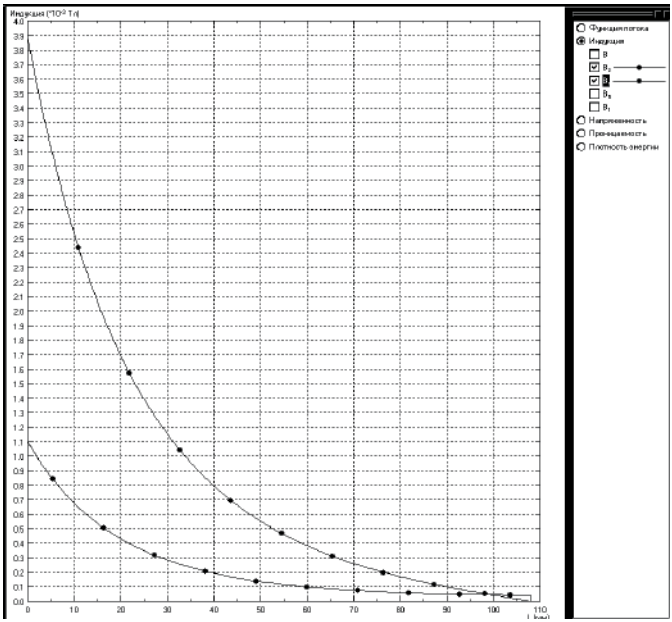


Рис. 2. График распределения составляющих магнитной индукции (осевой Br и радиальной Bz) магнитной системы открытого типа

Максимальное значение осевой составляющей магнитной индукции Br = 0,039 Тл, а максимальное значение радиальной составляющей Bz = = 0,011 Тл. Таким образом, распределение модуля вектора магнитной индукции магнитной системы открытого изменяется с максимальным значением B_{max} = 0,11136 Тл [1, 2].

Резюме.

1. Анализ воздействия на наножидкости электрическим полем показал, что для создания электрического поля требуется высокое напряжение (от 700 до 900 В), при этом движение клеток внутри микроканала не является равномерным, так как клетки скапливаются у стенок канала при миграции через микроканал. Однако такой метод воздействия на наножидкость используется в некоторых технологических процессах производств.

2. Исследуемая магнитная система открытого типа не требует высоких напряжений, в результате такую систему можно считать энергоэффективной. При воздействии на наножидкости магнитным полем, созданным магнитной системой открытого типа, при применении различных форм этих систем создаются магнитные поля локализованной формы с величиной магнитной индукции *B* от 20 до 1,2 мТл, что позволяет управлять параметрами наножидкостей.

3. Проведенный анализ опубликованных материалов по данной тематике показал, что исследование, моделирование и построение расчетных моделей воздействия электрического, магнитного, электромагнитного полей на проводящие элементы наножидкостей (молекулы, капли, порошкообразные частицы металлов) в определенной степени зависят от магнитных (μ) и электрических (ε) свойств наножидкостей, и принятых ограничений на постановку полевой задачи, позволяющих выбрать структуру полевого воздействия (магнитного, электрического или электромагнитного).

Литература

1. **Андреева Е.Г., Беляев П.В., Семина И.А.** Программа расчета магнитного поля системы открытого типа // Навигатор в мире науки и образования. 2012. № 4–7 (20–23). С. 165—166.
2. **Андреева Е. Г., Кульбака М.Ю., Семина И.А.** Исследование магнитного поля системы открытого типа со стальным и медным экранами при помощи комплекса программ ELCUT // Физико-математическое моделирование систем: материалы VII Междунар. семинара. Воронеж, 2011. Ч. 2. С. 216—219.
3. **Eijkel J. C. T. & van den Berg A.** Nanofluidics: what is it and what can we expect from it? // Microfluidics and nanofluidics. 2005. 1(3). P. 249—267. https://doi.org/10.1007/s10404-004-0012-9.
4. **Matthews R., Likos C.N**. Influence of Fluctuating Membranes on Self-Assembly of Patchy Colloids. Phys Rev Lett. 2012. 109(17):178302.
5. **A micro** fluidic approach for high efficiency extraction of low molecular weight RNA / P. Vulto, G. Dame, U. Maier et al. R. Soc. Chem. 2010; 10:610616.

6. **Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В.** Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 1. С. 1—15.

А.Б. Кувалдин, a.kuvaldin2013@yandex.ru,
М.А. Федин, Fedinma@mail.ru,
А.О. Кулешов, KuleschovAO@yandex.ru,
С.С. Кондрашов, sskondrashov@yandex.ru,
НИУ «МЭИ», Москва,
Б. Чень, chenbai@hopewind.com,
Shenzhen Hopewind electric, КНР

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОПОРОШКОВ

Нитрид бора и материалы на его основе занимают заметное место в ряду важнейших инструментальных материалов и являются основой многих современных технологий. Он нашел широкое применение в реакциях промышленного органического синтеза при крекинге нефти, в изделиях высокотемпературной техники, в производстве полупроводников, получении высокочистых металлов, газовых диэлектриков, как средство для тушения возгораний и в других областях. Из нитрида бора изготовляют высокоогнеупорные материалы, проявляющие как полупроводниковые, так и диэлектрические свойства.

Гексагональный нитрид бора используется все чаще из-за его уникальной комбинации свойств, которые включают низкую плотность (2,27 г/см^3 теоретической плотности), высокую температурную стабильность (температуру плавления около 2600 °С), химическую инертность (коррозионную стойкость к кислотам и расплавленным металлам), стабильность на воздухе до 1000 °С (в атмосфере аргона до 2200 °С и азота до 2400 °С), устойчивость к тепловому удару, легкую обрабатываемость форм горячего прессования, превосходный электроизоляционный характер, а также очень высокую теплопроводность. Как тепловой проводник BN ранжируется с нержавеющей сталью при криогенных температурах и с оксидом бериллия BeO при повышенных условиях; выше 700 °С теплопроводность гексагонального нитрида бора превышает токсичный BeO [5]. Потребление нитрида бора в мире растет с каждым годом, поэтому появляется необходимость разработки способа его производства с низкой себестоимостью [2]. На рисунке 1 приведены возможные пути получения нитрида бора.

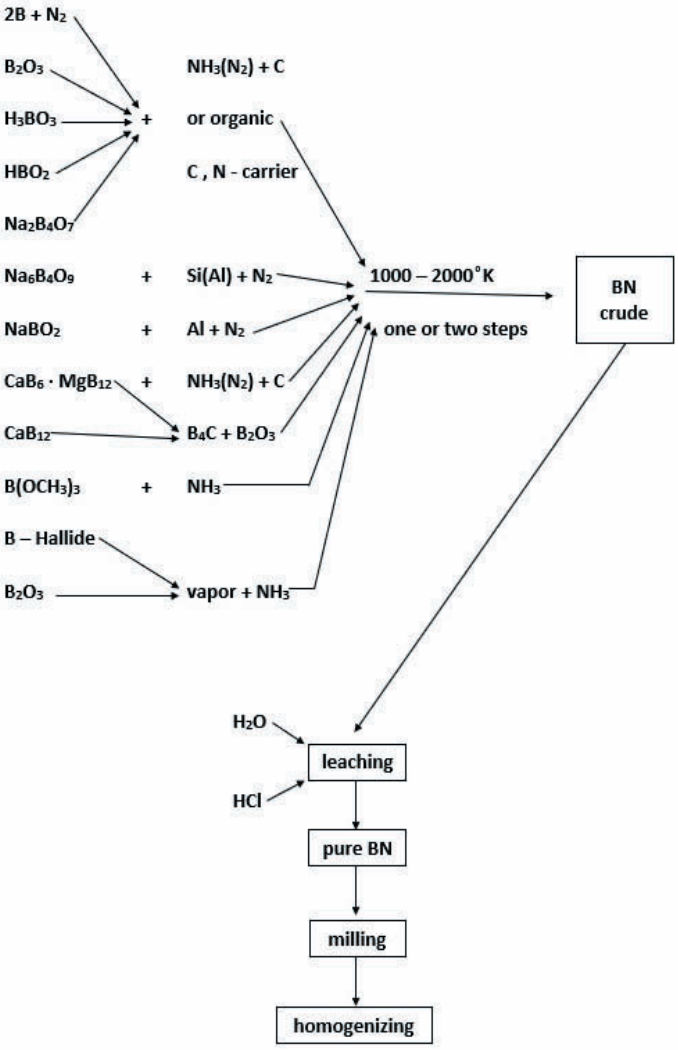


Рис. 1. Возможные пути получения нитрида бора

Развитием известных методов получения графитоподобного нитрида бора является карбамидный процесс, описываемый формулой $(NH2)_2CO+H_3BO_3+N_2=NB+CO_2+H_2$. В таком процессе азотирование шихты проводят при температурах 1810÷1850 °С, что обеспечивает

возможность получения графитоподобного нитрида бора с приемлемой себестоимостью [1—3]. Преимущества индукционного нагрева позволяют осуществлять нагрев исходной шихты в защитной атмосфере при высоких температурах. Повышенные требования к качеству нагрева делают актуальной задачу оптимизации основных конструктивных параметров индукционных нагревателей [4]. Для решения подобной задачи необходимо применить методы математического моделирования для расчета и исследования энергетических показателей установки индукционного нагрева.

Для равномерного нагрева исходной шихты целесообразно применить электротехнологическую установку с индукционной тигельной печью с графитовым тиглем, которая позволит обеспечить нагрев исходной шихты до заданной температуры. Из-за высокой электрической проводимости и высокого коэффициента черноты графит хорошо подходит в качестве материала тигля, который способен работать при температуре около 2000 °С. Синтезируемую шихту помещают в графитовый тигель и нагревают в среде азота. Наличие азота позволит сохранить стойкость графитового тигля при высокой температуре. Нагрев шихты осуществляется за счет конвекции горячих потоков газа и излучением от внутренней поверхности тигля.

Нагрев шихты для получения нитрида бора является многостадийным и осуществляется по следующему принципу: 1 — нагрев до температуры 1300 °С, когда начинается разложение исходных веществ на ионы; 2 — выдержка при температуре 1300 °С; 3 — нагрев до температуры 1600 °С, когда идет процесс разложения молекул исходных веществ, начинается образование новых молекул, происходит обильное выделение аммиака, углерода; 4 — выдержка при температуре 1600 °С; 5 — нагрев до температуры 1800 °С, когда начинается образование кристаллов нитрида бора; 6 — выдержка при температуре 1800 °С, когда происходит образование молекул нитрида бора.

Разработка высокотемпературных установок на базе индукционных тигельных печей с проводящим тиглем для проведения высокочастотного синтеза нитридных материалов требует детального описания и моделирования электромагнитных и тепловых полей. При создании электротепловых моделей индукционных нагревателей особое внимание уделяется разработке методики электрического расчета. Применение ЭВМ для моделирования высокотемпературных индукционных установок позволяет создавать комплексные модели, учитывающие неразрывную связь электромагнитных и тепловых процессов в нелинейных и многомерных областях загрузки.

Для расчета интегральных параметров системы «индуктор — проводящий тигель» целесообразно применить метод конечных элементов, реализованный в пакете *ELCUT*. Данный пакет позволяет проводить

электрический и тепловой расчеты интегральных параметров с учетом изменения теплофизических свойств материала тигля (графита) и исходной шихты [4, 5].

В качестве примера выполнен расчет индукционного нагревателя с графитовым тиглем. Установка питается от высокочастотного транзисторного преобразователя мощностью 25 кВт с рабочей частотой 20 кГц.

На рисунке 2 в качестве примера показана расчетная область для решения электромагнитной задачи, поделенная на конечные элементы. На оси симметрии (граница 1 на рис. 2) задается граничное условие Неймана $dH/dr = 0$ (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешних границах (граница 2) — нулевое граничное условие Неймана $A = 0$ (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т.е. поле локализовано в пределах расчетной области).

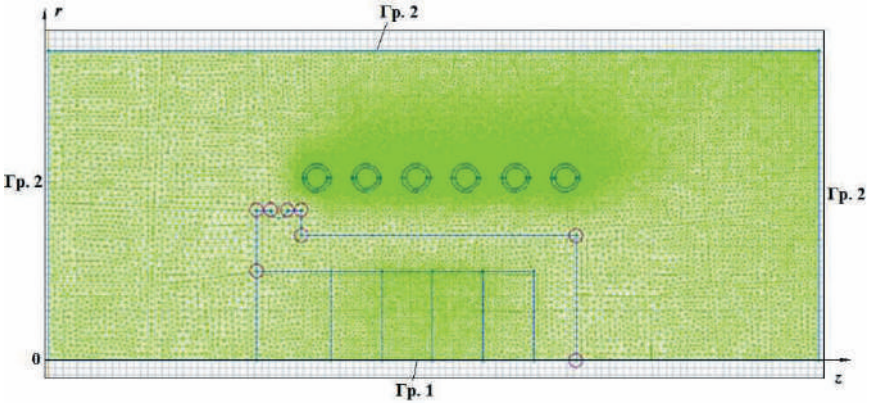


Рис. 2. Расчетная область в пакете *ELCUT*

Разработанная в *ELCUT* модель позволяет провести электрический расчет и дает количественную картину распределения электромагнитного поля и значения интегральных параметров индукционного нагревателя, характеризующего его как потребителя электрической энергии, а именно позволяет определить частоту тока и мощность источника питания и обеспечить согласование индуктора с источником питания [6, 7].

Температурный анализ играет заметную роль при проектировании многих механических и электромагнитных систем. Как правило, интерес представляют распределение температуры температурного градиента, теплового потока и потерь тепла. Используя модуль нестационарной теплопередачи, можно рассчитать тепловой переходный процесс с постоянными во времени граничными условиями.

Для линейных задач: в осесимметричном случае

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\text{Л}(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\text{Л}(T)r\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-q(T)-c(T)p\frac{\partial T}{\partial t},$$

где T — температура; t — время; $\lambda_{x(y,r,z)}$ — компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке); $\lambda(T)$ — теплопроводность как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке); $q(T)$ — удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке константа, в нелинейной постановке — задаваемая кубическим сплайном функция температуры; $c(T)$ — удельная теплоемкость, в нелинейном случае это функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами; ρ — плотность.

На рисунке 3 приведена картина распределения теплового поля.

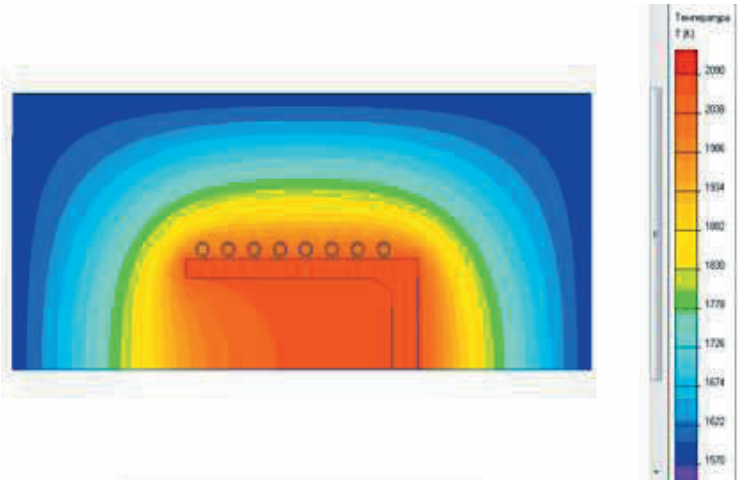


Рис. 3. Картина распределения теплового поля

На основании данных теоретических исследований, полученных в *ELCUT*, разработана структурная модель (рис. 4) индукционного нагревателя в пакете *Simulink/MatLab*. Данная модель учитывает изменения электро- и теплофизических параметров проводящего тигля и синтезируемой шихты. С ее помощью можно рассчитать постоянную времени нагрева сходной шихты в высокотемпературном индукционном нагревателе, а также мощность индукционного нагревателя на каждом из описанных этапов нагрева.

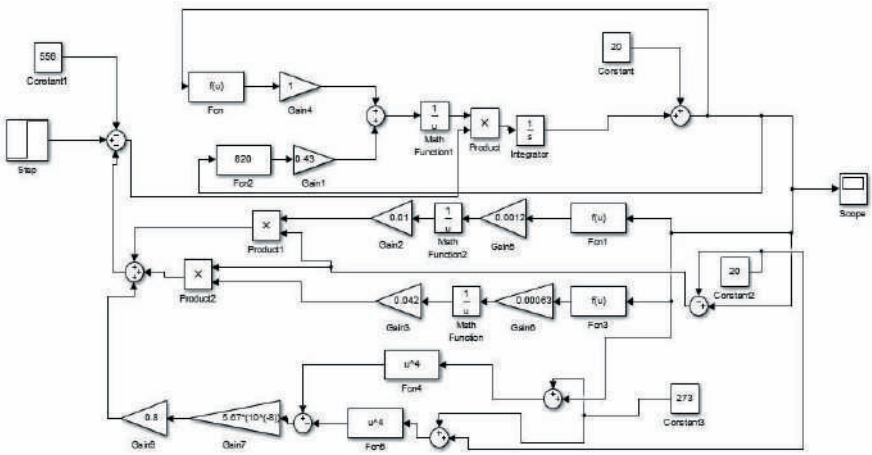


Рис. 4. Структурная модель индукционного нагревателя для синтеза нитридных материалов

Литература

1. **Голубев А. С., Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н.** Нитрид бора. Структура, свойства, получение. К.: Наук. думка, 1987. 197 с.
2. **Дудченок Н.В., Червоний І.Ф.** Особенности технологии гексагонального нитрида бора // Мир науки и инноваций. 2016. Т. 5. № 1 (3). С. 110—114.
3. **Новиков Н.В., Туркевич В.З.** Развитие технологии сверхтвердых материалов // Химическая и радиационная физика. М.: ИХФ РАН, 2011. С. 21—24.
4. **Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю., Жамбалова С.Ц.** Индукционная печь косвенного нагрева углеродных волокон // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2019. Выпуск 21. С. 76—83.
5. **Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О.** Выбор методики расчета и исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 77—86.
6. **Разработка** регулятора температуры индукционной тигельной печи с проводящим тиглем / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, А.О. Кулешов, И.М. Генералов // Труды XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ- 2014. М.: МЭИ, 2014. С. 248—249.
7. **Разработка** релейных систем управления мощностью и температурным режимом индукционных тигельных печей с использованием физического моделирования / М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов и др. // VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», г. Юрга, 2017. С. 109—115.

С.Е. Шураханова, sabina_sh97@mail.ru, М.С. Жармагамбетова,
zh_meruert.s@mail.ru, КазНУ им.аль-Фараби, г. Алматы

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ — КЛЮЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В настоящее время стоит острый вопрос о бытовом энергосбережении и о сбережении энергии в сфере ЖКХ. Основными препятствиями для энергосбережения являются удержание увеличения тарифов для населения на отдельные виды ресурсов (электроэнергия, газ), нехватка денежных ресурсов и инвестиций у предприятий ЖКХ для осуществления и проведения энергосберегающих мероприятий, низкое качество учета и контроля потребления электрической энергии по индивидуальным приборам, неэффективное использование нормативов, а также отсутствие бытового энергосбережения со стороны потребителей [1]. Для усовершенствования работы предприятий и для их перспективного развития необходимо учитывать и постоянно контролировать развитие социальной, экономической и экологической сфер. Основой для стабильности и развития может послужить внедрение требований во внутренние стандарты работы предприятия, технические политики и изменение регламентов, в также инвестиции.

Для осуществления мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности рассматривают первоначальные инвестиции (полученные за счет выбора более эффективного оборудования), затраты на проведение энергетического аудита, затраты на закупку и монтаж устройств автоматического контроля и учета, дистанционного снятия показаний приборов учета [1].

Международный стандарт ISO 50001:2011 направлен на оценку и учет потребляемой энергии, а также контроль за характером потребления электрической энергии и повышения уровня энергоэффективности. Настоящий международный стандарт основан на цикле «Планируйте — Делайте — Проверяйте — Улучшайте». Таким образом, в повседневную организационную практику организации вносится энергоменеджмент, который представляет собой цикл непрерывного улучшения [2]. Стоит отметить основное достоинство данного стандарта для экологии, поскольку он помогает снизить выбросы парниковых газов.

Основным и распространенным способом энергосбережения является оптимизация потребления электроэнергии на освещение. К основным мероприятиям можно отнести максимальное использование дневного света (максимизация прозрачности, увеличение количества и площади окон), увеличение отражающей способности (светлые потолки, стены), применение комбинированного освещения (общее + локализованное), повышение

светоотдачи благодаря применению более эффективных отражателей, переход от ламп накаливания на энергоэкономичные люминесцентные, компактные люминесцентные, светодиодные лампы, применение устройств управления освещением, внедрение автоматизированной системы диспетчерского управления наружным освещением (АСДУ НО) [1]. Переход от ламп накаливания на энергоэкономичные люминесцентные лампы позволяет экономить до 10—15 % электрической энергии. Использование компактных люминесцентных ламп позволяет экономить до 75—80 % ЭЭ. Около 50 % электроэнергии можно сэкономить при переходе от дуговых ртутных ламп (ДРЛ) на дуговые натриевые трубчатые (ДНаТ) [3].

Для повышения энергоэффективности уличного оборудования может быть использован энергоэффективный уличный фонарь, разработанный концерном OSRAM, который содержит светодиодный модуль и опорный щиток. Данная конструкция позволяет снизить потребление энергии, как минимум, на 60 % по сравнению с светильниками на ртутных газоразрядных лампах. Такие образом, классическое осветительное устройство преобразуется в светодиодное, которое эстетически является более красивым, а самое главное — энергоэффективным, и позволяет осуществлять комплексный централизованный контроль над освещением. Данная установка выделяется простотой монтажа, которая по легкости может быть сравнима с обычной заменой электропатрона или лампы. Срок службы таких источников света достаточно продолжительный, что положительно сказывается на расходах на эксплуатацию системы в целом. Светодиодные лампы могут быть отключены при необходимости, что позволяет не только экономить электроэнергию, но и может избавить от лишнего света, мешающего по ночам местным жителям [3].

Для повышения энергоэффективности работы предприятий могут быть осуществлены мероприятия по оптимизации подборов мощности электропривода, а также может быть использован частотно-регулируемый привод (ЧРП).

При передаче электрической энергии происходят потери, которые неминуемы, но они должны не превышать экономического предела. Для снижения потерь в сети необходимо использовать энергосберегающие устройства, повысить сечения проводников, использовать провода и кабели с медными жилами, осуществлять контроль за несанкционированными подключениями [1].

Энергосбережение также возможно в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, которое можно подразделить на четыре группы [4]:

1) осуществление учета и контроля энергоресурсов;

2) выбор способа планирования, проектирования и строительства;

3) модернизация системы и их подсистем техническим способом;

4) утилизация естественного тепла и холода, повторное использование вторичных энергоресурсов, снижение тепловых потерь.

Спад характеристик ограждающих конструкций служит основной причиной превышения планового теплопотребления. Поэтому необходимо принимать организационные меры, которые позволят определять реальное потребление тепловой энергии, которое может отличаться от проектной тепловой нагрузки зданий и сооружений.

Существенную роль на уменьшение тепловых потерь и теплопоступления оказывает выбор способа планирования, проектирования и строительства. Основной элемент данного вида мер энергосбережения связан с уменьшением расхода фильтрующегося воздуха (герметизация проемов и стыков). Данные мероприятия предусматриваются на стадии проектирования зданий.

Следующей мерой энергосбережения в данной области является модернизация систем. К данной группе можно отнести: оценку условий проекта (выбор наружной и внутренней температуры воздуха); понижение фильтрации (создание опор, воздушных завес и т.д.); снижение потерь (трубопроводов и вентиляционных каналов, снижение коэффициентов гидравлических и аэродинамических потерь, повышение КПД оборудования); подогрев и охлаждение теплоносителей; объединение систем между собой (например, центральная и автономная системы кондиционирования воздуха) и с другими системами (например, комбинирование СКВ и систем отопления), автоматизацию процессов теплоснабжения и подготовки воздуха.

Утилизация естественного тепла и холода, повторное использование вторичных энергоресурсов, снижение тепловых потерь — эффективные меры по энергосбережению. Эти меры включают использование солнечной энергии; естественных и низких температур (воды, наружного воздуха, грунта); источников нагрева и охлаждения воздуха (нагрев и охлаждение вытяжного воздуха, температура источника света, температура нагревательных приборов, теплота использованной воды и т.д.); теплового насоса для увеличения естественного источника тепла [5].

Замена неизолированных проводов классом напряжения 6 кВ на самонесущие изолированные провода служит мерой энергосбережения. Около 87 % аварийных ситуаций в системах электроснабжения 6−110 кВ приходится на электрические сети 6 кВ, поскольку они являются наиболее протяженными и разветвленными. Схлестывание проводов является причиной 19 % аварийных ситуаций в системе электроснабжения, этого позволяет избежать использование линий с СИП. Увеличение капитальных затрат на строительство полностью оправдывается снижением затрат на эксплуатацию ВЛ с изолированными проводами в первые три года эксплуатации [6].

К основным эффектам от мероприятий по энергосбережению можно отнести снижение стоимости электроэнерги для потребителей; повышение конкурентоспособности; понижение риска возникновения аварий благодаря снижению пиковых нагрузок; повышение качества энергии; снижение потерь энергии; минимизация инвестиций; экологический эффект.

Литература

1. **Трофимов Г.Г., Живаева О.П.** Качество электроэнергии и энергосбережение в электроэнергетике. Конспект лекций. Алматы: АУЭС, 2013. 63 с.
2. **ISO 50001:2011.** [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.iso.org.
3. **ГОСТ Р 51379-99**. Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов.
4. **Борисов Б.Г., Борисов К.Б.** Отопление промышленных предприятий. М.: МЭИ, 1997.
5. **Вахлер Б.Л.** Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях. М.: Металлургия, 1977.
6. **Варнавский Б.П., Колесникова А.И., Федорова М.Н.** Энергоаудит промышленных и коммунальных предприятий. М.: АСЭМ, 1999.

А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru, Н.А. Савин, KOLAY_AK@mail.ru, Н.К. Афонина, nadiaafonina1406@gmail.com, ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

В современных реалиях одной из главных тенденций электроэнергетики является оптимизация использования электрической энергии. Внедрение ресурсосберегающих технологий и их развитие –актуальная задача на сегодняшний день [1]. Одним из способов энергосбережения, а также повышения зрительного комфорта сотрудников, который рассмотрен в данной работе, является использование автоматической системы регулирования интенсивности искусственного освещения ADL-System [2, 3].

Данная система основана на комбинированном освещении, и ее использование в промышленных, административных и офисных помещениях является весьма актуальным. Функционирование автоматической регулировки базируется на плавном изменении выдаваемой световой мощности (светового потока) светильников в зависимости от естественной освещенности под ним. Плавность регулирования светового потока и, как следствие, достижение нормируемой освещенности рабочей поверхности является большим преимуществом. Управление осуществляется не снижением

питающего напряжения сети, что недопустимо при использовании светодиодных ламп, а с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Зачастую даже при довольно мощном естественном световом потоке из окон в дневное время суток, освещенность в удаленных местах помещения на рабочих поверхностях оказывается ниже установленных стандартов. Если в подобных ситуациях «досветить» такое помещение светильниками на полной проектной мощности, это приведет к «переосвещенности», излишней яркости и бликам на рабочей поверхности, что в свою очередь приводит к преждевременной утомляемости сотрудников, снижению производительности труда и завышенному потреблению электрической энергии.

Автоматическое регулирование светового потока светильника происходит после оценки освещенности специальным фотодатчиком диммирования, который встроен в каждый светильник. Сигнал от датчика входит в модуль управления, который преобразует его в электрический сигнал, подверженный ШИМ, и через управляющий ключ (усилитель) усиленный сигнал ШИМ поступает на драйвер светильника, который и осуществляет регулирование мощности светового потока светильника. На рисунке 1 представлена блок-схема устройства управления светильником.

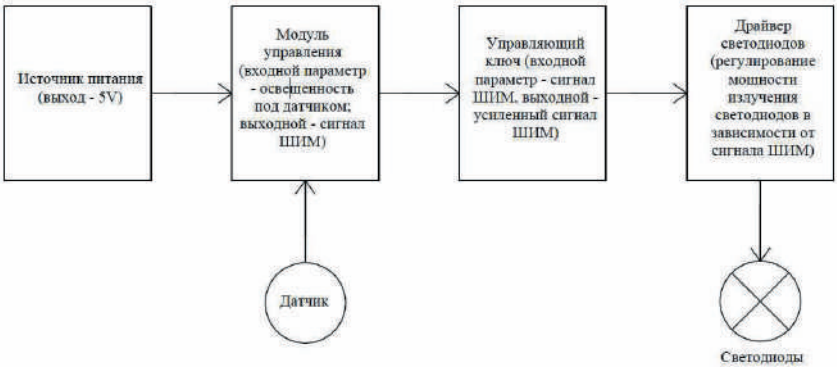


Рис. 1. Блок-схема устройства управления светильником

Система интегрируется в каждый светильник, не требуя обвязки слаботочным кабелем, и осуществляет регулирование светильников независимо друг от друга (рис. 2). Считаем большим достижением то, что изменение светового потока светильника происходит плавно, без скачков и незаметно человеческому глазу. В солнечные дни, когда уровень естественного света, проникающего в помещения, очень высок и освещенность на рабочем месте достигает нормируемой величины, дополнительный искусственный свет уже не требуется и система переводит светильник в «спящий режим». В

этом режиме потребляемая мощность светильника падает в среднем в шесть раз по сравнению с номинальным значением.

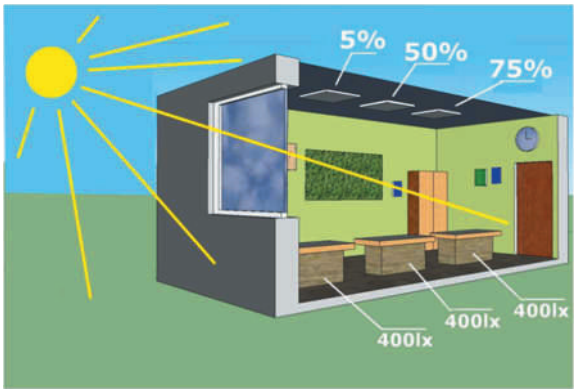


Рис. 2. Регулирование светового потока в помещении с естественным освещением

Большим преимуществом системы ADL-System является то, что она не требует дополнительных настроек при монтаже светильников и обслуживания в процессе эксплуатации. Увеличивается ресурс светильника за счет работы в «щадящем» режиме. Сотрудникам нет необходимости в течение рабочего дня включать и выключать светильники, думать об экономии и комфорте [4].

Эксперимент. Для определения энергоэффективности данной системы в учебной аудитории площадью 35,4 м^2, имеющей окно площадью 3,42 м^2, была исследована осветительная установка с комбинированным освещением, состоящая из $n_{\text{св}} = 6$ светодиодных светильников, мощностью $P_{\text{св}} = 40$ Вт каждый с индивидуальным автодиммированием (схема осветительной установки изображена на рис. 3).

Были проведены замеры освещенности с помощью люксметра под каждым светильником при различном уровне естественного освещения от окна, зафиксированы показания счетчика электропотребления каждого светильника и всей группы в целом. Эта последовательность действия была сделана и при зашторенном окне (имитация ночи), т.е. все светильники выдавали наибольший световой поток, потребляя по 40 Вт.

По результатам данного эксперимента были построены графики зависимости потребления активной мощности от естественной освещенности ближайшего и самого дальнего от окна светильников — № 1 и № 6 соответственно (рис. 4 и 5).

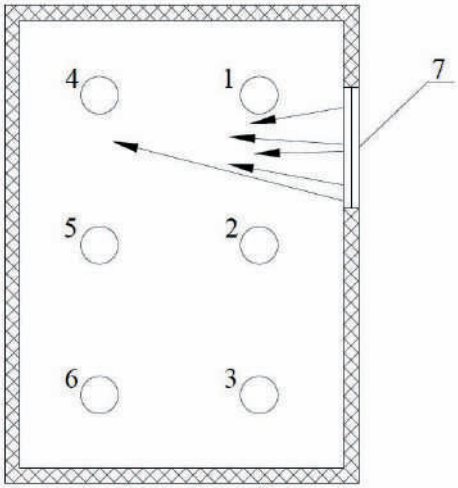


Рис. 3. Схема осветительной установки учебной аудитории: *1–6* — номер светильника; *7* — окно

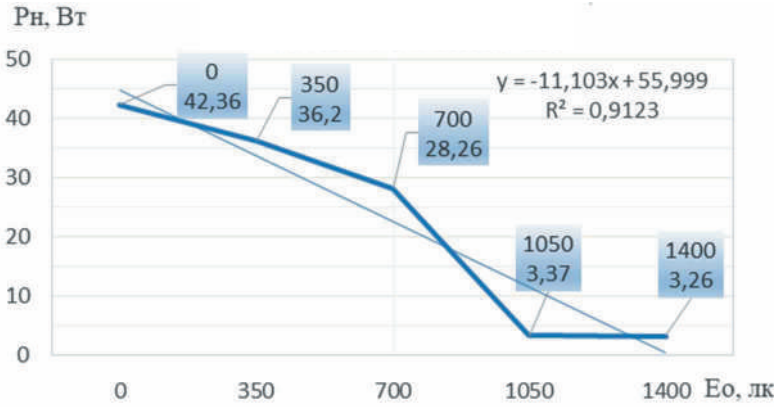


Рис. 4. Потребление активной мощности светильником № 1

Над каждой точкой графиков представлены данные естественной освещенности E_0, лк и потребляемой мощности светильников $P_н$, Вт.

Потребление мощности с учетом регулирования светового потока светильников происходит плавно — по линейной (светильник № 1) и экспоненциальной (светильник № 6) закономерностям.

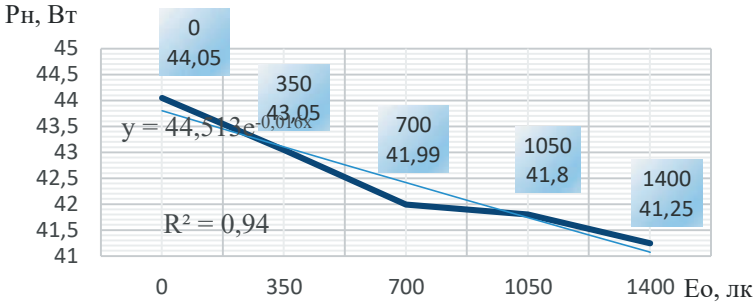


Рис. 5. Потребление активной мощности светильником № 6

На графиках также построены линии трендов и получены их уравнения, а также величина достоверности аппроксимации R^2, благодаря которым можно с большой точностью вычислить зависимость потребляемой электроэнергии от естественной освещенности, на чем основывается расчет эффективности данной электроустановки.

Технико-экономический расчет установки. В период проведения эксперимента в аудитории можно сделать допущение и принять, что средняя естественная освещенность от окна $E_{ср.ест} = 1000$ лк. Исходя из результатов опыта сведем потребление мощности при такой освещенности каждого светильника в таблицу.

Потребление активной мощности каждым светильником при $E_{ср.ест} = 1000$ лк

№	$P_{1000лк}$, Вт
1	3,45
2	4,09
3	40,49
4	31,5
5	40,9
6	41,9
Итого	**162,33**

Потребляемая мощность светодиодных светильников с автодиммированием при средней освещенности после регулирования светового потока составила 162,33 Вт. Номинальная мощность шести люминесцентных светильников, установленных по проекту в аудитории, равна 480 Вт.

Значит, сэкономленная мощность $\Delta Э$ равна:

$$\Delta Э = P_{\text{проект}} - P_{1000\text{лк}} = 480 - 162{,}33 = 317{,}67 \text{ Вт}.$$

Приняв, что время работы светильников в аудитории при заданной естественной освещенности в среднем $t_{\text{свет}} = 6$ ч в сутки, энергия, сэкономленная за сутки $\Delta Э_{\text{сут}}$, составит 1,91 кВт·ч, а за месяц (25 учебных дней) — 47,75 кВт·ч.

Учитывая, что тариф на электроэнергию равен $С_Э = 4$ руб/(кВт·ч), то экономический эффект в аудитории за месяц составит

$$Э = С_Э \ \Delta Э_{\text{сут}} = 4 \cdot 47{,}75 = 191 \text{ руб.}$$

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сделать следующие выводы: использование предложенной автоматической системы регулирования светового потока светодиодных светильников позволяет значительно уменьшить расходы на электроэнергию в системах освещения, обеспечить комфортное пребывание сотрудников на рабочем месте. Эксплуатация системы тем эффективнее, чем больше естественного освещения попадает внутрь помещения сквозь оконные проемы.

Литература

1. **Денисова А.Р., Роженцова Н.В**. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учебное пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010.
2. **Денисова А.Р., Абдуллина Г.А.** Алгоритм энергоэффективного управления электротехническими системами // Сборник V национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 2019.
3. **Денисова А.Р., Сибгатуллин Э.Г.** Повышение энергоэффективности при использовании системы автоматического регулирования светового потока // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С. 38—39.
4. **Денисова А.Р., Закирова З.Р.** Энергосберегающие технологии с системами освещения // В сб.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019). 2019. С. 48—3.

Г.С. Иванова, IvanovaGS@mpei.ru,
М.С. Егоров, yegorovms@mpei.ru , НИУ «МЭИ», Москва

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

К основным характеристикам осветительных установок относятся: потребляемая мощность, световой поток, световая отдача (КПД светильника), уровень пульсации освещенности, срок службы. В каталогах значения этих показателей приводятся при номинальном качестве электрической энергии.

При исследовании влияния качества питающего напряжения на характеристики осветительных ламп следует опираться на показатели качества. Качество электроэнергии характеризуется совокупностью свойств, показателей, нормируемых государственным стандартом ГОСТ 32144—2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Для основных типов источников освещения — ламп накаливания (ЛН), газоразрядных ламп (ГРЛ), светодиодных (СДЛ), люминесцентных (ЛЛ) и компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) — было проанализировано влияние следующих основных показателей качества электрической энергии: колебания напряжения и фликер; отклонение частоты; несинусоидальность напряжения.

Установлено, что на потребляемую мощность, световой поток, световую отдачу и срок службы большое влияние оказывают отклонения напряжения [3]. Исследование зависимости значений этих параметров от отклонений относительного значения напряжения показало, что наибольшее влияние на потребляемую мощность, световой поток и световую отдачу наблюдается у КЛЛ и ЛЛ. У большинства СДЛ при отклонении напряжения в пределах 15 % номинала эти параметры сохраняются постоянными [2].

Анализ влияния качества электроэнергии на работу натриевых ламп высокого давления (НЛВД) показывает, что во второй половине срока эксплуатации 50 % этих ламп начинают выходить из строя из-за повышенного напряжения $U_{л}$. Срок эксплуатации НЛВД ограничивается также постепенным ростом напряжения на лампе (на 1—5 В) за каждую тысячу часов горения. Рост напряжения связан с уменьшением количества натрия в разрядной трубке, а также с утеплением разрядной трубки в результате почернения возле электродных концов [3].

Отклонения напряжения, усугубленные резкопеременным характером, вызывают пульсацию светового потока ламп освещения, которую принято называть фликером. Наиболее раздражающее действие фликера

проявляется при частоте колебаний 8,8 Гц и размахах изменения напряжения 29 %. Доза фликера утомляет человеческий организм, снижает производительность труда и в конечном счете влияет на здоровье людей. При этом люминесцентные лампы в большей степени подавляют изменения напряжения, чем лампы накаливания.

Для решения данной проблемы используют стабилизаторы напряжения, основное назначение которых заключается в защите электрических устройств от скачков напряжения и обеспечении качественного электропитания потребителей в пределах их паспортных характеристик, что продлевает срок службы.

Влияние высших гармонических составляющих в кривых тока и напряжения на осветительные установки многообразно. Их влияние сказывается на сроке службы опосредованно, например, через перегрев электронных элементов дросселей, драйверов, поскольку все это может приводить к деградации структуры светодиода и, следовательно, к преждевременному выходу из его из строя.

Для решения данной проблемы необходимо применять фильтрокомпенсирующие устройства. Целью внедрения ФКУ является уменьшение реактивного сопротивления LC-цепочек до значений, близких к нулю, и шунтирование главной электрической сети (на частоте заданной гармоники).

Пониженная частота в электрической сети влияет на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью, например трансформаторы, за счет увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных элементов и соответственно нагрева кристалла в светодиоде и изоляции, что приводит данный тип светильников к выходу из строя. Значительные изменения частоты приводят к отказу осветительного оборудования.

Литература

1. **Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.** Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000.
2. **Сафонов Д.Г., Долингер С.Ю.** Учет дополнительных потерь мощности в электрооборудовании потребителей и систем электроснабжения при отклонениях напряжения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5.
3. **Горбунова Л.Н., Анчалаев И.Х.** Влияние качества электрической энергии на источники света // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. 352 с.

Н.Ю. Саввин, n-savvin@mail.ru,
БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБОРУДОВАНИИ ЗДАНИЙ

Экономика Российской Федерации стремительно развивается. Такие темпы способствуют наращиванию объемов производимой продукции и увеличению потребительского сектора. Жилищное строительство является неотъемлемой частью российской экономики, поскольку современное здание оснащается большим количеством систем, необходимых для создания комфортных условий труда и отдыха. Особенно большое значение и строгие требования предъявляются к температурному и, в целом, к климатическому состоянию внутреннего пространства помещений [1]. Системы теплоснабжения способствуют созданию таких условий. Их главной тенденцией развития является применение пластинчатых теплообменников для климатизации зданий.

Пластинчатое теплообменное оборудование при сравнительно малых габаритах способно увеличить мощность котельных и значительно снизить энергозатраты на подготовку теплоносителя (жидкость, газ) из-за высокого коэффициента теплопередачи К, Вт/(м^2·ºС), являющегося главной характеристикой теплообменного оборудования, который расчитывается по формуле

$$K = \frac{\beta}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}}, \qquad (1)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·ºС); α_2 — коэффициент тепловосприятия, Вт/(м^2·ºС); $\delta_{ст}$ — толщина теплообменной поверхности (пластины), м; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности материала теплообменной поверхности (пластины), Вт/(м^2·ºС); β — коэффициент, учитывающий загрязнение теплообменной поверхности (пластины), принимается равным 0,75—0,80 [2].

Распространение получили теплообменники разборного типа (рис. 1). Наряду с разборными аппаратами, применяются неразборные (паянные). Очевидным недостатком такого оборудования является невозможность очистки и замены теплообменных пластин, но в то же время они обладают абсолютной герметичностью и возможностью эксплуатации при больших скоростях теплоносителей.

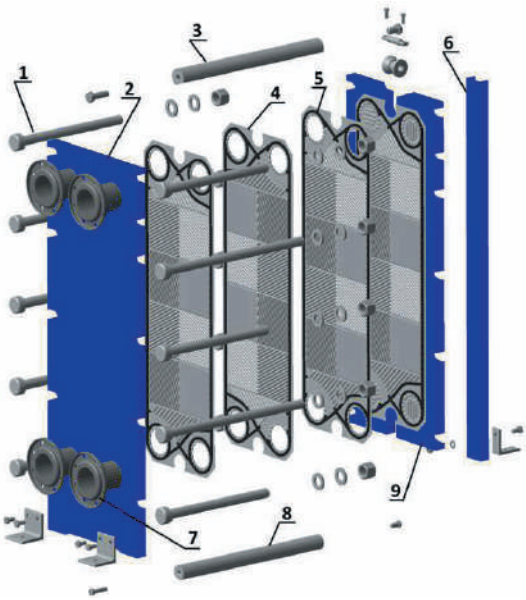


Рис. 1. Разборный пластинчатый теплообменник: *1* — стяжная шпилька; *2* — опорная плита; *3* — верхняя направляющая; *4* — гофрированная пластина; *5* — прокладка; *6* — задняя стойка; *7* — вход или выход греющей или нагреваемой среды; *8* — нижняя направляющая; *9* — прижимная плита

Новым способом применения разборных пластинчатых теплообменных аппаратов (РПТО), стало внедрение их в системы климатизации зданий, а именно в системы вентиляции. Снабжение людей свежим воздухом способствует повышению эффективности труда и положительно сказывается на общем здоровья всего организма, что подтверждается многочисленными исследованиями [3].

РПТО характеризуются большой площадью поверхности сложной геометрии, препятствующей образованию конденсата. Неотъемлемым плюсом выступает возможность наращивания тепловой мощности путем увеличения количества пластин в приточном или вытяжном контуре.

На рисунке 2 представлена схема устройства с потоками приточного и вытяжного воздуха.

Использование пластин сложной геометрии является самым популярным методом интенсификации теплообменных процессов [4]. Данной тематикой занимались многие ученые. В их числе самым ярким, внесшим наибольший вклад, является Прандтль. Он предложил разделить поток на две области: пограничный слой у стенки, где происходит молекулярный теплообмен, и ядро потока, где преобладает турбулентное смешение [5].

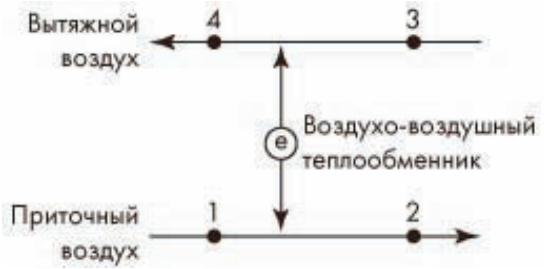


Рис. 2. Теплообмен между потоками приточного и вытяжного воздуха

Нами была предложена оригинальная геометрия пластины для теплообменника, изображенная на рис. 3.

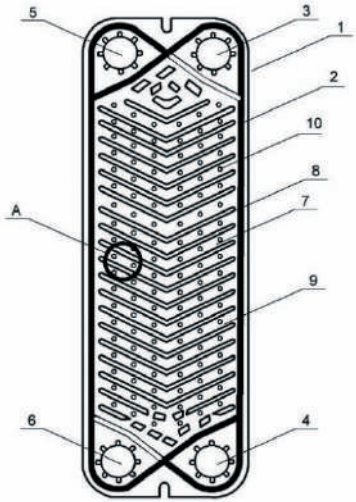


Рис. 3. Пластина теплообменного аппарата: *1* — пластина; *2* — герметизирующая прокладка; *3* — выходное отверстие приточного контура; *4* — входное отверстие приточного контура; *5* — входное отверстие вытяжного контура; *6* — выходное отверстие вытяжного контура; *7* — основная теплообменная часть; *8* — гофра; *9* — площадка между соседними рифлениями; *10* — технологическое углубление сферической формы

Особенностью пластины является наличие сферических углублений в гофрированных каналах. Такая модификация способствует дополнительной турбулизации теплообменного процесса в пристенной области [6].

Применение вышеуказанных пластин способствует росту коэффициента теплопередачи К, Вт/(м^2·ºС), и увеличению энергоэффектиности оборудования.

Литература

1. **Системная** аналитика в ситуационно-аналитических центрах в концепции безопасности города / А.В. Шевырев, М.А. Федотова, Н.Г. Шаламова и др. // Белгородская городская агломерация как субъект опережающего развития: сборник материалов научно-практической конференции. Т. 1. Белгород: КОНСТАНТА, 2014. С. 238—244.
2. **СП 41-101—95.** Проектирование тепловых пунктов. М.: Стандартинформ, 2009. 79 с.
3. **Тихомиров К.В. Сергеенко Э. С.** Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 480 с.
4. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
5. **Нащокин В. В**. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Книга по требованию, 2013. 496 с.
6. **Пат. № 199344 РФ. МПК F28F 3/00.** Пластина теплообменника / Л.А. Кущев, Н.Ю. Саввин, А.Ю. Феоктистов и др. // № 2020114112; заявл. 03.04.2020; опубл. 28.08.2020, Бюл. № 25.

О.В. Маркелова, olyash23@mail.ru,
В.Д. Сандаков, vitalysandakov@gmail.com,
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Многие отрасли промышленности сталкиваются с необходимостью очищать воздух, так как в большинстве технологических или производственных процессов образуются различного рода вредные выделения, такие как пыль, избыточное тепло, углекислый газ, пары вредных примесей, которые не только вредят здоровью сотрудников производства, но и в целом негативно влияют на экологию атмосферы.

Из существующих методов очистки газовых сред от примесей наиболее эффективными являются электрофизические методы. Их основными преимуществами перед механическими или химическими способами являются высокая степень очистки, простая конструкция и эксплуатация. Так, например, при использовании электрофизических фильтров нет необходимости в периодической замене элементов очистки.

Совместное применение электрофильтров с промышленными озонаторами позволяет качественно очистить воздух. Процесс озонирования помогает дезинфицировать цехи, склады и другие массивные сооружения с постоянно загрязненным воздухом. Озон также проникает в стены, где

уничтожает плесень и грибок, что является безусловным преимуществом использования этих устройств. Озонирование создает благоприятные для людей условия на предприятиях промышленного сектора. Доказано исследователями, что при добавлении озона в кондиционированный воздух в объеме 0,01—0,015 мг/м^3, дыхательные функции человека улучшаются. В конце рабочего дня у людей, которые пребывают в помещении с таким воздухом, частота дыхания становится реже, а максимальная вентиляция легких увеличивается. Однако, согласно норме, уровень озона в воздухе не должен превышать 0,1 мг/м^3, так как при более высоком уровне концентрации возникают проблемы с состоянием здоровья.

Исходя из этого, если концентрация вырабатываемого озона превышает норму, человек не должен находиться в помещении, когда происходит процесс озонирования, либо необходимо разработать систему контроля вырабатываемого озона с возможностью его регулирования в зависимости от присутствия или отсутствия в помещении людей, а также при необходимости повышать уровень озона, вступающего в химическую реакцию при конверсии углекислого газа или других вредных примесей.

Поскольку озон обладает высокой реакционной способностью, его хранение в течение длительного времени невозможно, поэтому генерируют его на месте. Образование и использование озона не влечет за собой вторичное загрязнение окружающей среды, и он не дает ненужных побочных продуктов. Диссоциация кислорода в атомарный кислород происходит в масштабе наносекунды, в то время как образование озона занимает несколько микросекунд. Поскольку атомарный кислород и озон нестабильны, оба имеют тенденцию распадаться на молекулярный кислород. Период полураспада озона составляет всего (20±10) мин и зависит от температуры окружающей среды. В конечном итоге это приводит к состоянию динамического равновесия между образованием и разрушением озона, которое определяет эффективность процесса. Следует отметить, что синтез озона из молекулярного кислорода не требует энергичных электронов, и поэтому он будет происходить независимо от наличия активного разряда.

В настоящее время считается, что наиболее экономичным способом получения озона в промышленных масштабах является его синтез в электрических разрядах из кислорода или смесей газа, содержащих кислород.

Электросинтез озона является достаточно энергоемким процессом. Для того, чтобы получить существенный выход озона значительной концентрации, требуются относительно низкая температура и сверхравновесная концентрация атомарного кислорода, т.е. производство озона в устройстве основано на принципе образования грозы [1].

Принцип работы озонатора (рис. 1) заключается в том, что в устройство поступает газ с высокой концентрацией кислорода, на который воздей-

ствует электрический разряд. Этот электрический разряд позволяет кислороду перестраиваться и образовать O_3, после чего озон вступает в реакцию, присоединяясь к молекулам загрязнителя и устраняя или преобразуя их в экологически-безопасные вещества.

Устройство озонатора включает в себя:

- высоковольтный источник напряжения;
- генератор электрических разрядов;
- систему электродов;
- вентилятор или компрессор для забора воздуха и подачи озоновой смеси в помещение.

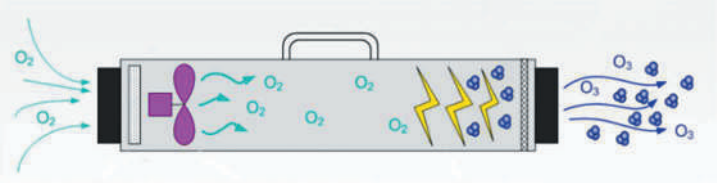


Рис. 1. Принцип работы электрического озонатора

При получении озона возможно использование тихого, дугового, коронного и барьерного разрядов.

Тихий разряд является несамостоятельным электрическим разрядом в газе, который образуется под действием внешнего ионизатора при малой плотности тока. Самостоятельный электрический разряд в газе, который характеризуется малым падением напряжения и большой плотностью тока, называют дуговым.

С точки зрения энергозатрат, наиболее экономичными для электросинтеза озона являются коронный (рис. 2) и барьерный разряды (рис. 3) в потоке кислородсодержащего газа.

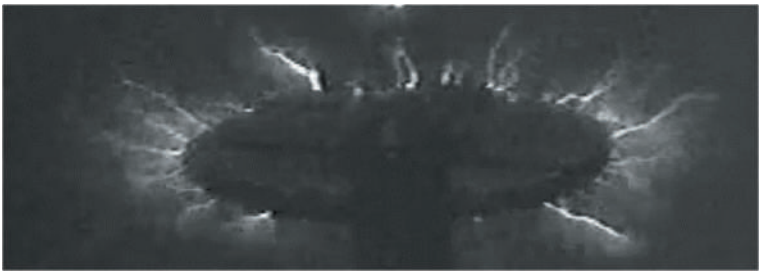


Рис. 2. Фотоструктура коронного разряда

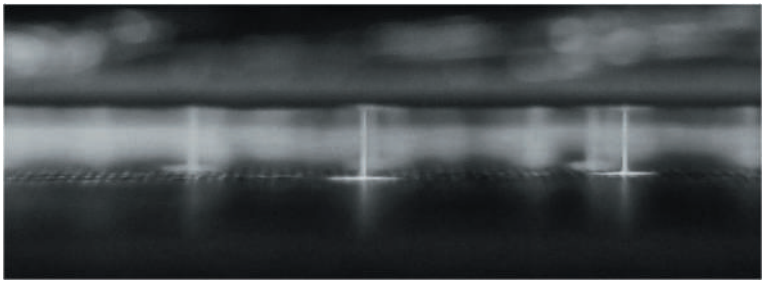


Рис. 3. Фотоструктура барьерного разряда

В озонаторе с коронным разрядом озон образуется путем пропускания потока сухого воздуха или кислорода через резко неоднородное электрическое поле импульсного напряжения. Данный тип озонатора содержит разноименно заряженные электроды, источник высоковольтного напряжения и устройство для забора исходной смеси и подачи озона в помещение (рис. 4).

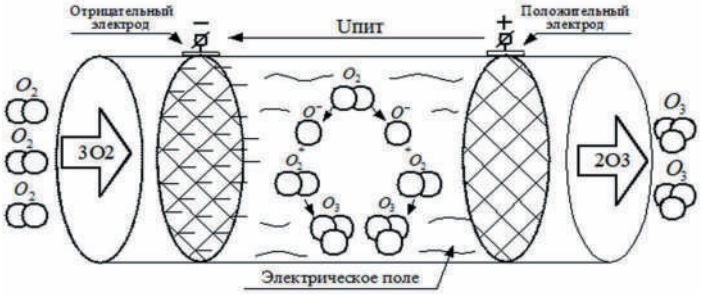


Рис. 4. Схема озонатора с коронным разрядом

Электрический заряд образуется между положительным и отрицательным электродами, которые подключены к положительному и отрицательному полюсам источника высокого напряжения, соответственно. Для возникновения коронного электрического разряда, как правило, используют два электрода: электрод с высокой кривизной (например, кончик иглы или проволока малого диаметра) и электрод с низкой кривизной поверхности (плоский электрод). Главной задачей такой системы электродов создать максимально резко неоднородное электрическое поле [2].

Коронный разряд может быть положительным или отрицательным. Это определяется полярностью напряжения на электроде с большой кривизной поверхности. Если изогнутый электрод положителен по отношению к плоскому электроду, коронный разряд называют положительным, если отрицателен — отрицательным. В разрядный промежуток между разноименно

заряженными электродами подается кислородсодержащий газ или чистый кислород, который под действием стримерного коронного разряда расщепляется на два атома кислорода, которые воссоединяются обратно с соседними молекулами кислорода в триплетах, образуя озон O_3. Для кондиционирования исходной смеси зачастую используются осушители воздуха и пылевые фильтры. Окружающий воздух содержит влагу, которая реагирует с озоном. Это приводит к снижению выхода озона в расчете на киловатт в час. Дополнительная проблема высокой влажности заключается в том, что нежелательные реакции происходят в блоке короны. При наличии повышенного количества водяного пара образуются большие количества оксидов азота, когда происходит разряд. Оксид азота может образовывать азотную кислоту, которая может вызвать коррозию.

Особое внимание стоит уделить тому факту, что при использовании чистого кислорода при максимально возможной низкой температуре газа будет достигаться самая высокая производительность. Экспериментально доказано, что концентрация озона увеличивается за счет использования более высокого импульсного напряжения, большего расстояния между газоразрядными зазорами и большей длины электрода, но меньшей скорости воздушного потока. Рабочее напряжение и скорость подачи кислородосодержащей смеси определяют эффективную площадь электродов и зазор между ними. Металлические электроды часто помещают внутрь тонкой стеклянной оболочки, так как они могут каталитически разлагать соприкасающийся с ними озон. На выходе из такого устройства, как правило, концентрация озона незначительна (не превышает нескольких процентов) и составляет лишь доли процента, если в качестве кислородосодержащего газа использовать атмосферный воздух. Вместе с тем озоносодержащий газ, полученный из атмосферного воздуха, под действием коронного электрического разряда имеет в составе внушительное число оксидов азота, которые обладают высокой реакционной способностью, что, в свою очередь, считается неприемлемым для осуществления множества технологических процессов. Вследствие этого синтез озона с применением чистого кислорода значительно эффективнее синтеза озона с использованием атмосферного воздуха.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при необходимости небольшой концентрации озона стоит применять озонатор с коронным разрядом. Для образования же больших концентраций озона применяют барьерный озонатор. Помещая в озонатор барьер в виде диэлектрика, можно значительно повысить производительность озонатора, ввиду того, что выработка озона в околобарьерной области ощутимо увеличивается, из чего можно сделать вывод, что часть канала микроразряда, которая прилегает к барьеру, производит большую часть озона. Это говорит о том, что, создавая высокопроизводительный озонатор, необходимо включить в конструкцию

максимально возможное количество таких областей на единицу разрядного объема. Этого можно добиться, используя многобарьерный разрядный промежуток. Такой озонатор производит озон эффективнее и качественнее, но при этом требует меньше энергии и является серьезным соперником безбарьерного озонатора ввиду своей высокопроизводительности и экономической выгоды.

Дадим определение барьерному разряду. При подаче переменного напряжения на систему электродов с одним или обоими электродами, покрытыми или разделенными диэлектрическим слоем, в газовом зазоре появляется диэлектрический барьерный разряд. Ток разряда ограничивается диэлектрическим слоем, который делает барьерный разряд более равномерным в объеме реактора. Предпочтительными материалами для диэлектрического барьера являются стекло или кварцевое стекло, в особых случаях также керамические материалы и тонкие слои эмали или полимера. От свойств диэлектрического барьера, который является важнейшей частью процесса производства озона, зависят производительность и надежность генератора, а также качество вырабатываемой озонсодержащей смеси. Рассмотрим влияние количества диэлектрических слоев на продуктивность озонатора, сравнив два озонатора — однобарьерный и четырехбарьерный. Принцип работы многобарьерного озонатора заключается в следующем. На электроды *1* подается электричекое напряжение. Во всех разрядных промежутках образуется электрическое поле с барьерным разрядом и равномерно распределяется в зазорах *3*. Кислородсодержащий газ нагнетается в зазоры, где происходит синтез озона под действием барьерного разряда. Электромонтажная схема четырехбарьерного озонатора изображена на рис. 5.

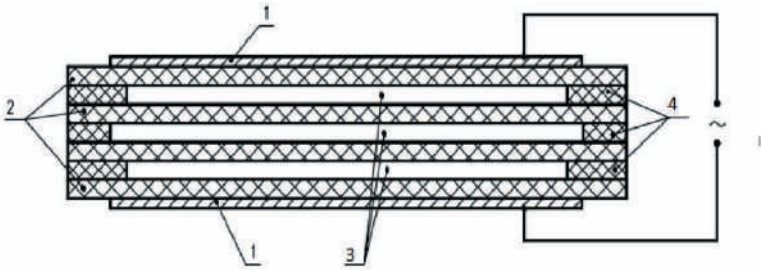


Рис. 5. Электромонтажная схема многобарьерного озонатора: *1* — металлические электроды; *2* — диэлектрические барьеры; *3* — разрядные зазоры; *4* — вкладыши

Эффективность многобарьернооого озонатора была экспериментально подтверждена. В лабораторных условиях сравнили работу классического однобарьерного и четырехбарьерного озонаторов. У однобарьерного озонатора в качестве диэлектрического слоя взята пластина стеклотекстолита

толщиной 2 мм, высота газоразрядного зазора составляет 1,5 мм. В составе конструкции многобарьерного озонатора имеется четыре пластины стеклотекстолита, толщина каждого из них 0,5 мм. Четырехбарьерный озонатор имеет три газоразрядных промежутка высотой 0,5 мм каждый. Отсюда следует, что общие толщина диэлектрических пластин и высота зазоров одинаковы для обоих озонаторов и равны 1,5 мм и 2 мм соответственно. У обоих озонаторов также схожий вид зазоров, которые одинаковы по размеру. Питание обоих озонаторов осуществлялось от источника высокого напряжения частотой 50 Гц, средний ток составлял 1 мА при напряжении 11 кВ. Выработка озона классического устройства при поддержании упомянутых выше параметров составила 0, 3 грамма в час, в то время как четырехбарьерный вырабатывал 1,2 грамма озона за тот же промежуток времени. Повышенный синтез озона многобарьерного устройства обусловлен тем, что наличие четырех барьеров (вместо одного) увеличивает производительность озонатора, так как околобарьерная область вырабатывает основную часть озона [3].

Таким образом, можно сделать вывод: чем больше количество диэлектрических пластин, тем больше озона вырабатывает прибор. Вместе с тем кислородсодержащая смесь пропускается между барьерами и охлаждает их поверхность. Увеличение эффективности охлаждения обусловлено увеличением числа диэлектрических пластин.

Опираясь на вышеизложенный материал, можно сравнить и выделить достоинства и недостатки генератора озона с коронным разрядом и барьерного озонатора.

Озонаторы с коронным разрядом долговечны и надежны, ввиду отсутствия в их конструкции диэлектрического барьера, который часто повреждается и требует замены. Аэродинамическое сопротивление будет ощутимо уменьшаться, а выход озона не будет зависеть от влажности озонируемой смеси, если использовать импульсы малой длительности.

Барьерный озонатор имеет в преимуществах большую концентрацию озона при меньших энергозатратах, однако он менее надежен, так как имеет барьер в виде диэлектрика, пробой которого нарушает нормальный режим работы устройства, а следовательно, требует больших затрат на эксплуатацию.

Из вышеописанного следует, что применение того или иного генератора озона зависит от технологического процесса предприятия, а также от требуемой концентрации озона. Так, например, для жилых помещений или производств с участием людей подходит озонатор с коронным разрядом, в то время как при необходимости, например, сохранения продуктов на складах или очистки воды наиболее эффективным окажется барьерный озонатор [4].

Литература

1. **Сандаков В.Д., Подрезов А.Н.** Повышение эффективности очистки газовых сред // XIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы экологии»: сб. мат. докл. Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2015. С. 3—5.
2. **Николаенко С.А., Храпов В.А.** Сравнительные характеристики барьерного и безбарьерного озонатора // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2017. №1 (29). С. 100—104.
3. **Pipa A.V., Brandenburg R.** The Equivalent Circuit Approach for the Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges: The Classical Theory and Recent Developments // Atoms. 2019. 7(1).
4. **Kang Li, Hassan Javed, Guoqiang Zhang.** Experimental Study on Ozone Production under 50Hz Corona Discharge Used for Faults Diagnostic / Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology. // Advances in Engineering Research. 2015.

М.А. Федин, fedinma@mail.ru, А. Б. Кувалдин, a.kuvaldin2013@yandex.ru, А. О. Кулешов, AOKuleschov@yandex.ru, И.Е. Жмурко, ZhmurkoIY@mpei.ru, С.С. Кондрашов, sskondrashov@yandex.ru, НИУ «МЭИ», Москва, А.П. Кислов, kislovpsu@mail.ru, Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, Казахстан

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПЛАВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

В настоящее время проблема защиты металлов от коррозионных процессов не теряет своей актуальности. Темпы развития многих отраслей промышленности тормозятся в связи с нерешенными вопросами борьбы с коррозией. Предъявляются все более высокие требования к эксплуатации технологического оборудования и металлоконструкций. Все чаще в производстве технологический процесс требует применения высоких температур, давлений и агрессивных сред.

Сегодня для предотвращения воздействия коррозии на металлические конструкции и эффективного продления срока службы изделия применяют такие технологии [1], как электролитическое осаждение, гуммирование, покраска, газотермическое напыление и другие. Безусловно, для использования подобных способов защиты металлов от коррозионных процессов необходимы значительные материальные затраты, а кроме того, энергоемкое оборудование и высококвалифицированный обслуживающий персонал. Ввиду этого анализ методов нанесения покрытий показывает, что одним из

самых простых в реализации, эффективных и, что немаловажно, экономичных способов является газопламенное [2] порошковое напыление (рис. 1).

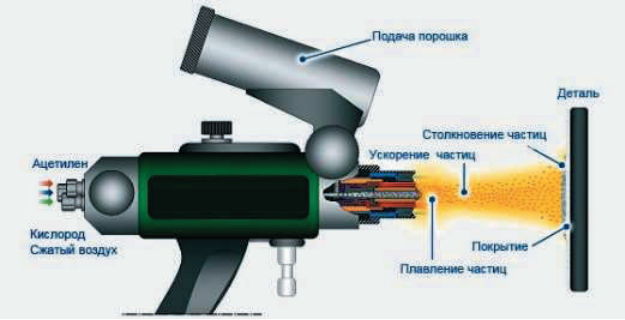


Рис. 1. Процесс напыления порошка с применением газопламенной горелки

Однако этот способ нанесения покрытия имеет и свои недостатки. При приложении высоких контактных давлений, невысокая адгезионная прочность может стать причиной нарушения сплошности [3] поверхности, проявляясь в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации, что ограничивает работоспособность. Кроме того, технология газопламенного напыления имеет ограничения по своему применению: при нанесении покрытия на цилиндрические поверхности диаметром от 150 мм и более применение ацетиленовой горелки для расплавления напыленного порошка невозможно из-за больших тепловых потерь пламени [4].

Для нанесения защитных покрытий на детали диаметром более 150 мм, а также для увеличения адгезионной прочности, уменьшения пористости, ликвидации нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий и обеспечения равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя данную технологию предлагается дополнить установкой индукционного нагрева, которая позволит осуществить быстрый нагрев поверхности до температуры оплавления нанесенного покрытия. Такое решение позволит наносить твердое коррозионностойкое покрытие на ответственные детали механизмов, работающих в условиях агрессивной среды.

Разработка алгоритма расчета, учитывающего возникновение термонапряжений. В процессе индукционного нагрева в заготовке из-за неравномерного распределения выделяющейся мощности возникает неравномерное распределение температуры, что приводит к термонапряжениям сжатия и термонапряжениям растяжения. Если их значения превышают предел упругости (или предел текучести) материала, то изделие деформируется, а при превышении предела прочности на сжатие или растяжение – разрушается.

Исходя из этого применение индукционного нагрева для оплавления напыленного покрытия предполагает исследование термических напряжений, возникающих в заготовке в процессе нагрева [5, 6].

В качестве объекта исследования и моделирования выбрана индукционная установка, которая используется для оплавления напыленного коррозионно-стойкого покрытия Castolin Eutalloy RW 12496 цилиндрической заготовки из стали 45. Геометрические размеры заготовки: диаметр — 16 мм, общая длина — 120 мм, длина защитного покрытия, наносимого на заготовку — 100 мм, толщина наносимого покрытия — 1 мм, твердость HRC заготовки до нанесения защитного покрытия — 21.

При моделировании процесса нанесения защитного покрытия в программах *ELCUT* и *Induction Systems* [3] примем следующие допущения.

1. Деталь вращается со скоростью 20 об./мин, и это обеспечивает равномерное распределение покрытия.

2. Поскольку производитель Castolin не приводит никаких данных об электропроводности и магнитной проницаемости порошка Eutalloy RW 12496, будем использовать данные современных исследований аналогичных порошков системы Ni-Cr-B-Si-Fe [7, 8] и примем удельное электрическое сопротивление порошкового покрытия равным $2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Алгоритм расчета термонапряжений (рис. 2) основывается на использовании данных, полученных в ходе решения дифференциальных уравнений электромагнитных и тепловых процессов.

Рис. 2. Алгоритм расчета

Для разработки температурного режима, учитывающего возникновение температурных напряжений, проведем анализ распределения электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева заготовки. Для этого воспользуемся универсальным конечно-элементным пакетом программ *ELCUT*.

Решение электромагнитной задачи с применением пакета программ ELCUT. Для выбора рациональной частоты для оплавления с учетом свойств материала детали и напыляемого материала в пакете программ ELCUT было произведено моделирование на частотах 1, 35, 100 кГц и 1 МГц.

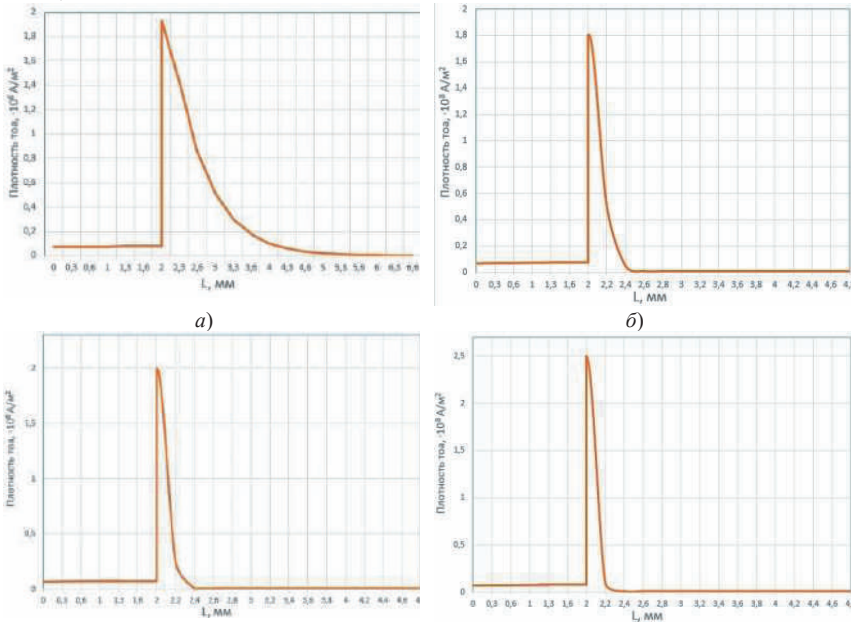
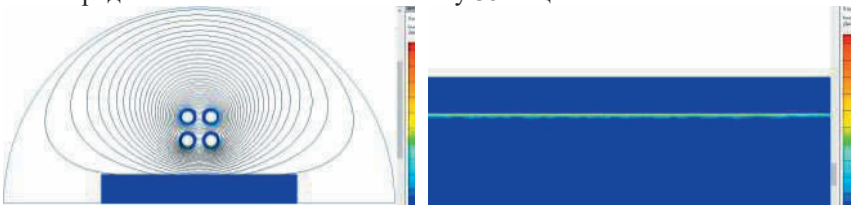


Рис. 3. Результаты решения электромагнитной задачи: *а* — 1 кГц; *б* — 35 кГц; *в* — 100 кГц; *г* — 1 МГц

Для 1 кГц максимальная плотность тока наблюдается в диапазоне от зоны сцепления до более чем 3 мм от нее в глубь стального изделия. Безусловно, такой режим нагрева повлечет за собой больший нагрев [9] внутренних слоев детали. Кроме того, мощности, выделяемой в зоне сцепления, будет недостаточно для быстрого нагрева детали, что уже в свою очередь вызывает уменьшение производительности и КПД процесса.

При анализе графиков плотности тока (рис. 3) в режимах нагрева на частоте 100 кГц и 1 МГц наглядно просматривается преимущество

применения повышенных частот. Плотность тока максимальна в месте сплавления поверхностей материалов на частотах 35, 100 кГц и 1 МГц. Значение тепловыделения в этих случаях также максимально в зоне сцепления. Однако анализ тепловых процессов в программе *Induction Systems* показал, что применение нагрева на таких частотах нецелесообразно ввиду возникновения больших температурных напряжений в стальной заготовке. В связи с этим предлагается использовать частоту 35 кГц.



а) *б*)

Рис. 4. Результаты решения электромагнитной задачи: *а* — для всей расчетной области, *б* — увеличенный фрагмент

Электрические параметры для электромагнитной задачи: частота — 35 кГц, ток индуктора — 380 А, электропроводность индуктора — $5{,}6 \cdot 10^7$ См/м, электропроводность покрытия — $5 \cdot 10^5$ См/м.

Как видно из результатов моделирования (рис. 4), максимальная плотность тока наблюдается на стыке покрытия с деталью. Плотность тока, наводящегося в покрытии и в изделии, существенно ниже значения плотности тока в зоне сцепления.

Как и ожидалось, происходит это по причине различия электрофизических свойств покрытия и детали. В частности, удельное электрическое сопротивление покрытия существенно выше величины удельного электрического сопротивление стальной заготовки. Фактически наблюдается эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела, заключающийся в перераспределении дифференциальных параметров электромагнитного поля по слоям загрузки [10].

Результаты моделирования показывают, что покрытие достигло нужной температуры оплавления 1100 °С. Несмотря на это, необходимо провести проверку на термические напряжения.

Расчеты термонапряженного состояния в программе *Induction Systems* показывают, что максимум термонапряжений приходится на момент времени $\tau = 20$ с, когда $\sigma = 295$ МПа, при этом $\sigma_z < \sigma_{\text{текуч}}$ — значение напряжения меньше предела текучести. Напряжения на поверхности во время нагрева не превышают половины предела текучести.

Проведение эксперимента по оплавлению напыленного коррозионностойкого покрытия. Для проведения экспериментальных исследований

в НИУ «МЭИ» создан стенд на базе индукционной установки CEIA PW3 180/50 и частотно-регулируемого привода (рис. 5). Индукционная установка представляет собой твердотельный генератор серии Power Cube 180/50 мощностью 12 кВт, который управляется микрокомпьютером. Энергия подается на небольшую нагревательную голову HH13, с которой соединен индуктор, осуществляющий оплавление.

Рис. 5. Экспериментальный стенд на базе установки CEIA PW3 180/50

Для измерения температуры заготовки использовался оптический пирометр SH60/SL-200 с диапазоном рабочих температур 600—2000 °С.

В результате экспериментальных исследований установлено, что для уменьшения возникающих термонапряжений нагрев необходимо проводить в две стадии непрерывно-последовательным способом. Первая стадия — нагрев с 20 до 770 °С при удельной поверхностной мощности 200 кВт/м^2 в течение 45 с при частоте 35 кГц; вторая стадия — нагрев с 770 до 1100 °С при удельной поверхностной мощности 350 кВт/м^2 в течение 60 с при частоте 35 кГц.

После оплавления заготовки было проведено измерение твердости покрытия (рис. 6). Твердость покрытия равна 53 HRC.

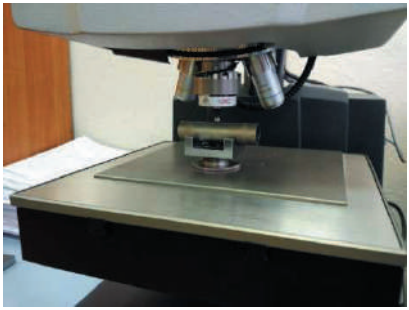


Рис. 6. Измерение твердости нанесенного покрытия

Заключение. При индукционном нагреве изделия ограничивающими факторами, формирующими оптимальный температурный режим, являются температура нагрева, скорость нагрева и допустимые перепады температур по сечению изделия. Дело в том, что при нагреве с невысокой скоростью увеличивается общее время нагрева изделия и снижается производительность процесса. С другой стороны, при повышенной скорости нагрева необходимо учесть возникновение термических напряжений из-за существенных температурных перепадов. Обычно режим индукционного нагрева рассчитывается так, чтобы возникающие термонапряжения не превышали значений предела текучести.

В результате моделирования получено решение электромагнитной и тепловой задач в программе ELCUT, на их основе проведены сравнительный анализ и выбор частоты тока для последующего определения режима оплавления покрытия.

Опираясь на результаты механической задачи, полученные в программе Induction Systems, предложен оптимальный режим оплавления напыленного коррозионно-стойкого покрытия.

Литература

1. **Коррозионная** стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии. Справ. изд./ под ред. Б.В. Строкана, А.М. Сухотина. Л.: Химия. 1987. 280 с.
2. **Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А.** Газотермическое напыление: учебное пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
3. **Антошин Е.В.** Газотермическое напыление покрытий. М.: Машиностроение, 1974.
4. **Кондрашов С.С., Кулешова А.О.** Оплавление напыленного проводящего покрытия методом индукционного нагрева // 26 Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2020. С. 442.
5. **Кондрашов С.С., Кулешова А.О.** Разработка математической модели процесса индукционного нагрева для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия // 26 Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2020. С. 443.
6. **Федин М.А., Кулешова А.О.** Индукционная установка для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия // 25 Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2019. С. 429.
7. **Кудинов В. В., Бобров Г.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
8. **Установки индукционного нагрева** / под ред. А.Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, 1981. 325 с.

9. **Расчет** электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим ферромагнитным тиглем с учетом двухслойности загрузки / М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов, С.В. Ахметьянов // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век. XV Международная научно-практическая интернет-конференция. 2017. С. 109—112.
10. **Защита** от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник / под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. Т. 1. 688 с.

А.Р. Лепешкин, lepeshkin.ar@gmail.ru,
А.Б. Кувалдин, a.kuvaldin2013@yandex.ru, НИУ «МЭИ», Москва,
А.Е. Ремизов, ad@rsatu.ru, РГАТУ, г. Рыбинск,
М.В. Фетисов, АО «ОДК», Москва

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Для повышения эффективности энергетических газотурбинных установок (ГТУ) и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) используются различные конструкции теплообменных аппаратов. Среди теплообменных аппаратов известны пластинчатые теплообменники [1, 2 и др.], специальные теплообменники, созданные по аддитивной технологии [2] и кожухотрубные теплообменники [3 и др.]. В ГТУ и ГТД с регенерацией тепла широко применяются конструкции пластинчатых теплообменников, которые имеют достоинства.

Одним из путей повышения КПД стационарных ГТУ и авиационных ГТД является повышение температуры воздуха на входе в камеру сгорания за счет утилизации тепла газов на выходе из турбины. С этой целью за турбиной располагается теплообменник. Один из вариантов пластинчатого теплообменника представляет собой конструкцию, собранную из отдельных профилированных пластин (рис. 1). Потоки газа и воздуха протекают через решетку теплообменника, разделяемую пластинами. Подогреваемый воздух поступает через центральный коллектор и пластины, протекая между ними перпендикулярно направлению движения газового потока (движущегося с другой стороны пластины) и отводится подогретый воздух через крайние коллекторы.

При работе по номинальному режиму температура газового потока на входе в теплообменник составляет 600 °С, а температура воздуха 200—250 °С. Однако при запуске и во время взлета возникает режим «прожига», когда воздух в теплообменник не подается, а температура газа достигает 650 °С. Длительность режима составляет 10 мин. Анализ конструкции показывает, что наибольшие перепады температуры в режиме «прожига»

происходят на участке *1* (рис. 1) во внутренних ребрах центрального коллектора подвода воздуха в момент подачи воздуха с температурой 200 °С. Момент отключения может быть также опасен, когда в нагретый теплообменник подается холодный воздух. В этом случае опасным является участок *2* (наружные ребра секции теплообменника).

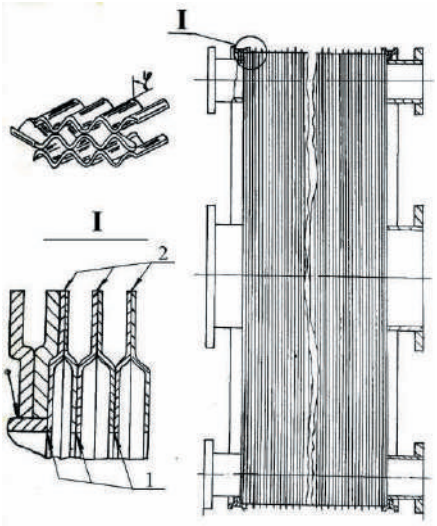


Рис. 1. Конструкция теплообменника

Проведение испытаний теплообменников и их элементов возможно на различных видах испытательного оборудования, имитирующего условия их работы в газовом потоке ГТД. Это могут быть газодинамические установки или установки с высокочастотным индукционным нагревом (ВЧ) нагревом [4—6]. ВЧ-установки имеют много достоинств перед другими видами нагрева.

Газодинамический стенд позволяет проводить испытания с максимальным приближением к реальным условиям, однако стоимость таких испытаний очень высока, и на этапе прочностной доводки применение их нецелесообразно. Реально использовать газовый стенд для контрольной проверки отработанного варианта теплообменника не представляется возможным.

Высокочастотный индукционный нагрев при достаточно высокой частоте удовлетворительно имитирует поверхностный нагрев в газовом потоке. Стоимость испытаний с ВЧ-нагревом на несколько порядков ниже стоимости испытаний на газовом стенде. Малая стоимость испытаний позволяет проводить всесторонние исследования конструкций с целью установления влияния на их термоциклическую долговечность конструк-

ционно-технологических факторов, таких как различная толщина материала пластин, различные материалы, способы сборки и др.

Для испытаний использована ВЧ-установка, имеющая высокочастотный генератор (ВЧГ) с индукционной системой на частоте 440 Гц, нагружающее устройство, системы управления, системы измерения и вспомогательные устройства. Имеющееся оборудование после изготовления необходимой испытательной оснастки удалось применить для исследований термоциклической долговечности элементов теплообменника. При испытаниях использовали заготовку секции теплообменника, сваренную из двух пластин по внутреннему ребру (рис. 2). С целью обеспечения жесткости элемента, соответствующей собранному теплообменнику, на наружные ребра с двух сторон с помощью точечной сварки были прикреплены профилированные полоски металла той же толщины и марки, что и в основной пластине.

Для измерения температуры образец был препарирован хромель-алюмелевыми термопарами. Фиксация теплообменника в заданном положении относительно индуктора достигается с помощью нагружающего устройства, обеспечивающего приложение к нему усилия в 10—15 кГ через упругий элемент. Для крепления образца использовались специальные захваты. Для нагрева теплообменника был разработан индуктор (рис. 2), с помощью которого осуществляется нагрев на протяжении всего участка элемента секции.

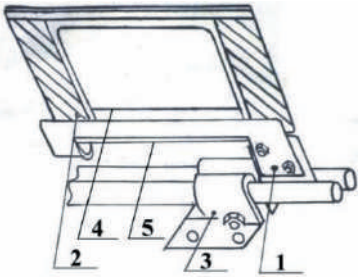


Рис. 2. Индуктор нагрева элемента секции теплообменника: *1* — индуктор; *2* — пластина; *3* — электрические выводы (шины); *4* — внутреннее ребро; *5* — часть внешней пластины (имитатор внешнего ребра)

Однако при проведении исследований выяснилось, что из-за малой жесткости образца при неравномерном нагреве участка большой протяженности происходит настолько сильное его коробление, что происходит закорачивание индуктора (рис. 2) и выгорание локальной части материала теплообменника. В связи с этим протяженность нагреваемой зоны теплообменника была сокращена до 10—25 мм и разработан соответствующий индуктор (рис. 3).

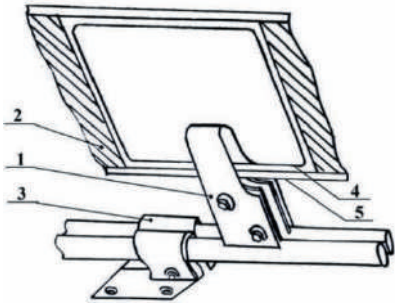


Рис. 3. Индуктор нагрева зоны элемента секции теплообменника: *1* — подвижный индуктор; *2* — пластина; *3* — электрические выводы (шины); *4* — внутреннее ребро; *5* — часть внешней пластины (имитатор внешнего ребра)

Конструкция крепления индуктора к шинам ВЧ-генератора позволяет перемещать его таким образом, что на одном образце можно проводить последовательные исследования на термоциклическую долговечность нескольких зон. Коробление образца при этом значительно уменьшилось. Охлаждение элемента теплообменника при термоциклировании происходило с помощью воздуха, подаваемого после отработки режима выдержки на максимальном температурном режиме T_{max} и выключении нагрева. Режим изменения максимальной температуры T_{max} в термоцикле показан на рис. 4.

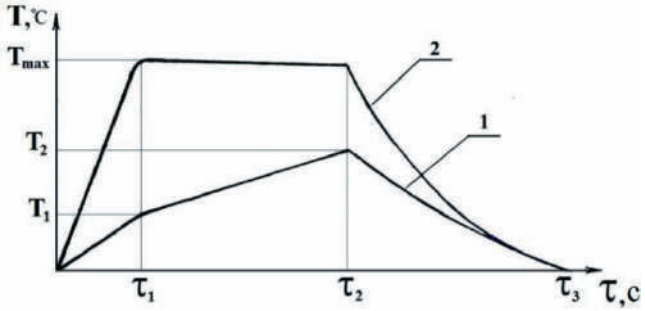


Рис. 4. Температурные кривые ребер теплообменника: *1* — внутреннее ребро; *2* — имитатор внешнего ребра

В процессе термоциклирования было установлено, что наибольший перепад по нагреваемому сечению внутреннего элемента теплообменника достигает 150 °С в конце режима T_{max}.

В процессе работы выполнены следующие исследования:

- проведен анализ условий работы элементов теплообменника и выявлены наиболее термонапряженные участки;

- разработана методика испытаний секции элементов теплообменника на термоциклическую долговечность;

- разработаны и изготовлены захваты для крепления секций теплообменника на установке;

- опробована форма и установлены размеры индуктора, обеспечивающего нагрев секции теплообменника в соответствии с техническими условиями;

- определены способы и границы эффективного управления температурным градиентом (перепадом) в перемычках секции теплообменника;

- проведена предварительная оценка термоциклической долговечности теплообменника;

- проведенные исследования показали возможность использования ВЧ-нагрева при испытаниях секции теплообменника на термоциклическую долговечность.

В ходе разработки методики испытаний получены предварительные данные о термоциклической долговечности теплообменника (избыточное давление в секции не воспроизводилось). При использовании индуктора, представленного на рис. 2, и нагрева по всей длине перемычки внутреннего элемента секции теплообменника через 4500 циклов, вследствие коробления произошло касание секции индуктором. Трещин в теплообменнике к этому моменту не наблюдалось. Моделирование теплового состояния секции теплообменника проводилось с помощью доработанного индуктора (см. рис. 3) с протяженностью нагреваемой зоны 20—25 мм при термоциклических испытаниях. При этом образование трещины наблюдалось через 14 000—16 000 теплосмен.

Выводы. Разработана методика моделирования теплового состояния и проведения исследований элементов пластинчатого теплообменника для авиационного газотурбинного двигателя с использованием разработанного испытательного оборудования при термоциклических испытаниях. Проведен анализ условий работы теплообменника и выявлены наиболее термонапряженные участки секции теплообменника. Выбрана оптимальная конструкция индуктора. Определены способы и границы эффективного управления тепловым состоянием элементов теплообменника. Проведенные исследования показали возможность использования высокочастотного индукционного нагрева при испытаниях элементов секций теплообменника на термоциклическую долговечность. Приведены результаты термоциклических испытаний элементов пластинчатого теплообменника для газотурбинного двигателя.

Литература

1. **Гулимовский И.А., Вербанов И.С., Светлаков А.Л.** Численное исследование теплогидравлических характеристик микрохолмистой и зигзагообразной поверхностей повышенной турбулентности // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 26—31.
2. **Вербанов И.С., Светлаков А.Л., Лепешкин А.Р.** Снижение шероховатости поверхностей и испытания на герметичность теплообменных аппаратов, изготавливаемых по аддитивной технологии // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: материалы XVII международной научно-практической конференции (2–4 декабря 2019 г.). Орел: ОГУ, 2019. С. 149—153.
3. **Андреев А.С., Синицын Н.Н.** Компьютерная модель для исследования динамики теплообмена, оценки термодинамической эффективности и управления процессом // Промышленная энергетика. 2020. № 7. С. 20–25.
4. **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.** Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Монография. М.: Инфра-М, 2019. 273 с. (Сер. Научная мысль).
5. **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.** Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 112—122.
6. **Антипин А.С., Фризен В.Э.** Методика определения максимальной энергоэффективности индукционной сушильной установки косвенного нагрева // Промышленная энергетика. 2020. № 7. С. 26—35.

А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru,
А.Е. Сидоров, asidorini@rambler.ru,
З.Р. Закирова, zilyush11@mail.ru, КГЭУ, г. Казань

ПЕРСПЕКТИВА МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТРАСЛЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Известно, что естественное освещение в помещениях является наиболее благоприятным для человека как в физиологическом, так и в психологическом плане. Однако производственная деятельность человека не укладывается в рамки светового дня, а используемые источники света не настолько эффективны, чтобы заменить дневное освещение как по спектральному составу, так и по временной изменчивости [1, 2].

На наш взгляд, наиболее подходящими и нуждающимися объектами в плане модернизации систем освещения на сегодняшний день являются промышленные предприятия, где рабочий процесс может проходить круглосуточно, а доля затрат на промышленное освещение может составлять до 10 % всей потребляемой электроэнергии.

Все виды освещения (естественное, совмещенное, искусственное) активно применяют в производственных зданиях. В помещениях с нехваткой естественного освещения используется совмещенное освещение. В помещениях, где по всей площади проводятся работы одного типа (сварочные, литейные и т.д.), применяют общее освещение. При выполнении зрительных работ высокой точности (фрезерных и т.д.) в местах, где оборудование располагается вертикально и образуются резкие тени, в комбинации с общим используется местное освещение. Использование одного лишь местного освещения недопустимо, так как из-за образования резких теней возникает риск получения травмы.

На рис. 1 показана схема действия системы плавного регулирования освещения.

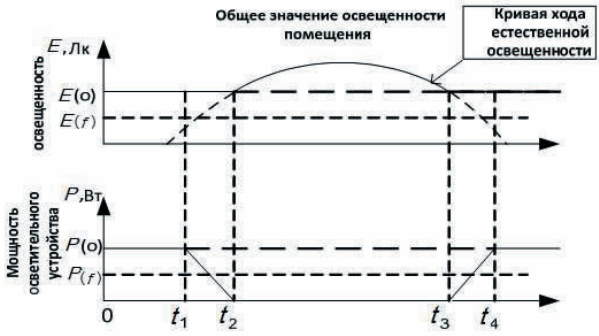


Рис. 1. Схема системы плавного регулирования освещения

Данная схема описывает режим работы системы освещения под управлением фотоэлемента:

0–t_1 — недостаток естественного света, уровень освещенности поддерживается в пределах установленной нормы за счет искусственного освещения;

t_1–t_2 — рост значения естественного света, плавное снижение мощности осветительной установки;

t_2–t_3 — нормы освещенности достигаются за счет одного лишь естественного света;

t_3–t_4 — происходит снижение уровня естественной освещенности при увеличении доли искусственного освещения.

На основании рис. 1 была выявлена возможность повышения экономической эффективности за счет регулировки мощности светодиодных источников освещения (диммирования) [3]. Этот метод позволяет отстраивать

величину искусственного освещения в зависимости от показателей естественной освещенности. Таким образом, мы имеем возможность увеличить срок службы ламп, уменьшить энергозатраты и поддерживать нормированный уровень освещенности.

Для поддержания заданного уровня искусственной освещенности в помещении подразумевается использование в системах управления фотоэлемента, располагающегося внутри помещения и контролирующего создаваемую осветительной установкой освещенность. Уже только одна эта функция обеспечивает экономию энергии за счет отсечки так называемого «излишка освещенности».

Для анализа уже существующих методов по снижению энергозатрат и выявления их недостатков с намерением дальнейшего усовершенствования необходимо применение ряда технических устройств, структурная схема которых показана на рис. 2.

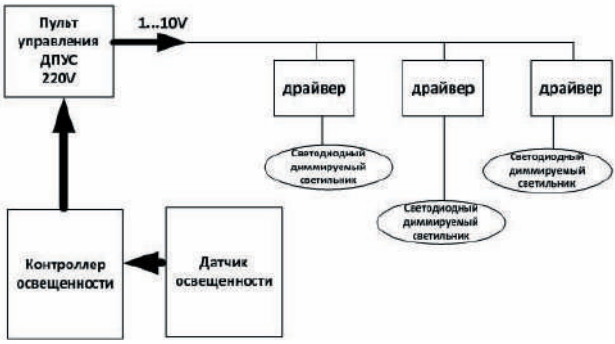


Рис. 2. Структурная схема автоматического управления

Функции схемы автоматического управления следующие:

- плавное изменение освещения в диапазоне от 1 до 100 %;
- автоматическое поддержание режима освещенности на весь срок по заданной технологической программе;
- поддержание заданного уровня освещенности независимо от человеческого фактора и запыленности [5].

Рассмотрим выполняемые функции каждого отдельно взятого элемента системы.

1. Драйвер управляемый необходим для питания, защиты и регулирования светильников. В зависимости от конструкции к одному драйверу могут подключаться один или два светильника. Напряжение питания 220 В, напряжение управления — 1÷10 В.

2. Пульт управления ДПУС (дистанционный пульт управления светом) используется для управления освещением в помещении. Позволяет выполнять функции ручного и дистанционного управления.

3. Контроллер освещенности предназначен для автоматического управления освещением в соответствии с технологической программой.

4. Светильник диммируемый применяется для освещения помещений, имеет возможность изменения яркости [6].

Работа схемы автоматического управления, показанная на рис. 2, осуществляется следующим образом: датчик освещенности получает сведения об уровне освещения в помещении, далее подается сигнал на контроллер, который обрабатывает полученные данные и в зависимости от установленной программы выбирает необходимый режим. Опираясь на характер сигналов, полученных с контроллера, пульт формирует управляющие сигналы, посылаемые на драйвер. На драйвер приходит сразу два значения напряжения: силовой (220 В) и управляющий (от 1 до 10 В). Силовое напряжение изменяется пропорционально значению управляющего напряжения. Световой поток излучаемой лампы прямо пропорционален ее выходному напряжению.

В настоящее время для нормирования уровня освещенности производственных помещений пользуются коэффициентом естественной освещенности (КЕО). Его величина зависит от характера выполняемой работы. Чем выше КЕО, тем выше должна быть освещенность. Для более точного расчета необходимого уровня освещенности в помещениях с нестандартными формами и разной высотой потолка целесообразно определить величину светового потока Ф для освещения конкретного помещения по следующей формуле (лм):

$$\Phi = E\,S\,F,$$

где E — стандартно принятая норма освещенности в люксах согласно СНиП для конкретного помещения; S — площадь помещения ($м^2$); F — коэффициент соответствия, зависящий от высоты потолка помещений (до 2,7 м — 1; от 2,7 до 3 м — 1,2; от 3 до 3,5 м — 1,5; от 3,5 до 5,5 м — 2).

Итак, активное внедрение осветительных приборов на основе светодиодных источников света создает хорошие перспективы для повышения эффективности промышленного освещения за счет всех вышеперечисленных факторов [4].

Перспективы применения светодиодных источников света в осветительных установках промышленных предприятий широки [5, 6]. До недавнего времени светодиодные источники света ассоциировались в основном с индикацией электронных приборов, на сегодняшний день они широко применяются для освещения производственных цехов, складских помещений,

открытых производственных площадок. И хотя применение светодиодных осветительных приборов в производственных помещениях не носит массового характера, тем не менее, имеется большое количество наглядных примеров успешно реализованных подобных проектов. Кроме того, уже сегодня все чаще наблюдается ориентация на применение светодиодных ОП непосредственно на этапе проектирования объектов.

В настоящее время на рынке предлагается достаточно широкая номенклатура промышленных ОП на основе светодиодов. В числе ведущих отечественных и зарубежных производителей промышленных светодиодных светильников можно назвать: АСТЗ, Galad, Viled, Philips, Osram. Основной сдерживающий фактор распространения светодиодных систем — их высокая стоимость по сравнению с системами освещения на основе традиционных источников света [7, 8]. Однако средняя окупаемость при переходе на светодиодные источники света составляет от 1 до 3 лет (в зависимости от количества часов работы осветительной установки). Кроме того, в ближайшие годы прогнозируется снижение цен на светодиодную продукцию, а значит, и ОП на базе светодиодов. По мере их удешевления количество проектов освещения на их основе будет только увеличиваться.

Применение диммирования светодиодных источников в системах освещения позволяет не только повысить комфорт за счет выбора требуемого уровня освещенности, но и продлить срок службы светодиодов, как и в случае с лампочками накаливания.

Таким образом, в перспективе модернизация системы освещения в промышленных отраслях с применением светодиодных источников света и систем автоматического контроля должна улучшить условия труда работников, снизить потребление электроэнергии и, вследствие этого, снизить себестоимость продукции.

Литература

1. **Денисова А.Р., Закирова З.Р.** Энергосберегающие технологии в системах освещения // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019). 2019. С. 48—53.
2. **Денисова А.Р., Закирова З.Р.** Спектральный анализ искусственных источников света // Федоровские чтения — 2018. XLVIII Международная научно-практическая конференция. М.: Издательство МЭИ, 2018. С. 162—165.
3. **Денисова А.Р., Сибгатуллин Э.Г.** Повышение энергоэффективности при использовании системы автоматического регулирования светового потока // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С. 38—39.
4. **Галищева Е.С., Ярмольчик Ю.А.** Создание системы управления освещением для промышленных мест // Труды международной молодежной конференции «Безопасность и охрана труда — 2018». 2018. С. 15—19.
5. **Роженцова Н.В., Биктимиров З.М., Шигапов А.** Формирование политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности в РФ // Научные

аспекты современных исследований. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2017. С. 70—72.
6. **Фетисов Л.В.** Оптимизация систем освещения промышленных предприятий // Материали за X Международна научна-практична конференция «Образованието и науката на XXI век -2014». София. «Бял ГРАД-БГ» ООД. 2014. Т. 12. С. 28—29.
7. **Проблемы** энергосбережения в освещении на промышленных предприятиях / С.А. Микаева, А.С. Микаева, О.Е. Железникова, Л.В. Синицына // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 11. С. 22—25.
8. **Анчарова Т.В., Мартьянов Д.В.** Оценка перспективности применения светодиодных установок в промышленном освещении // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. №7. С. 25—29.

М.В. Володарский, taymax1997@mail.ru,
А.А. Семеренко, semerenko_anastasia@mail.ru,
И.К. Муругов, ilya_murugov@mail.ru,
Ю.В. Кошарная, KosharnyaYV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ — СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

С 2018 г. в соответствии с Национальной программой «Цифровая экономика РФ» [1, 2] на территории России стала активно развиваться тенденция цифровизации всех отраслей, в том числе и энергетики. Такими примерами могут являться цифровые подстанции, автоматические системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), системы управления энергопотреблением SCADA и др. В связи с этим для нормирования параметров используемых технических средств и технологий требуется создание актуальной нормативной базы.

Первым шагом к формулированию указанных требований стал выход Федерального закона № 522-ФЗ [3], который внес дополнения в статью 13 закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении…» и в закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» в части организации учета используемой электрической энергии. Было введено понятие «интеллектуальная система учета электрической энергии (мощности)», определяемая как совокупность функционально объединенных компонентов и устройств, предназначенная для удаленного сбора, обработки и передачи показаний приборов учета электроэнергии, обеспечения информационного обмена и хранения переданных показаний, удаленного управления компонентами и устройствами системы, а также предоставления информации о результатах измерений и параметрах электроэнергии.

Таким образом, в ближайшие годы в стране должны быть задействованы интеллектуальные системы учета электроэнергии. Ранее граждане должны были сами купить и установить счетчик и отвечать за его функционирование. Но с 1 июля 2020 г. за это должны отвечать сетевые организации или гарантирующие поставщики. «Умные» счетчики с удаленным доступом позволят потребителям в режиме онлайн отслеживать объем поставляемых энергоресурсов и уровень их потребления. Граждане смогут снимать показания через компьютер или телефон, а контролерам не придется заходить в каждый дом. Отдельным неплательщикам будут дистанционно ограничивать режим энергопотребления, а не распределять риски на всех потребителей, как сейчас.

Существующие системы учета пока сохраняются, но их запретят модернизировать. При замене счетчиков, а также при вводе в эксплуатацию многоквартирных домов должны быть установлены приборы учета с возможностью доступа к интеллектуальной системе. С 1 января 2023 г. за нарушения при предоставлении доступа гарантирующие поставщики и сетевые организации могут быть оштрафованы.

Что касается промышленных и прочих потребителей, то в целях реализации задач цифровизации и внедрения интеллектуальных систем учета электрической энергии и мощности в этом сегменте рынка было выпущено Постановление Правительства РФ № 890 от 19.06.2020 г. [4], описывающее взаимоотношения между сетевыми организациями и потребителями при построении системы интеллектуального учета электроэнергии, а также предъявляющее ряд технических требований по ее устройству. Рассмотрим данное постановление, сравнивая его с требованиями других нормативных актов, таких как правила функционирования розничных рынков электроэнергии [5].

В постановлении разработаны и закреплены правила предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности), определен перечень функций как самих интеллектуальных систем учета, так и приборов учета электроэнергии, которые могут быть присоединены к этой системе, и требования к ним.

Указанный документ вводит более жесткие требования к классу точности прибора учета. Для соответствия требованиям, вне зависимости от максимальной мощности потребителя, счетчик прямого включения должен иметь класс точности 1,0 и 2,0 по активной и реактивной энергии соответственно, 0,5 и 1,0 для измерений трансформаторного включения, а также способность измерять мощность в двух направлениях. Прибор учета должен обеспечивать хранение профиля принятой и отданной активной и реактивной энергии с заданным периодом интегрирования в течение 90 дней и

хранить данные по активной и реактивной мощности расчетного периода за 36 периодов.

Согласно постановлению [4], для соответствия интеллектуальной системе учета электроэнергии счетчики должны объединяться в одну информационную сеть (обычно сеть «Интернет»), с использованием отечественного оборудования, иметь возможность передавать данные о мощностях, параметрах сети, показателях качества электроэнергии и ошибках на центральный сервер, а потребители и сетевые организации с использованием защищенных каналов связи подключаться к центральному серверу и просматривать или использовать необходимую информацию. Важно отметить, что необходимо сохранять конфиденциальность хранимых, передаваемых и получаемых данных, ограничивать их просмотр посторонними лицами, не принимающими участия в управлении режимами работы электросети и не являющимися собственниками данного прибора учета.

Что касается объектов малой генерации, имеющих на своей территории субабонентов, предприятиям придется самостоятельно проектировать и реализовывать интеллектуальную систему учета электроэнергии. Это приведет к дополнительным финансовым расходам, но будет первым шагом к автоматизации процесса производства и сбыта электроэнергии.

Уже сейчас на российском рынке приборов учета есть современные модели разных производителей, которые отвечают приведенным выше требованиям. Примеры таких приборов учета приведены в таблице. цены на приборы учета сильно отличаются, но технические характеристики при этом остаются схожими.

Приборы учета электроэнергии, соответствующие требованиям интеллектуальных систем учета

Производитель	Марка прибора учета	Средняя рыночная цена, тыс. руб
Нева	MT 315 0.5 AR E4BSP25	130
Энергомера	CE301 S31 043 JAVZ	5
Альфа	A1805RAL-P4G-DW-4(3)	50
Меркурий	234 ART2-03 (D)PR	12

Таким образом, для всех проектов, реализуемых после 2022 года, необходимо закладывать новые информационные структуры для учета электроэнергии. Нельзя не заметить, что реализация такой интеллектуальной системы является первым шагом к построению автоматизированных систем управления технологическим процессом (SCADA) предприятий-потребителей электроэнергии. При этом остается открытым вопрос о том, как будет происходить цифровизация на всей территории России, особенно в отдаленных районах,

где нет устойчивого канала связи для передачи данных в режиме реального времени. С другой стороны, по данным, которые будет передавать прибор учета, можно осуществлять контроль показателей качества электроснабжения. Это поможет проще и оперативнее решать проблемы с провалами напряжения в отдаленных населенных пунктах (деревнях и селах), что является достаточно актуальной проблемой на сегодняшний день.

Литература

1. **Указ** Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
2. **Постановление** Правительства РФ от 02.03.2019 г. № 234 (ред. от 21.08.2020 г.) «О системе управления реализацией национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации».
3. **Федеральный** закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации».
4. **Постановление** Правительства РФ от 19 июня 2020 г. № 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)».
5. **Постановление** Правительства РФ от 04.05.2012 г. № 442 (ред. от 30.04.2020 г.) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии».

СЕКЦИЯ 3

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

М.С. Ершов, msershov@yandex.ru,
И.А. Мелик-Шахназарова, irinams@yandex.ru,
А.С. Малахов, malahov.rsu@mail.ru,
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проблема надежного электроснабжения предприятий является одной из важнейших на предприятиях нефтегазовой отрасли. Эти предприятия отличаются большой потребляемой мощностью, большой значимостью выпускаемой продукции как в стоимостном, так и в материальном выражении. Кроме того, предприятия нефтегазовой отрасли обычно относятся к непрерывным производствам, перерывы в электроснабжении которых влекут за собой значительные убытки и сопровождаются большим временем восстановления технологических процессов [1].

Наличие кратковременных нарушений электроснабжения неизбежно на любом предприятии, однако необходимость минимизации таких нарушений и их последствий, особенно для систем смешанного типа, содержащих и синхронные, и асинхронные электроприводы, продолжает оставаться актуальной. Решение этих вопросов идет как по пути оптимизации структуры электроснабжения, так и по пути настройки систем релейной защиты, чему и посвящена настоящая статья.

Задачей данной работы является создание цифровой модели распределительной сети, максимально приближенной к реально существующей системе, отображающей возможные режимы работы физического двойника в режимах автоматического повторного включения и самозапуска асинхронных и синхронных двигателей при кратковременных нарушениях электроснабжения. Ниже представлены результаты моделирования характерных режимов, связанных с авариями в электрических сетях. Схема исследуемой системы представлена на рис. 1.

Моделирование режима токов короткого замыкания (ТКЗ) на шинах системы электроснабжения (СЭС). При решении данной задачи проверяется корректность работы защитных функций максимальной токовой защиты мгновенного действия и с выдержкой времени, а также защиты от

потери питания секций шин с применением устройства аварийного включения резерва (АВР) цифровых терминалов релейной защиты [2].

Для проверки работы системы релейной защиты и автоматики (РЗиА) в режиме короткого замыкания на АД на примере цифровых реле фирмы Schneider Electric серии SEPAM 40 (реле К1, К5, К6 и коды стандарта ANSI указаны на рис. 1) проведено моделирование в программном комплексе ETAP (ПК «ETAP»).

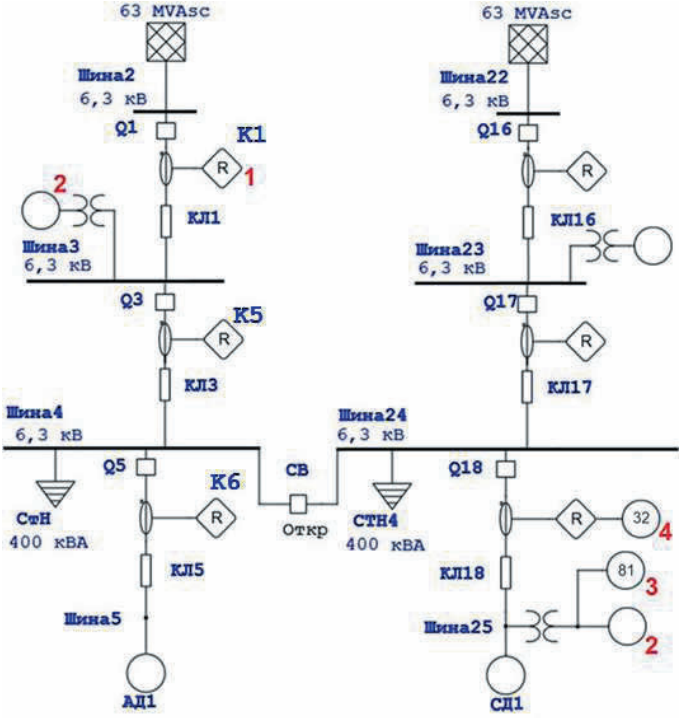


Рис. 1. Исследуемая схема электроснабжения. Согласно стандарту ANSI C37.2: *1* — 51 (50), максимальная токовая защита с выдержкой времени (мгновенная); *2* — 91, реле напряжения (для контроля напряжения на шинах); *3* — 81L, защита минимальной частоты; *4* — 32P, максимальная направленная защита активной мощности

Микропроцессорное устройство релейной защиты SEPAM 40 используется в качестве устройства защиты, подключаемого во вторичную цепь, реализующего токовую защиту мгновенного действия (токовая отсечка — ТО) и максимальную токовую защиту с выдержкой времени (МТЗ). Параметры системы с питанием от двух независимых источников и нагрузкой в виде асинхронного и синхронного электродвигателей (АД1, СД1), а также

статической нагрузкой (СтН) представлены в табл. 1 (данные отражены для одной ветви, так как обе ветви идентичны).

В результате моделирования были рассчитаны и заданы токовые уставки, определены выдержки времени МТЗ для замедления работы защиты с целью обеспечения селективности действия защиты последующего элемента по отношению к защитам предыдущих элементов [3].

Таблица 1

Параметры системы электроснабжения

Элемент	Характеристика	Параметры
Источник	Полная мощность, МВ·А	63
	Номинальное напряжение системы U_c, кВ	6,3
	$I_{к.з}$, кА	5,77
КЛ1, КЛ3	Кабельные линии 6 кВ	ПвВнг(А)-LS (3×50), 300 м
КЛ5	Кабельная линия 6 кВ	ПвВнг(А)-LS (3×50), 100 м
Статическая нагрузка (СтН)	Номинальная мощность (динамическая нагрузка отсутствует), кВ·А	400
Асинхронный электродвигатель (АД1)	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	300
	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	6,3
	Номинальная частота вращения n, об/мин	1480
Синхронный электродвигатель (СД1)	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	300
	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	6,3
	Номинальная частота вращения n, об/мин	1500

Для этого выдержка времени МТЗ (время срабатывания) последующей защиты К1 выбирается большей, чем у защит предыдущих элементов К5 и К6 согласно ступени селективности:

$$t_{с.з.посл} = t_{с.з.пред} + \Delta t .$$

Выдержка времени ТО не задается, так как данная защита срабатывает мгновенно. Данные расчета уставок и выбора выдержки времени МТЗ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Карта уставок

Защита	Токовая уставка		Выдержка времени Δt, с
	ТО	МТЗ	
К6	229	45	0,3
К5	—	90	0,6
К1	—	99	0,9

Проверка самозапуска асинхронной машины. Имитируется кратковременный перерыв питания одной из шин СЭС (рис. 1). Самозапуск моделируется за счет настройки встроенных реле напряжения и таймера.

Самозапуск асинхронной машины происходит при достижении минимального уровня напряжения и осуществляется с помощью реле напряжения и встроенного таймера, обеспечивающего временную задержку, по истечению которой и выполняется повторный пуск вращающегося двигателя.

В процессе протекания аварийного режима наблюдается потеря напряжения на питающих секциях шин (шины 3 и 4), отключенных действием на выключатели системы РЗиА, и выбег АД1. За время восстановления питания частота вращения до разгона снизилась до 350 об/мин.

При работе блока АВР возобновляется питание секции шин потребителей (шины 4 и 24), осуществляется разбег АД1. Из-за работы динамической нагрузки в виде СД1 напряжение на шинах меньше, чем в установившемся режиме, находится в допустимых пределах (ГОСТ 29322—2014), вследствие чего падение скорости синхронного двигателя СД1 составляет 5 % номинального значения.

Падение напряжения на шинах соседней ветви характеризуется переключением нагрузки. Падение на шинах 22 и 23 — на 3 и 4 % соответственно. События, происходящие за время моделирования, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Самозапуск АД1

Время, с	Событие
0,4	Установившийся режим работы ЭТС. Напряжение на шинах 4 и 24 составляет около 97 % номинального значения, частота сети 50 Гц. Частота вращения АД1 1480 об/мин, СД1 1500 об/мин
1,01	Трехфазное короткое замыкание на шине 3
1,11	Отключение вводного выключателя Q1
1,41	Через ступень селективности срабатывает на отключение выключатель Q3. Выключатель Q5, согласно выдержки времени остается в работе во время останова АД1
2,41	Далее запускается описанная выше схема автоматики, действующая на включение секционного выключателя СВ
8,54	Успешный самозапуск АД1. Выход на нормальный режим работы

Проверка самозапуска синхронной машины. Так как ток самозапуска может почти в 2 раза превышать пусковой, в цифровых реле фирмы Schneider Electric серии SEPAM 40 для гашения поля ротора моделируется программируемая функция ресинхронизации [4], которая в режиме самозапуска позволяет ограничить броски тока практически номинальными значениями.

В данной работе самозапуск синхронной машины осуществляется за счет программируемой функции ресинхронизации [5, 6] для цифровых реле SEPAM 40, где помимо реле напряжения используется реле частоты и реле обратной мощности. Последнее необходимо, чтобы синхронная машина не смогла перейти в генераторный режим и тем самым не подпитывала место короткого замыкания. Принцип работы данной функции основан на действии пускового органа, находящегося в устройстве АВР. Пусковой орган состоит из датчика, замеряющего частоту питающей сети на секции шин, и реле обратной активной мощности, установленных в цифровых терминалах SEPAM 40.

Пуск системы АВР начинается при одновременном выполнении условий снижения частоты питания и реверса активной мощности синхронной машины. С выдержкой времени около 0,5 с через блок ресинхронизации подается сигнал к системе возбуждения СД1, которая обеспечивает гашение поля ротора. После чего вводной выключатель СШ выключается и включается секционный выключатель, обеспечивая питанием неаварийную секцию шин.

Если снизить значения напряжения до $(0{,}5 \div 0{,}6)U_{\text{ном}}$, при котором допустимо несинхронное включение, то полностью гасить поле ротора будет необязательно.

В аварийном режиме трехфазного короткого замыкания шины 23 наблюдается потеря напряжения на секциях питающего фидера (шины 23 и 24), отключенных действием системы РЗиА, а также торможение исследуемой синхронной машины СД1.

При работе блока АВР возобновляется питание от соседней секции шин, тем не менее продолжается снижение напряжения и частоты сети, падение скорости машины. В результате СД1 не смог запуститься в работу при вращающемся двигателе. Машина полностью останавливается.

События, происходящие за время моделирования, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Повторный пуск СД1

Время, с	Событие
0,40	Установившийся режим работы ЭТС. Показатели системы аналогичны показателям предыдущего опыта
1,01	Трехфазное короткое замыкание на шине 23
1,11	Отключение вводного выключателя Q16. Пуск выдержки времени системы АВР перед заданием сигнала в блок ресинхронизации
1,30	Фиксация снижения частоты питающей сети и реверса обратной мощности
1,41	Через ступень селективности срабатывает на отключение выключатель Q17. Выключатель Q18 остается в работе во время останова СД1
2,41	Аналогично предыдущему опыту при подаче напряжения через секционный выключатель происходит небольшое падение скорости АД1 — до 1470 об/мин
3,40	Падение напряжения на двигателе и уменьшение частоты вращения достигают критического значения — 45 % и 44 Гц соответственно. Неуспешный самозапуск синхронного двигателя СД1

Выводы. По результатам моделирования самозапуска СД установлено, что при снижении напряжения на питающей секции шин до 0,45 о.е. самозапуск оказывается неуспешным. Для реализации самозапуска предложено использование системы быстродействующего аварийного включения резерва (БАВР). Устройство БАВР позволит сократить полное время переключения на резервный ввод до 50 мс [7].

Таким образом, моделирование режимов ТКЗ позволяет верифицировать существующие уставки РЗиА с последующей корректировкой и введением дополнительных защит; выявлять «узкие» места системы защиты; снизить стоимость проектных работ благодаря определению наиболее оптимальных вариантов на ранних стадиях проектирования.

Литература

1. **Жилин Б.В**. Управление выбегом электродвигателей для обеспечения успешного самозапуска [Электронный ресурс] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 11. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-vybegom-elektrodvigateley-dlya-obespecheniya-uspeshnogo-samozapuska
2. **Киреева Э.А., Цырук С.А.** Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. 5-е изд. М.: Академия, 2016. 286 с.
3. **Соловьев А.Л.** Методические указания по выбору характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов серии SEPAM производства Schneider Electric [Электронный ресурс] // Техническая коллекция Schneider Electric. 2006. Вып. 3. 73 с. Режим доступа: https://netkom.by /docs/N03-Metodika-rascheta-ustavok-zashchit-SEPAM.pdf

4. **Курганов В. В., Крышнев Ю. В., Каптуров О. П.** Повышение надежности автоматического управления самозапуском синхронных двигателей цифровым реле Sepam 2000 [Электронный ресурс] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2009. № 1. Режим доступа: https://elib.gstu.by/handle/220612/2260
5. **Защита** электрических сетей SEPAM серий 20, 40 с расширенными функциями, 60 и 80 : Цифровые реле защиты : каталог [Электронный ресурс] // Schneider Electric. 2012. 288 с. Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=sepam_20-40-60-80.pdf&p_Doc_Ref=MKP-CAT-SEPAM-12
6. **Amana M.M., Khanb M.Q/A., Qazi S.A.** Digital Directional and Non-Directional Over-Current Relays (Modeling and Performance Analysis) [Электронный ресурс] // NED University Journal of Research. Vol. VIII, № 2. December 2011. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/258540144_Digital_Directional_and_Non-Directional_Over_Current_Relays_Modelling_and_Performance_Analysis
7. **Гамазин С.И., Цырук С.А., Куликов А.И., Садыкбек Т.А., Жармгамбекова М.С., Еркельдесова Г.Т.** Устройство быстродействующего микропроцессорного автоматического включения резерва нового поколения // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 43—47.

М.С. Ершов, msershov@yandex.ru,
М.Ю. Чернев, makcchernev@gmail.com,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва,
В.В. Чумаченко, chumachenko_vv@rtsoft.ru, АО «РТСофт», Москва

ОБЗОР И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Анализ роста нелинейной нагрузки и влияния на качество электроэнергии в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий. Проблема обеспечения надлежащего качества электрической энергии стоит давно и усиливается по мере расширения применения полупроводниковой преобразовательной техники в промышленных системах электроснабжения (СЭС). Особенно остро проблема стоит в последнее время в связи с массовым внедрением низковольтных и высоковольтных частотно-регулируемых асинхронных приводов (ЧРП), что характерно и для предприятий нефтеперерабатывающей отрасли. Это обусловлено модернизацией производственной инфраструктуры нефтеперерабатывающих предприятий (НПП), включающей в себя операции по транспортировке жидкости, дозировке химических реагентов, вентиляции и поддержанию заданного температурного режима. Положительный эффект от внедрения ЧРП достигается за счет автоматизации режимов работы технологического

оборудования, повышения энергоэффективности производственных процессов, а также качества выпускаемой продукции [1, 2].

Анализ хода модернизации одного из нефтеперерабатывающих предприятий, расположенного в центральном регионе России, показал, что за период с 2006 по 2017 г. осуществлено внедрение частотно-регулируемых электроприводов, общая установленная мощность которых превышает 25 МВт. Это составляет 25 % фактически потребляемой активной мощности предприятия. При модернизации использовались электроприводы разных производителей (Vacon, Schneider-Electric, Siemens, ABB, Danfoss) мощностью от 0,37 до 1700 кВт.

График внедрения ЧРП по годам в процессы технологических установок НПП, детальное описание которых приведено в [3], представлен на рис. 1. Наибольшая установленная мощность внедренных ЧРП, равная 5517 кВт и 5897 кВт, приходится соответственно на 2013 и 2014 гг.

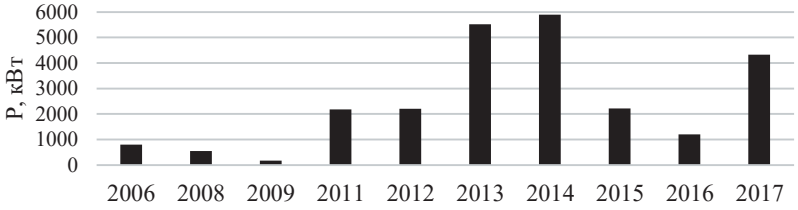


Рис. 1. Хронология внедрения ЧРП по установленной мощности

Распределение доли установленной мощности $S_{ЧРП}$ по классам напряжения представлено на рис. 2. Как видно из данного рисунка, преобладает установка низковольтных ЧРП (93 %).

Внедрение высоковольтной преобразовательной техники в СЭС НПП происходит гораздо медленнее из-за их высокой стоимости и сложности реализации технических решений для обеспечения гибкости ведения технологического процесса переработки нефтепродуктов приводимыми механизмами [4].

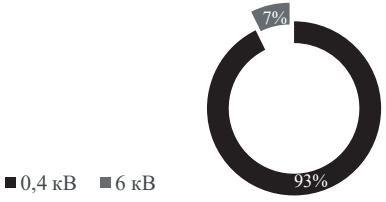


Рис. 2. Распределение ЧРП по классу напряжения на НПП

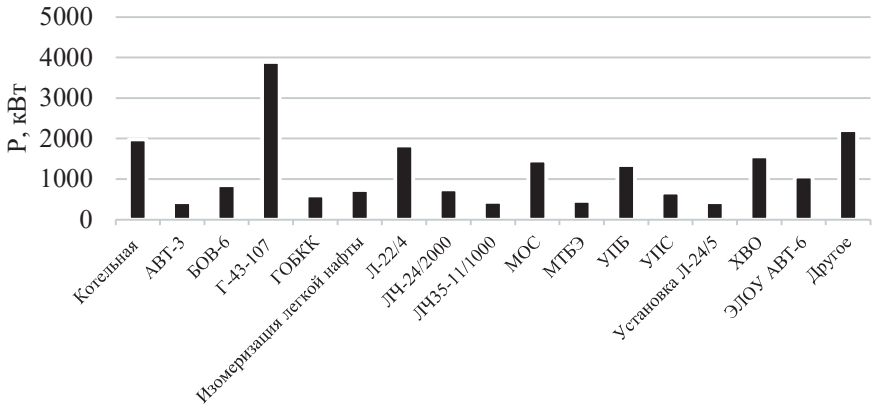


Рис. 3. Сравнение установленной мощности ЧРП технологических установок НПП

Анализ распределения установленной мощности нелинейных электроприемников между технологическими установками НПП представлен на рис. 3.

Из данного графика следует, что на установках АВТ-3, ГОБКК, ЛЧ-35-11/100, МТБЭ мощность ЧРП менее 500 кВт. На технологических установках БОВ-6, ГОБКК, изомеризации легкой нафты и УПС — в диапазоне 500—1000 кВт. На МОС, УПБ, ЭЛОУ АВТ-6 значения установленной мощности ЧРП находятся в диапазоне 1000—1500 кВт. На технологических установках «Котельная», Л-22/4, ХВО — в диапазоне 1500—2000 кВт, на Л-24/5 и ЛЧ-24/2000 — в диапазоне 2000—2500 кВт. Наибольшая установленная мощность ЧРП — 3893 кВт — на технологической установке Г-43-107, которая предназначена для производства компонентов высокооктановых бензинов «Евро-5».

Наибольшее значение соотношения установленной мощности ЧРП к мощности трансформатора $S_{ЧРП}/S_{Т}$, как видно на рис. 4, также было выявлено для технологической установки Г-43-107.

Высокая доля установленной мощности ЧРП и отсутствие строго формализованного алгоритма и методик для проверки электромагнитной обстановки на базе отечественных стандартов при его внедрении и эксплуатации в распределительных сетях привели к неблагоприятной электромагнитной обстановке на НПП, вызвавшей повреждение эксплуатируемого дорогостоящего электрооборудования.

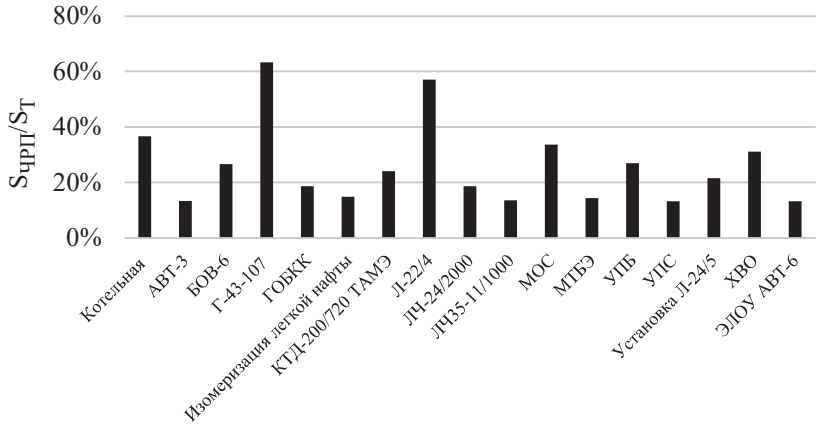


Рис. 4. Сравнение установленной мощности ЧРП технологических установок НПП по отношению к мощности трансформаторов

Обзор показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки и элементов системы электроснабжения нефтеперерабатывающих производств. В настоящее время основным стандартом по нормированию показателей качества ЭЭ в СЭС отечественных НПП является ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества ЭЭ в СЭС общего назначения». Настоящий стандарт предназначен для нормирования показателей качества электроэнергии (КЭ), связанных с характеристиками напряжения электропитания, относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, гармоническим составляющим напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения.

ГОСТ 32144–2013 устанавливает показатели и нормы КЭ в точке передачи ее пользователям ЭС низкого, среднего и высокого напряжения СЭС общего назначения переменного тока частотой 50 Гц и вводит показатель нормирования гармонических составляющих напряжения в основных узлах нагрузки является суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage [THD(U)]:

$$\text{СКГСН} = \text{THD}(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1}} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где n — порядок гармоники; U_1 — номинальное напряжение электропитания, В; U_n — напряжение гармонической составляющей, В.

Необходимо отметить, что отечественный стандарт ГОСТ 32144–2013 не нормирует высшие гармонические составляющие токов, являющиеся первопричиной возникновения высших гармонических составляющих напряжения, а нелинейные искажения тока в СЭС НПП рассматриваются через гармонические составляющие напряжения [5, 6].

На основании проведенных авторами исследований и опыта эксплуатации установлено, что анализ гармонических искажений, основанный на данном показателе, в большинстве случаев не позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию электрооборудования в СЭС НПП, содержащих ЧРП. Это свидетельствует о необходимости определения дополнительных показателей нормирования гармонических составляющих тока для ветвей нагрузки, а также для элементов системы электроснабжения НПП. Предлагается использовать знания и международные стандарты, для дополнения отечественных стандартов и исключения описанных выше недостатков.

В международных требованиях для нормирования гармонических искажений тока в ТОП СЭС промышленного предприятия для оценки влияния гармонических токов на силовое электрооборудование зарубежный стандарт IEEE Std 519–2014 [7] вводит понятие total demand distortion (TDD):

$$\mathrm{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\ \%\,, \qquad (2)$$

где I_h — ток n-й гармонической составляющей, А; I_L — значение максимального продолжительно потребляемого тока нагрузки, А.

Кроме основных показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов и ветвей нагрузки СЭС НПП, необходимы также индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов систем электроснабжения (трансформаторов, кабельных линий, устройство компенсации реактивной мощности, асинхронных двигателей), дополняющих оценку электромагнитной обстановки системы электроснабжения.

Так, для оценки допустимой загрузки асинхронных электродвигателей с учетом дополнительных потерь, вызванных несинусоидальностью напряжения, стандарт ANSI/NEMA MG 1–2016 «Standard for Voltage Stress in Motors and Drives» [8] вводит Harmonic Voltage Factor (HVF), или взвешенный коэффициент искажения напряжения двигателя (ВКИНД):

$$\text{ВКИНД} = \sqrt{\sum_{n=2}^{13} \frac{(U_n)^2}{n}}\,. \qquad (3)$$

В качестве критерия определения перегрузки конденсаторных батарей токами высших гармоник производитель регуляторов KMB systems серии NOVAR 24xx УКРМ [9] вводит коэффициент гармонической нагрузки конденсаторов (КГНК), или capacitor harmonic load factor (CHL):

$$\text{КГНК} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{nU_n}{U_{\text{ном}}}\right)^2}\ 100\ \%. \tag{4}$$

Для оценки эффекта нагрева кабельной линии и ее максимально допустимого тока нагрузки (I_{RMSeff}) с учетом несинусоидальности тока O'Connell K. в своей работе [100] предложил показатель Heating Derating Factor (HDF):

$$\text{HDF} = \sum_{n=1}^{N}\left[\left(\frac{I_n}{I_{RMS}}\right)^2 \frac{R_n}{R_1}\right], \tag{5}$$

где I_{RMS} — действующее значение тока нагрузки, А; R_1 — активное сопротивление кабеля на промышленной частоте, Ом; R_n — сопротивление проводника на частоте *n*-й гармоники, Ом.

Для расчета данного коэффициента необходимо рассчитать активное сопротивление кабеля для каждой *n*-й гармоники [11]:

$$R_n = R_1\sqrt{n}\,. \tag{6}$$

Согласно [100] значение рабочей температуры кабельной линии в условиях перегрузки токами высших гармоник рассчитывается как

$$\theta_{op} = \theta_A + 40\ \text{HDF}\,, \tag{7}$$

где θ_A — температуру окружающей среды, °С; θ_{op} — рабочая температура кабельной линии, °С.

Для оценки негативного влияния несинусоидальности тока на сухие трансформаторы согласно [12] используется коэффициент *k-factor*, который позволяет проводить анализ допустимости фактической загрузкой трансформатора с учетом потерь на вихревые токи на основе методики, предложенной компанией ABB [13]:

$$k\text{-}factor = \sum_{n=2}^{N}\left(\frac{I_n}{I_{rms}}\right)^2 n^{1.5}\,. \tag{8}$$

На основании значения коэффициента *k-factor* согласно табл. 1 рассчитывается допустимая мощность трансформатора с учетом несинусоидальности тока [133]:

$$S_{\text{т}\,k\text{-}factor} = \frac{S_{\text{т}}}{k_{\text{з}\,k\text{-}factor}}, \qquad (9)$$

где $S_{\text{т}}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $S_{\text{т}\,k\text{-}factor}$ — максимальная допустимая мощность силового трансформатора с учетом несинусоидальности тока, кВ·А; $k_{\text{з}\,k\text{-}factor}$ — коэффициент допустимой загрузки сухого трансформатора с учетом несинусоидальности тока.

Таблица 1

Соответствие между *k-factor* и $k_{\text{з}\,k\text{-}factor}$

k-factor, о.е.	2	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
$k_{\text{з}\,k\text{-}factor}$, о.е.	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,12	1,15	1,17	1,19	1,2	1,22

Для безопасной эксплуатации силового электрооборудования в СЭС НПП, содержащих ЧРП, его производители устанавливают собственные требования к уровню СКГСН в зависимости от технических характеристик их оборудования. Так, например, для сухого трансформатора с литой изоляцией Trihal стандартного исполнения производства Schneider-Electric согласно требованиям производителя, значение $\text{СКГСН}_{\text{Т}}$ не должно превышать 5 %. А для УКРМ классического исполнения без фильтрующих дросселей компанией ООО «КВАР» значение $\text{СКГСН}_{\text{УКРМ}}$ не должно превышать 1 %.

Выводы

1. На основании проведенного анализа тенденций роста и распределения установленной мощности нелинейных электроприемников нефтеперерабатывающего производства между технологическими установками НПП выявлены системы электроснабжения с наиболее плохой электромагнитной обстановкой.

2. Предложен расширенный набор показателей качества электроэнергии, который обобщает отечественный и международный опыт обеспечения надлежащего уровня электромагнитной совместимости в системах электроснабжения НПП и способствует более точной оценке электромагнитной обстановки в практике эксплуатации СЭС НПП.

Литература

1. **Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А.** Электроснабжение нефтегазовых предприятий: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2008. 81 с.
2. **Беляев В.Л., Радимов С.Н.** Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // Электромеханические и энергосберегающие системы. 2012. № 3. С. 469—471.
3. **Автоматизация** процессов нефтепереработки / А.Д. Ермоленко, О.Н. Кашин, Н.В. Лисицын и др.; под ред. В.Г. Харазова. СПб.: Профессия, 2012. 304 с.
4. **Скакунов Д.А.** Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4—6 кВ нефтеперерабатывающих предприятий: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03. Красноярск, 2010. 150 с.
5. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Анализ электромагнитной совместимости при принятии решения о подключении частотно-регулируемых электроприводов // Фёдоровские чтения − 2019: XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 119—127.
6. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Определение и оценка показателей эмиссии гармонических составляющих токов от низковольтных асинхронных частотно-регулируемых приводов // Изв. вузов. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 1. С. 59—64.
7. **IEEE 519–2014** IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. URL: https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/standard/519-2014.html
8. **ANSI/NEMA MG 1–2016** Standard for Voltage Stress in Motors and Drives.
9. **NOVAR 24xx** Three-Phase Power Factor Controllers & Multimeters : Operating Manual [Electronic resource] // KMB systems. 2014. № 5. URL: http://www.za-vodny.cz/data/manualy_novar/novar2418.pdf
10. **O'Connell K.** Heating Effects Through Harmonic Distortion on Electric Cables in the Built Environment [Electronic resource] / Dublin Institute of Technology. 2013. URL: https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1058& context=engdoc._27
11. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
12. **C57.110–2018** IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
13. **Loading** transformers with non sinusoidal currents : K Factor [Electronic resource] // ABB. 2007. URL: https://library.e.abb.com/public/be0cadaf6a6708fcc1257792005162cb/Loading_transformers_with_non_sinusoidal_currents_KFactor.pdf

О.В. Крюков, o.v.kryukov@mail.ru,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва,
А.В. Саушев, saushev@bk.ru, ФГБОУ ВО «ГУМРФ
им. адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург

МЕТОДОЛОГИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Работа магистральных газопроводов (МГ) основана на оптимальных режимах при максимальном использовании их пропускной способности при минимальных энергозатратах [1—4], которые характеризуется неравномерностью подачи газа на компрессорных станциях (КС) в течение года (месяца, суток), несмотря на использование научных методик оптимизации [5—7].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов необходимо поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе и снижать температуру перекачиваемого газа [8—10]. При этом электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) должны быть частотно-регулируемыми и инвариантными к возмущениям с отрицательной обратной связью по частоте вращения (давлению газа) [11—14].

Традиционные методы формализации процессов в ЧРП. Наиболее удобным методом анализа статических и квазистатических САУ частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) с точки зрения электромагнитных и электромеханических процессов является аппарат преобразования Фурье и частотных характеристик [1, 15]. Преобразование Фурье сигнала $f(t)$ можно трактовать как его разложение по базису комплексных экспонент $e^{-j\Omega t}$ для всех частот Ω на интервале $(-\infty, +\infty)$:

$$F(\Omega) = \int f(t)\, e^{-j\Omega t}\, \mathrm{d}t\ . \qquad (1)$$

Комплексная функция $F(\Omega)$ характеризует частотный спектр сигнала во всем диапазоне времени. Для нестационарного сигнала частотный спектр, полученный в разных отрезках времени, может существенно отличаться. Изображение функции Фурье $F(\Omega)$ по (1) не имеет временно́й координаты и не содержит информации, когда в нестационарном сигнале появились и исчезли составляющие разных частот. Одним из решений этой проблемы является переход к оконному преобразованию Фурье:

$$F(\Omega,\, \tau) = \int f(t) W(1-\tau)\ e^{-j\Omega t}\, \mathrm{d}t\ , \qquad (2)$$

где $W(1 - \tau)$ — функция-окно.

Преобразование Фурье находится от произведения сигнала $f(t)$ на окно, которое занимает разные положения во времени в соответствии со значением параметра τ. Результат преобразования $F(\Omega, \tau)$ по (2) имеет как частотную, так и временную координату, позволяя отслеживать изменение частотного спектра во времени. Однако из-за фиксированной ширины окна эта информация может быть существенно искажена. Слишком узкое окно позволяет получить высокое разрешение по времени, но теряет важные особенности частотного спектра. Иначе оно не локализует информацию о спектре во времени.

Основы вейвлет-преобразования для САУ электроприводами. Более информативный подход к анализу нестационарного сигнала обеспечивает вейвлет-преобразование (ВП) (*wavelet*). При этом сигнал $f(t)$ раскладывается по базису функций, называемых вейвлетами:

$$\Psi(t) = \Psi\left[(t-\tau)/\alpha\right]. \tag{3}$$

Непрерывное вейвлет-преобразования сигнала $f(t)$ выполняется по

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|\infty|}} \int f(t)\ \Psi(t-\tau)/\alpha\ \mathrm{d}t\,. \tag{4}$$

В результате ВП (4) получается двухмерная функция — вейвлет-образ $f(t)$. Параметр масштаба α пропорционален периоду колебаний вейвлета, а параметр τ — его временной сдвиг. Значение $W(\alpha, \tau)$ получается тем больше, чем заметнее сигнал $f(t)$ коррелирует с вейвлетом при α и τ. При этом в сигнале сильнее выражена составляющая частоты, соответствующая α в момент τ.

Базисные функции вейвлетов, если они определены на пространстве $\boldsymbol{L^2(R)}$ (пространство комплекснозначных функций $f(t)$ на прямой с ограниченной энергией), колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к 0 по мере увеличения абсолютного значения аргумента.

В задачах анализа ЧРП для данного сигнала $f(t)$ исследуется его вейвлет-образ (ВО), а в задачах синтеза ВО формируется регулятором из ВО сигнал ошибки, чтобы получить желаемый сигнал $f(t)$. В САУ временной закон управления получается на основе некоторого правила ВП сигнала. Интерес имеет непосредственная обработка спектров сигналов при цифровой реализации регуляторов.

Известно, что сигнал датчика скорости содержит полезный сигнал и совокупность помех. Если изменять полосу пропускания регулятора скорости на время переходного процесса приема-сброса нагрузки или возникновения колебаний, то получается доказанный на практике эффект.

Идея перестраиваемого регулятора нашла практическое воплощение в турбокомпрессорных и вентиляторных установках ЭГПА МГ с ПИ-регулятором скорости. При этом коэффициент П-части регулятора устанавливается в зависимости от системных отклонений, а коэффициент его И-части зависит от скорости, улучшая динамику и сглаживая все стохастические выбросы.

Дискретное ВП и кратномасштабный анализ. Очевидно, что идея использования ВП для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима при их обработке на ПК). Профессору И. Добеши удалось найти метод, позволяющий построить серию ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов, и алгоритм, реализующий быстрое ВП на дискретных данных (алгоритм Малла).

Дискретизация параметров α и τ в (4) происходит не равномерно, а на логарифмической сетке через степени 2. Связь непрерывных и дискретных вейвлетов (3) выражается значениями $\alpha = 2^j$; $\tau = K \cdot 2^j$, где j и K — целые числа, а τ — дискретное время. Разложение дискретного сигнала $f(t)$ по дискретному базису $\Psi_{jK}(t)$ является дискретным ВП, а ВО этого сигнала есть двумерная матрица коэффициентов. Первым ортогональным дискретным вейвлетом является вейвлет Хаара. Вейвлет-функция имеет вид меандра, но его базисная функция плохо локализирована по частоте.

Поскольку для полной реконструкции сигнала могут быть применены только ортогональные вейвлеты с компактным носителем, то преимуществом вейвлетов семейства Добеши является то, что их использование не вносит дополнительной избыточности в исходные данные и сигнал может быть восстановлен зеркальными фильтрами.

Рис. 1. Ортогональные фильтры Добеши, масштабирующая функция ψ и вейвлет φ

Вейвлет-анализ (декомпозиция) сигнала решается поэтапно, со своим значением масштаба. Пусть анализ проводится для M отсчетов сигнала $f(t)$: $f_0, f_1, \ldots f_{M-1}$. На первом этапе декомпозиции параметр масштаба $j = 1$, и сигнал делится на две составляющие: аппроксимирующую и уточняющую. При этом число коэффициентов в 2 раза меньше, чем в исходном M, поскольку сигнал пропущен через НЧ-фильтр с полосой 0,5. На втором этапе

выполняется разложение при масштабе всех базисных функций $j = 2$. Декомпозиция длится до тех пор, пока аппроксимирующая составляющая не выродится в одно постоянное значение среднего исходного сигнала $f(t)$. Начав с этого значения, можно восстановить исходный сигнал $f(t)$, используя коэффициенты ВО. При необходимости коррекции сигнала все коэффициенты подвергаются коррекции ВП.

Выводы. Подход к формированию вейвлет-образа позволяет синтезировать алгоритм вейвлет-регулятора с декомпозицией входного сигнала, получения текущего вейвлет-образа, изменения его коэффициентов и реконструкции выходного сигнала по измененному вейвлет-образу. Изменение коэффициентов вейвлет-образа соответствует алгоритму электропривода, а преобразователь напряжения воспроизводит функцию типа Хаара.

Литература

1. **Оптимальное** управление электромеханическими комплексами в условиях стохастических возмущений / О.В. Крюков, А.П. Сарычев, А.В. Серебряков и др. М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017.
2. **Крюков О.В., Серебряков А.В., Степанов С.Е.** Решение задач энергоэффективности объектов транспорта газа ОАО «Газпром» с применением частотно-регулируемых электроприводов // Фёдоровские чтения − 2015 : XLV Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы (Москва, 11—13 ноября 2015 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 101—105.
3. **Крюков О.В.** Особенности энергоснабжения подводных добычных комплексов морских месторождений углеводородов // Фёдоровские чтения – 2019 : XLIX Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 357—359.
4. **Khlynin A.S., Kryukov O.V., Stepanov S.E.** Energy optimization of gas compressor units electric drives // XVI Междун. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2016) Алушта, 19—24 сентября 2016 г.: труды. М.: Фирма «Знак», 2016. С. 137—139.
5. **Саушев А.В., Бова Е.В., Белоусов И.В.** Проектирование электротехнический устройств: учеб. пособие. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. 168 с.
6. **Васенин А.Б., Крюков О.В.** Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия ТГУ. Технические науки. 2011. № 5−1. С. 47—51.
7. **Воронков В.И., Крюков О.В., Рубцова И.Е.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2013. № 7 (693). С. 74—78.
8. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа // Труды IX Междун. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2016), Пермь, 3—7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 428—432.

9. **Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // XVI Междун. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2016) Алушта, 19—24 сентября 2016 г.: труды. М.: Фирма «Знак», 2016. С. 133—135.
10. **Крюков О.В., Серебряков А.В.** Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // Пром-Инжиниринг : Труды II МНТК. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 286—290.
11. **Киянов Н.В., Крюков О.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 29—34.
12. **Векторное** управление возбуждением синхронных двигателей ГПА / В.И. Воронков, С.Е. Степанов, В.Г. Титов, О.В. Крюков // Известия ТГУ. Технические науки. 2010. № 3−2. С. 204—208.
13. **Крюков О.В.** Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50—58.
14. **Васенин А.Б., Крюков О.В.** Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // Великие реки′2017 : [Труды научного конгресса 19-го МНПФ]. Н. Новгород: НГАСУ, 2017. С. 93—96.
15. **Крюков О.В.** Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах электропривода // Изв. вузов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 9—44.

В.В. Вахнина, vvvahnina@yandex.ru,
И.В. Горохов, alf19888@gmail.com, ТГУ, Тольятти

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ОДНОФАЗНОМ СИЛОВОМ АВТОТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

При некоторых природных и техногенных процессах в линиях электропередачи (ЛЭП) появляются квазипостоянные токи (КПТ), значительно превышающие токи намагничивания силовых автотрансформаторов (АТ) в нормальном режиме работы. При КПТ ток намагничивания увеличивается, а в его спектре появляются кратные рабочей частоте интенсивные высшие гармоники [1—3], что ведет к росту дополнительных потерь активной мощности (ДПАМ). Протекание квазипостоянного тока может привести к значительному повышению температуры АТ на конструктивных элементах. В маслонаполненных АТ допустимая температура ограничена температурой закипания масла. При значительных КПТ температура закипания масла может быть достигнута АТ за время меньшее, чем их длительность. В этом

случае произойдет аварийное отключение АТ с возможным развитием системной аварии в системе электроснабжения.

Для определения допустимого времени работы АТ необходимо найти дополнительные потери активной мощности при КПТ. Расчеты ДПАМ с разложением тока намагничивания в спектр являются трудоемкими, поэтому представляется целесообразным найти аналитическое выражение, позволяющее аппроксимировать их зависимость от КПТ.

В работе расчеты выполнены для однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220, однако полученные выражения могут быть использованы и для других типов АТ. Для расчета тока намагничивания использована математическая модель, приведенная в работе [3]. Расчеты показали, что при воздействии КПТ на автотрансформатор ток намагничивания i_0 имеет характерную однополупериодную асимметрию, отображающую появление в магнитопроводе постоянной составляющей магнитного потока, смещающего рабочую кривую намагничивания в область насыщения, которая в полупериодах рабочего тока совпадает по направлению с КПТ. На рис. 1 представлена расчетная кривая тока намагничивания i_0 при квазипостоянном токе $i_{КПТ}$ = 60 А в обмотке высокого напряжения (ВН) силового автотрансформатора.

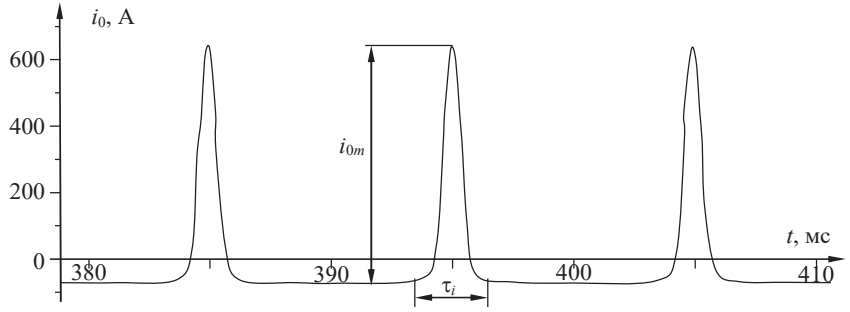


Рис. 1. Ток намагничивания автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 при квазипостоянном токе $i_{КПТ}$ = 60 А в обмотке ВН

Импульсы на токе намагничивания возникают при насыщении магнитопровода, их форма подобна полупериоду синусоиды, длительность практически постоянна (τ_i = 2,4 мс), а амплитуда растет с увеличением $i_{КПТ}$.

Поскольку ДПАМ определяется производной магнитного поля, основной вклад дают сильноточные импульсы. Для оценки ДПАМ из кривой тока намагничивания длительностью 1 с выделим сильноточные импульсы и составим из них непрерывную последовательность. Дополним полученную последовательность зеркально отраженной последовательностью, сдвину-

той на $\tau_i/2$. Полученная кривая подобна синусоиде частотой $f_i = 1/\tau_i$ с длительностью в секундном интервале $\Delta t_i = 50\tau_i$ (рис. 2).

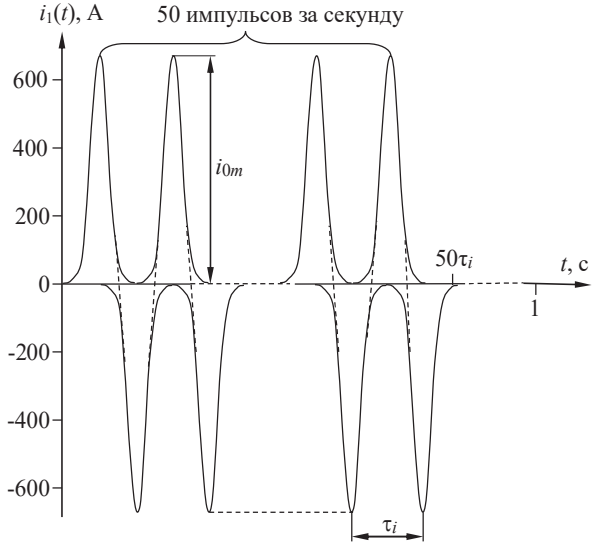


Рис. 2. Сильноточная составляющая тока намагничивания силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 при $i_{КПТ}$ = 60 А в обмотке ВН

Для оценки ДПАМ при квазипостоянном токе используем зависимость

$$p_{f_i} = k_1 \sqrt{f_i}\, H_{\tau i}^2, \qquad (1)$$

где k_1 — численный коэффициент, $H_{\tau i}$ — тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на частоте f_i [3, 4].

При $i_{КПТ} = 0$ ДПАМ определяются током рабочей частоты (50 Гц) и равны $p_{50} = k_1 \sqrt{50} H_{\tau 50}^2$, что позволяет выражение (1) для частоты f_i переписать в виде

$$p_{f_i} = p_{50} \sqrt{\frac{f_i}{50}} \frac{H_{\tau i}^2}{H_{50}^2}, \qquad (2)$$

где $H_{\tau 50}$ — тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на частоте 50 Гц при $i_{КПТ} = 0$.

Учитывая, что $H_{\tau i}$ и $H_{\tau 50}$ пропорциональны току намагничивания, общая длительность сильноточной составляющей равна $50\tau_i$, ее частота $1/\tau_i$ и вклад в p_{fi} дает только верхняя половина синусоиды [3, 5], из (2) получаем

$$p_{f_i} = \frac{5}{2} p_{50} \left(\frac{i_{0m}}{i_{50}} \right)^2 \sqrt{2\tau_i} \,, \quad (3)$$

где i_{50} — амплитуда тока намагничивания на рабочей частоте при $i_{\text{КПТ}} = 0$.

Согласно (3) мощность дополнительных активных потерь в СТ возрастает пропорционально квадрату амплитуды импульсов на токе намагничивания. Зависимость амплитуды импульсов на токе намагничивания однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН - 267000/500/220 от величины квазипостоянного тока приведена на рис. 3.

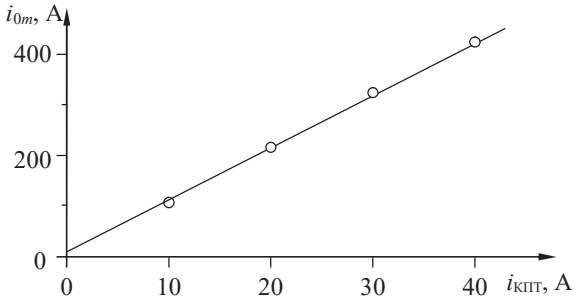


Рис. 3. Зависимость амплитуды тока намагничивания однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН - 267000/500/220 от $i_{\text{КПТ}}$

Из рис. 3 следует, что амплитуда тока намагничивания i_{0m} пропорциональна квазипостоянному току $i_{\text{КПТ}}$:

$$i_{0m} = 11\, i_{\text{КПТ}} + 5 \,. \quad (4)$$

Из (4) получаем, что амплитуда тока намагничивания при $i_{\text{КПТ}} = 0$ равна $i_{50} = 5$ А. Подставляя в (3) зависимость (4), $i_{50} = 5$ А и $\tau_i \approx 2{,}4$ мс, получаем:

$$\frac{p_{f_i}}{p_{50}} = \frac{5}{2} \left(\frac{11 i_{\text{КПТ}} + 5}{5} \right)^2 \sqrt{2 \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-3}} \approx 0{,}7 \left(1{,}1 i_{\text{КПТ}} + 0{,}5 \right)^2 , \quad (5)$$

Результаты численного моделирования при $i_{\text{КПТ}} = 10 \div 120$ А с разложением тока намагничивания в спектр показали, что расчетные значения и получаемые по (5) отличаются не более чем на 5—10 %. С учетом этого для

практических расчетов для конкретных АТ целесообразно применение выражения (3), в которое необходимо подставить i_{0m} и τ_i.

Выводы. Дополнительные потери активной мощности возрастают пропорционально квадрату квазипостоянного тока. Полученное выражение позволяет довольно точно оценить дополнительные потери активной мощности в силовом однофазном автотрансформаторе АОДЦТН-267000/500/220. При $i_{КПТ}$ = 40 А дополнительные потери активной мощности увеличиваются примерно в 1350 раз, а при $i_{КПТ}$ = 100 А примерно в 8000 раз.

Литература

1. **Kappenman J.G., Zanetti L.J.** Geomagnetic Storms Can Threaten Electric Power Grid // Earth in Space. 1997. Vol. 9. № 7. P. 9—11.
2. **Kappenman J.** Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid (Meta-R-319). Metatech Corporation, January 2010. 197 p.
3. **Вахнина В.В.** Разработка основ теории функционирования систем электроснабжения потребителей при воздействии геоиндуцированных токов: дис. … д-ра техн. наук: 05.09.03. М.: НИУ «МЭИ», 2013. 377 с.
4. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учебн. пособие для вузов. М.: URSS, 2019. 528 с.
5. **Boteler D.H.** Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research // IEEE Transactions and Power Delivery. 1994. Vol. 9. P. 50—58.

В.В. Вахнина, vvvahnina@yandex.ru,
А.В. Бычков, omgwtf955@gmail.com,
О.В. Федяй, o.fedyai@yandex.ru, ТГУ, г. Тольятти

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КВАЗИПОСТОЯННОГО ТОКА НА БЛОК СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР — СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР

К типовым схемам блоков синхронный генератор — силовой трансформатор относятся [1]:

- простой блок (синхронный генератор — силовой трансформатор / синхронный генератор — два силовых трансформатора), рис. 1;
- укрупненный блок (два синхронных генератора — силовой трансформатор), рис. 2;
- объединенный блок [два простых блока, соединенных между собой с помощью коммутационного аппарата (силовой выключатель)], рис. 3.

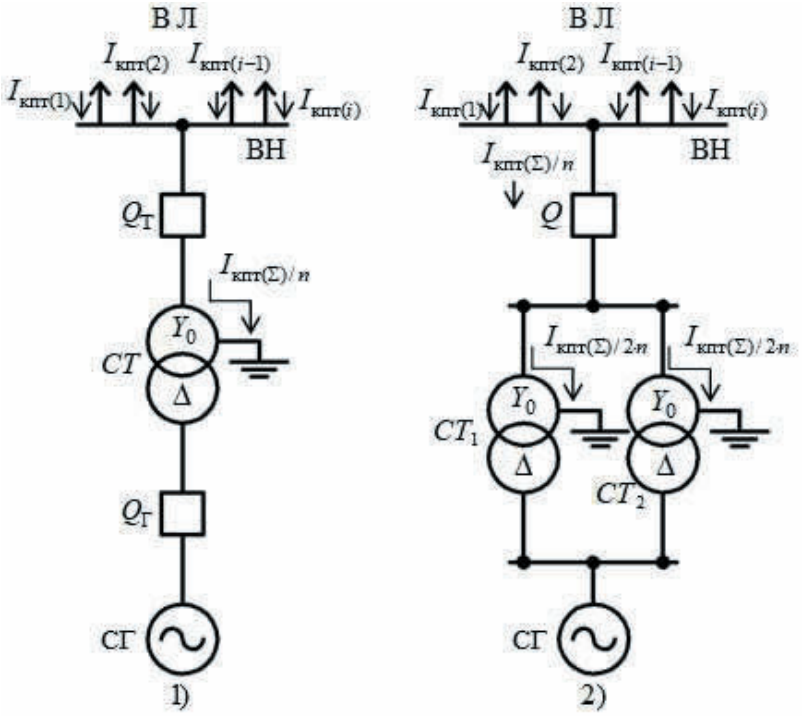


Рис. 1. Схема простого блока синхронный генератор — силовой трансформатор: *1* — синхронный генератор — силовой трансформатор; *2* — синхронный генератор — два силовых трансформатора

Расшифровка обозначений, используемых на рисунках, приведена в таблице.

Расшифровка обозначений

Обозначение	Расшифровка
ВЛ	Воздушная линия электропередачи
$I_{КПТ}$	Квазипостоянный ток
$Q_Т$	Силовой выключатель трансформатора
n	Количество блоков
$Q_Г$	Силовой выключатель синхронного генератора
СГ	Синхронный генератор
СТ	Силовой трансформатор
ВН	Высокое напряжение

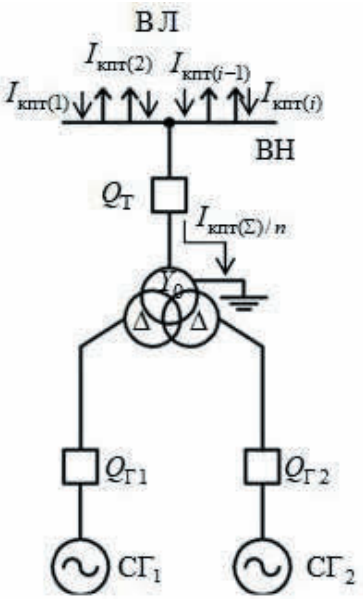


Рис. 2. Схема укрупненного блока синхронный генератор — силовой трансформатор

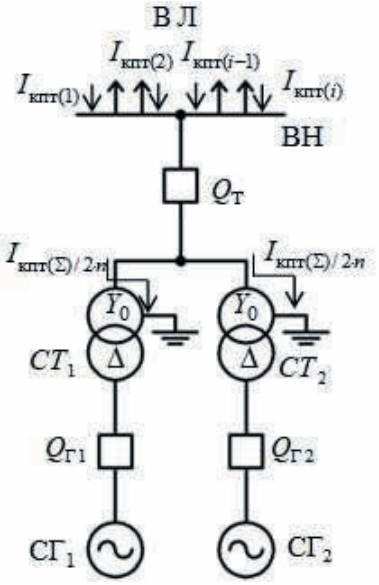


Рис. 3. Схема объединенного блока синхронный генератор — силовой трансформатор

Для того чтобы знать фактическое значение квазипостоянного тока, оказывающего воздействие на блочный трансформатор, необходимо учитывать такие параметры как: количество силовых трансформаторов, территориально-географическое расположение линий электропередачи высокого напряжения, параметры фазных проводов.

При квазипостоянном токе, равном нулю, магнитная система блочного трансформатора работает в пределах области рабочего перемагничивания электротехнической стали и практически не оказывает влияния на работу СГ в области генерации реактивной мощности. В качестве примера рассмотрим простой блок: синхронный генератор марки ТВВ-320 и силовой трансформатор марки ТЦ-400000/220/20. В нормальном режиме функционирования СГ выдает реактивную мощность $Q_{\text{Г}} \approx 200$ Мвар. При этом мощность намагничивания блочного трансформатора $Q_{\text{намаг}} \approx 1{,}6$ Мвар, т.е. $Q_{\text{Г}} >> Q_{\text{намаг}}$.

Воздействие квазипостоянного тока на блок синхронный генератор — силовой трансформатор вызывает одностороннее насыщение магнитной системы СТ. Если магнитная система блочного трансформатора броневая или бронестержневая ($S_{\text{ном}} > 80$ МВ·А), то для смещения режима перемагничивания магнитной системы блочного трансформатора в область технического насыщения достаточно КПТ, сопоставимого с паспортным значением тока намагничивания, т.е. $I_{\text{КПТ}} \geq I_{\text{намаг.пасп}}$.

При насыщении магнитной системы СТ под воздействием КПТ ток намагничивания принимает однополярную форму, при этом многократно возрастая, и появляются высшие гармоники тока.

Во-первых, возрастание тока намагничивания вызывает рост мощности намагничивания СТ на несколько порядков. В результате этого резко возрастает реактивная нагрузка синхронного генератора и возникает опасность его перегрузки по полной мощности. Увеличение реактивной нагрузки при неизменной генерации активной мощности сопровождается увеличением тока статора синхронного генератора из-за повышения реактивной составляющей тока. Таким образом, синхронный генератор испытывает симметричную перегрузку по статорному току при условии, что синхронный генератор работает в номинальном режиме. Кратность перегрузки может достигать значения 1,5 и более, что недопустимо [2]. Для защиты от симметричной перегрузки синхронные генераторы оснащаются соответствующей защитой с уставками ($t_{\text{выд}} = 6 \div 9$ с, $I_{\text{сз}} = 1{,}3 \div 1{,}4 \cdot I_{\text{ст.ном}}$).

Во-вторых, высшие гармоники тока намагничивания СТ могут проникать в статорную обмотку генератора. Одной из особенностей тока статора является наличие у него полного набора гармоник (как четных, так и нечетных). Исключение составляют лишь гармоники нулевой последова-

тельности, что связано со схемой соединения блочного трансформатора на низком напряжении (треугольник). Наибольшую опасность для синхронного генератора представляют токи 2-й гармоники (токи обратной последовательности) [3]. Поэтому синхронные генераторы мощностью более 30 МВт оснащаются защитой от токов обратной последовательности с уставками ($t_{выд}$ = 3÷5 с, $I_{сз}$ = (0,3÷0,7) $I_{ст.ном}$).

Диаграмма передачи воздействия квазипостоянного тока на блок синхронный генератор — силовой трансформатор приведена на рис. 4.

Рис. 4. Диаграмма передачи воздействия квазипостоянного тока на блок синхронный генератор — силовой трансформатор

Таким образом, квазипостоянный ток, оказывающий негативное воздействие (рост реактивной нагрузки синхронного генератора, появление высших гармоник в токе статора) на блок синхронный генератор — силовой трансформатор, может стать причиной отключения СГ (срабатывание релейной зашиты), что повлечет за собой падение напряжения в энергосистеме и может оказаться причиной крупной системной аварии, приведшей к нарушению электроснабжения потребителей.

Литература

1. **Электротехнический** справочник: в 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (под общ. ред. профессоров МЭИ). 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
2. **Гершенгорн А.И.** Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем // Электрические станции. 1993. № 6. С. 54—63.
3. **Механизмы** воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети: монография / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Шаповалов и др. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 256 с.

А.В. Дайнеко, fancydude@yandex.ru, ТГУ, г. Тольятти

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННОГО ТОКА НА ИСКАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Силовые трансформаторы (СТ) представляют собой сложное техническое устройство и являются одним из самых важных и распространенных элементов электроэнергетической системы (ЭЭС). Силовые трансформаторы классифицируются в зависимости от таких параметров, как класс напряжения, номинальная мощность, группа и схема соединения обмоток, конструкция магнитопровода и обмоток. В ходе эксплуатации СТ возникают режимы, при которых возможно насыщение магнитной системы СТ: работа СТ при повышенном напряжении первичной обмотки и номинальной частоте; при номинальном напряжении первичной обмотки и пониженной частоте; при коротком замыкании во внешней ЭЭС; при работе СТ на холостом ходу; при протекании геоиндуцированных токов (ГИТ) по заземленным нейтралям СТ [1].

Намагничивание магнитопровода силового трансформатора вызывает смещение рабочей точки на кривой намагничивания в нелинейную область, что вызывает искажение синусоидальной формы тока, потребляемого СТ, увеличивается содержание высших гармоник в спектре потребляемого тока. Это приводит к дополнительным потерям в электрических машинах, силовых трансформаторах и линиях электропередачи, сокращению срока службы изоляции электрооборудования, к сбоям в работе устройств релейной защиты и автоматики, в системах связи.

В докладе рассмотрено влияние ГИТ, протекающих по обмоткам высокого напряжения силовых трансформаторов ТДЦ 200000 220/15,75, соединенных в звезду, на искажение синусоидальной формы кривой напряжения. Каталожные данные трансформатора представлены в табл. 1. Параметры схемы замещения силового трансформатора ТДЦ 200000 220/15,75 пред-

ставлены в табл. 2. Для расчета параметров схемы замещения использовалась методика, предложенная И.В. Новашем и Ю.В. Румянцевым [3].

На рис. 1 представлена схема модели электрической сети в программном комплексе MatLab, схема содержит синхронный генератор ТВВ 200/15.75, повышающий и понижающий силовые трансформаторы ТДЦ 200000 220/15,75, трехфазную воздушную линию электропередачи 220 кВ, и нагрузку. ГИТ моделируется с помощью источника постоянного напряжения, подключенного между заземленными нейтралями силовых трансформаторов через небольшое сопротивление нейтралей.

Для анализа искажения формы кривой напряжения были выбраны следующие величины ГИТ: 25А, 50А, 75А, 100А, 150А, 200А, 250А, 300А.

Таблица 1

Каталожные данные ТДЦ 200000 220/15,75 со схемой соединения обмоток $Y_н/\Delta$

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$S_{ном}$, МВ·А	200,0	$U_{1ном}$, кВ	242,0
U_k, %	11,0	$U_{2ном}$, кВ	15,75
P_k, кВт	660,0	I_0, %	0,4
P_0, кВт	130,0	$f_{ном}$, Гц	50,0

Таблица 2

Параметры схемы замещения трансформатора ТДЦ 200000 220/15,75 со схемой соединения обмоток $Y_н/\Delta$

Параметр	Значение, о.е.	Параметр	Значение, о.е.
$R_1 = R_2$	0,0017	R_m	1561,4
$L_1 = L_2$	0,055	L_m	253,1

Таблица 3

Гармонические составляющие напряжения АВ в процентах от первой гармоники в зависимости от геоиндуцированных токов

		Величина геоиндуцированного тока, А							
		25	50	75	100	150	200	250	300
Порядок гармонической составляющей	0	0,04	0,08	0,03	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02
	2	0,09	0,97	1,93	2,53	3,66	4,93	6,17	7,11
	3	0,09	0,02	0,02	0,04	0,08	0,01	0,07	0,15
	4	0,38	1,51	2,33	2,88	3,45	3,66	3,75	3,35
	5	1,93	5,39	7,58	8,95	10,55	10,97	10,39	8,87
	6	0,05	0,02	0,01	0,05	0,09	0,01	0,04	0,13
	7	1,26	3,82	4,27	3,56	0,91	2,82	6,01	8,61
	8	0,38	1,09	0,77	0,78	1,79	2,71	3,05	2,48

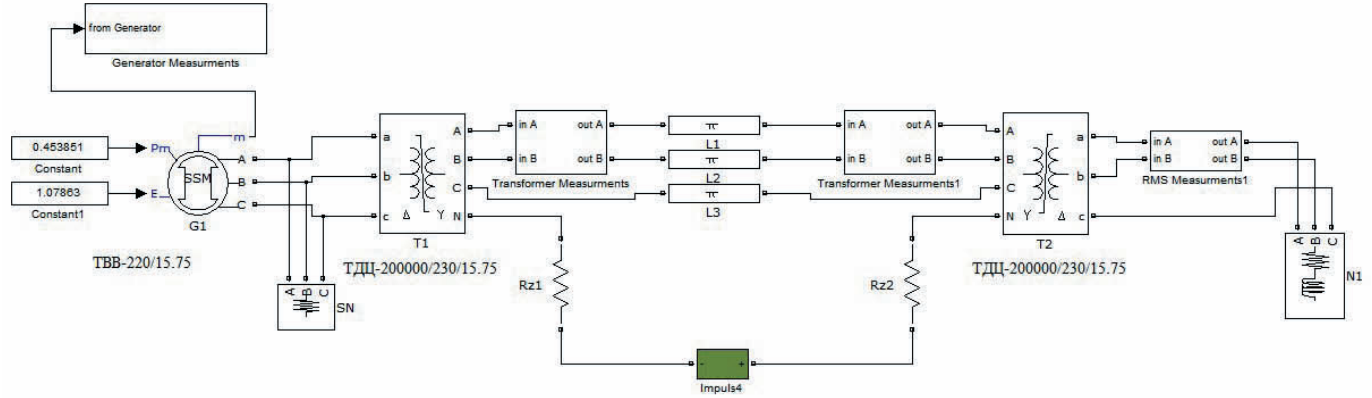


Рис. 1. Схема модели электрической сети

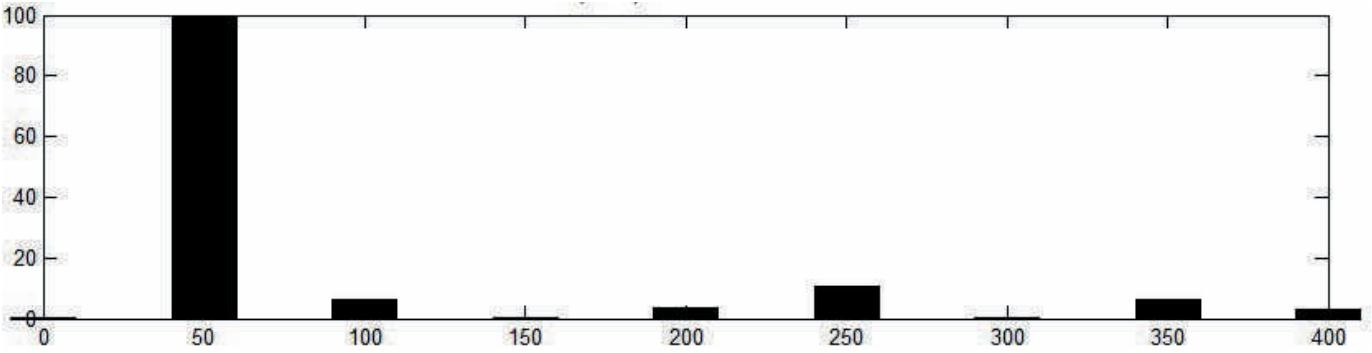


Рис. 2. Линейчатый спектр гармонических составляющих линейного напряжения U_{AB} на нагрузке N_1 при геоиндуцированном токе $I_{ГИТ}$ = 250 А

На рис. 2 в качестве примера приведен линейчатый спектр гармонических составляющих линейного напряжения U_{AB} на нагрузке N_1 при величине ГИТ $I_{ГИТ}$ = 250 А, в табл. 3 представлены гармонические составляющие напряжения U_{AB} в процентах от первой гармоники для перечисленных выше значений ГИТ.

Таким образом, подмагничивание магнитопровода силового трансформатора квазипостоянным геоиндуцированным током приводит к значительному искажению синусоидальной формы кривой напряжения, при этом синусоида напряжения по второй гармонике перестает соответствовать требованиям ГОСТ 32144–2013 [2] начиная со значения геоиндуцированного тока 50 А, по четвертой гармонике — с 25 А, по пятой гармонике —с 50 А, по шестой гармонике —с 100 А, по седьмой гармонике — с 50 А, по восьмой гармонике — с 25 А. При этом по третьей гармонике напряжение соответствует ГОСТ 32144–2013, так как гармоники, кратные трем, замыкаются в обмотках силового трансформатора, соединенных в треугольник, и не попадают во внешнюю систему электроснабжения.

Таким образом, подмагничивание магнитопровода силового трансформатора ГИТ приводит к недопустимому искажению синусоидальной формы кривой напряжения и к значительному снижению качества электроэнергии, поставляемой конечному потребителю, что может привести к негативным последствиям, таким как:

– дополнительный нагрев статора асинхронных двигателей и магнитопроводов силовых трансформаторов;

– сокращение срока службы изоляции электрических машин и аппаратов;

– ускоренное старение изоляции электроприемников;

– сбои в работе микропроцессорных и полупроводниковых приборов и устройств.

Литература

1. **Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А.** Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3 (21). С. 65—69.
2. **ГОСТ 32144–2013**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. **Новаш И.В., Румянцев Ю.В.** Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки Matlab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12—24.

В.Ю. Белашов, vybelashov@yahoo.com, КФУ, г. Казань

К ВОПРОСУ О ДИФРАКЦИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТАХ ЭЭС

Представлен теоретический анализ и даны количественные оценки вклада поля дифракции электромагнитных волн на симметричных проводящих объектах в суммарное поле СНЧ-ОНЧ-диапазона вблизи источников, которыми могут служить отдельные элементы электроэнергетических систем. Полученные в виде достаточно простых и удобных для практического использования соотношений результаты представляют интерес при решении комплекса задач, связанных с различными аспектами проблем электромагнитной совместимости, помехозащищенности и безопасности жизнедеятельности в электроэнергетике.

Введение. Изучение низкочастотных (диапазон СНЧ-ОНЧ — 10—10 000 Гц) электромагнитных (ЭМ) полей, генерируемых элементами электроэнергетических систем (ЭЭС), и исследование воздействия ЭМ-полей естественного и искусственного происхождения на различные структуры ЭЭС представляет интерес при решении комплекса задач, связанных с различными аспектами проблем электромагнитной совместимости, помехозащищенности и безопасности жизнедеятельности в электроэнергетике. При этом изучение структуры и интенсивности ЭМ-поля вблизи объектов различной, подчас довольно сложной, конфигурации (строения, трубопроводы, открытые кабельные линии и т.п.) требует анализа суммарной картины, представляющей собой суперпозицию поля источника и поля, являющегося результатом дифракции на соответствующем объекте. Целью работы является теоретический анализ и получение количественных оценок вклада поля дифракции ЭМ-волн на проводящих объектах цилиндрической и сферической формы в суммарное поле вблизи источников, которыми могут служить отдельные элементы ЭЭС. При анализе ограничимся допущениями: 1) объекты, на которых изучается поле, — идеально проводящие, что допустимо в условиях низкой проводимости земли, часто имеющей место в реальных условиях; 2) волны СНЧ-ОНЧ-диапазона — плоские монохроматические, так как рассматривается малый участок волновой зоны.

Дифракция на цилиндрическом объекте. Будем предполагать, что в случае низкой проводимости земли в некотором приближении допустимо свести задачу к оценке вклада поля, вызванного дифракцией на идеально проводящем цилиндре бесконечной длины (последнее справедливо, поскольку результирующее поле исследуется на расстояниях от объекта, много меньших его линейных размеров).

Введем цилиндрическую систему координат так, что ось x совпадает с осью цилиндра (рис. 1). Пусть для падающей волны $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{x}$, $\mathbf{k} \perp \mathbf{x}$ (стоит задача оценки максимального вклада дифракционной составляющей) угол α отсчитываем от направления $\mathbf{k}$. В этом случае поле имеет компоненты E_x, H_r, H_α. С учетом геометрии задачи величину E_x определим из волнового уравнения для $\mathbf{E}$: $\Delta \mathrm{E} - (1/v_{ph}^2)(\partial^2 \mathrm{E}/\partial t^2) = 0$. Компонента E_{xc} вторичного поля, обусловленного дифракцией, $\mathbf{E}_c = \mathbf{E} - \mathbf{E}_0$, удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_c}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 E_c}{\partial \alpha^2}+k^2 E_c = 0\,. \qquad (1)$$

Разделив переменные в (1), получим [1]

$$E''_\nu(r)+(1/r)E'_\nu(r)+(k^2-\nu^2/r^2)E_\nu(r)=0; \qquad (2)$$

$$E''_\nu(\alpha)+\nu^2 E_\nu(\alpha)=0, \qquad (3)$$

где $\nu^2 = C$ — постоянная разделения.

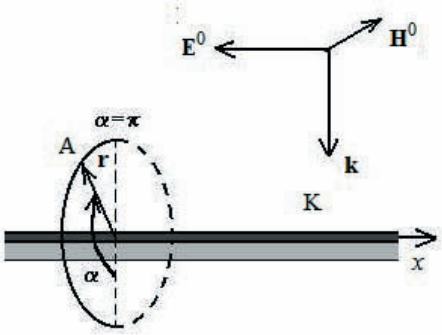


Рис. 1. Схема постановки задачи дифракции на цилиндрическом объекте: A — точка, в которой вычисляется поле; K — цилиндрический объект

Уравнение (2) — уравнение Бесселя, решение которого в общем случае можно записать в виде

$$E_c = C_1 H_\nu^{(1)}(kr) + C_2 H_\nu^{(2)}(kr)\,,$$

причем второй член описывает сходящуюся волну, которой в реальных условиях, описываемых задачей, не существует.

В области малых значений r (вблизи объекта, где $r << \lambda$), применяя граничное условие $r \to 0$, запишем функцию E_c в виде произведения

$$E_c = \varepsilon_0 f_1(r) f_2(\alpha), \tag{4}$$

где $f_1(r)$ — степенная функция, описывающая затухание волны при увеличении r; $f_2(\alpha)$ — некоторая функция, определяющая осциллирующее распределение вектора $\mathbf{E}_c$ «внутри» огибающей — степенной функции.

Поскольку в рассматриваемом диапазоне ($f \approx 10^1 \div 10^4$ Гц) $k \approx 10^{-4} \div 10^{-7}$ и, соответственно, $(kr) << 1$, то, чтобы удовлетворить условию (4), в качестве решения уравнения (2) следует выбрать функцию Ханкеля для малых значений аргумента [1, 2]:

$$E_\nu(r) = H_\nu^{(1)}(kr) = (1/i\pi)\,\Gamma(\nu)(kr/2)^{-\nu} \qquad (\nu \neq -1, -2, ...)\,. \tag{5}$$

Уравнение (3) имеет решение $E_\nu(\alpha) = A_\nu \exp(i\nu\alpha) + B_\nu(\alpha)\exp(-i\nu\alpha)$. Параметр ν — целый и, согласно (5), положителен. Учитывая, что общее решение уравнения (1) $E_c(r,\alpha) = \sum_\nu E_\nu(r) E_\nu(\alpha)$, имеем

$$E_c(r,\alpha) = \varepsilon_0 \sum_{\nu=0}^{\infty} \left(A_\nu\, e^{i\nu\alpha} + B_\nu\, e^{-i\nu\alpha} \right) H_\nu^{(1)}(kr).$$

Коэффициенты A_ν, B_ν нетрудно найти из граничного условия на поверхности идеально проводящего цилиндра $\mathbf{E}_c + \mathbf{E}_0 = 0$ при $r = a$ (где a — радиус цилиндра), используя свойство ортогональности $\exp(im\alpha)$:

$$A_\nu = i^\nu J_\nu(ka) / H_\nu^{(1)}(ka), \qquad B_\nu = i^\nu J_\nu(ka) / H_\nu^{(1)}(ka).$$

Полное электрическое поле, таким образом, равно

$$E_x(r,\alpha) = \varepsilon_0 \left\{ \exp(ikr\cos\alpha) - \sum_\nu \frac{J_\nu(ka)}{H_\nu^{(1)}(ka)} H_\nu^{(1)}(kr) \left(i^\nu\, e^{i\nu\alpha} + i^{-\nu}\, e^{-i\nu\alpha} \right) \right\}. \tag{6}$$

Компонента $H\alpha$ находится из первого уравнения Максвелла:

$$H_\alpha = -(1/ik)\,\partial E_x / \partial r = -\varepsilon_0 \left\{ \cos\alpha \exp(ikr\cos\alpha) - \right.$$
$$\left. - \sum_\nu \frac{J_\nu(ka)}{H_\nu^{(1)}(ka)} \frac{dH_\nu^{(1)}(kr)}{d(kr)} \left(i^{\nu-1}\, e^{i\nu\alpha} + i^{-\nu-1}\, e^{-i\nu\alpha} \right) \right\}. \tag{7}$$

Составляющая H_r при $0 \le \alpha \le \pi$ рассчитывается аналогично.

Полученные соотношения (6) и (7) позволяют оценить вклад дифракционной части в суммарное поле, принимаемое антенной:

$$\delta_{E_x}(r,k) = E_{xc} / \left(E_{x0} + E_{xc}\right), \qquad \delta_{H_\alpha}(r,k) = H_{\alpha c} / \left(H_{\alpha 0} + H_{\alpha c}\right).$$

Произведенные оценки влияния дифракции на цилиндрическом объекте для волн с частотами 10—10 000 Гц при a = 1см, r = 1÷30 м позволили получить следующие аналитические зависимости относительных оценок от пространственных координат и k:

$$\delta_{E_x}(r,k)\,|_{\alpha=\pi} = e^{ikr}(k/2r)^2, \qquad \delta_{H_\alpha}\,|_{\alpha=\pi} = ie^{ikr}k/2r^3. \qquad (8)$$

Формулы (8) позволяют легко рассчитать относительный вклад дифракционной составляющей в суммарное ЭМ-поле вблизи проводящего объекта цилиндрической формы.

Дифракция на сферическом объекте. Рассмотрим теперь вклад в суммарное ЭМ-поле поля дифракции на объекте сферической формы. Пусть однородная плоская волна, векторы которой имеют амплитуды

$$\dot{E}^{\,0}_{m} = x_0\,\dot{A}\,\mathrm{e}^{-i\dot{k}_0 z}, \qquad \dot{H}^{\,0}_{m} = y_0\left(\dot{A}/\dot{W}_0\right)\mathrm{e}^{-i\dot{k}_0 z},$$

падает на сферическое тело с проницаемостями $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\mu}$; проницаемости среды – ε_0 и μ_0 (рис. 2).

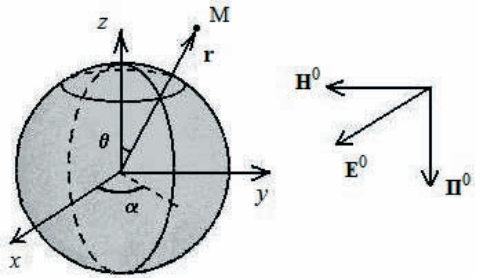


Рис. 2. Схема постановки задачи дифракции на сферическом объекте, М — точка, в которой вычисляется поле

Необходимо построить решения для внешнего поля дифракции (внутреннее поле дифракции в рассматриваемой постановке задачи нас не интересует), которые можно получить тем же способом, что и в предыдущем разделе – путем разложения падающей волны по подходящим функциям и составления аналогичных разложений с неопределенными коэффициентами для поля дифракции.

Последние будут находиться при наложении соответствующих граничных условий. Заметим, однако, что реализация такого подхода в случае сферической геометрии оказывается более сложной.

Будем использовать сферические гармоники $\Re, \Theta, \Im$. Однородное уравнение Гельмгольца, описывающее поле, в сферических координатах будет иметь вид

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial u}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(\sin\vartheta\frac{\partial u}{\partial\vartheta}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\vartheta}\frac{\partial^2 u}{\partial\alpha^2}+k^2u=0. \qquad (9)$$

Подстановка $u(r,\vartheta,\alpha)=\Re(r)\Theta(\vartheta)\Im(\alpha)$ с последующим умножением всех членов уравнения (9) на $r^2\sin^2\vartheta/(\Re\Theta\Im)$ дает

$$\frac{\sin^2\vartheta}{\Re}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\Re}{\partial r}\right)+\frac{\sin\vartheta}{\Theta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(\sin\vartheta\frac{\partial\Theta}{\partial\vartheta}\right)+\frac{1}{\Im}\frac{\partial^2\Im}{\partial\alpha^2}+k^2r^2\sin^2\vartheta=0.$$

Приравнивая третий член, зависящий только от α, $-m^2$, получаем два уравнения, одно из которых делится на $\sin^2\vartheta$ [3]. Далее члены, зависящие только от r, приравниваем p^2. В результате получаем три обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\frac{1}{\Re}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\Re}{dr}\right)+k^2r^2=0, \qquad \frac{\partial^2\Im}{\partial\alpha^2}+m^2\Im=0,$$

$$\frac{1}{\Theta\sin\vartheta}\frac{d}{d\vartheta}\left(\sin\vartheta\frac{d\Theta}{d\vartheta}\right)-\frac{m^2}{\sin^2\vartheta}=-p^2. \qquad (10)$$

Если $0\le\alpha\le2\pi$, то $u(r,\vartheta,\alpha+2\pi)=u(r,\vartheta,\alpha)$, так что $m=0, 1, 2, \ldots$. Производя во втором уравнении системы (10) замену $t=\cos\vartheta$, получим

$$\frac{d}{dt}\left[\left(1-t^2\right)\frac{d\Theta}{dt}\right]+\left(p^2-\frac{m^2}{1-t^2}\right)\Theta=0 \qquad (-1<t<1).$$

Ограниченными решениями последнего уравнения являются присоединенные функции Лежандра $P_n^{(m)}(t)$ [при этом собственные значения, отвечающие этим собственным функциям, $p^2=n(n+1)$] [3]:

$$T(t) = P_n^{(m)}(t) = (1-t^2)^{m/2}\,\frac{d^m P_n(t)}{dt^m} \qquad (n = 0, 1, 2, ..., m \le n)\,,$$

где $P_n(t)$ — полиномы Лежандра [2]. Отсюда следует, что $\Theta(\vartheta) = P_n^{(m)}(\cos\vartheta)$ $(m = 0, 1, 2, ...)$.

Первое из уравнений (10) после дифференцирования выражения в круглых скобках и выполнения замен $p = n(n+1)$, $\Re(r) = \rho(r)/\sqrt{kr}$ приводится к виду

$$\frac{d^2\rho}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\rho}{dr} + \left[\, k^2 - \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 / r^2 \right] \rho = 0\,,$$

а это не что иное, как уравнение Бесселя порядка $n + 1/2$ относительно функции $\rho(kr)$ [2]. Таким образом, решением первого уравнения системы (10) является функция

$$\Re(r) = \frac{1}{\sqrt{kr}}\left[AJ_{n+1/2}(kr) + BN_{n+1/2}(kr)\right] = \frac{1}{\sqrt{kr}}\left[PH^{(1)}_{n+1/2}(kr) + QH^{(2)}_{n+1/2}(kr)\right].$$

Окончательно решения уравнения (9) будут иметь вид

$$u(r,\vartheta,\alpha) = \frac{1}{\sqrt{kr}}\left\{\begin{matrix} AJ_{n+1/2}(kr) + BN_{n+1/2}(kr) \\ PH^{(1)}_{n+1/2}(kr) + QH^{(2)}_{n+1/2}(kr) \end{matrix}\right\} \times P_n^{(m)}(\cos\vartheta) \left\{\begin{matrix} C\cos m\alpha + D\sin m\alpha \\ R\,\mathrm{e}^{\,im\alpha} + S\,\mathrm{e}^{\,-im\alpha} \end{matrix}\right\}.$$

Пользуясь известными рекуррентными соотношениями для сферической и модифицированной сферической функций Бесселя I рода [2], можно теперь записать решение для внешнего поля дифракции [4]:

$$\dot{E}_m = \dot{A}\sum_{n=1}^{\infty}(-i)^n\,\frac{2n+1}{n(n+1)}\left(c_n^M M_{on} + ic_n^N N_{en}\right), \qquad r > R; \qquad (11)$$

$$\dot{H}_m = -\frac{\dot{A}}{\dot{W}}\sum_{n=1}^{\infty}(-i)^n\,\frac{2n+1}{n(n+1)}\left(b_n^N M_{en} - i\,b_n^M N_{on}\right), \qquad r > R, \qquad (12)$$

где

$$M_{\substack{o\\e}n} = \sqrt{\frac{\pi}{2k_0 r}}\,J_{n+1/2}(kr)\left[\pm\vartheta_0\,\frac{1}{\sin\vartheta}P_n^{(1)}(\cos\vartheta)\begin{matrix}\cos\\ \sin\end{matrix}\alpha - \alpha_0\,\frac{d}{d\vartheta}P_n^{(1)}(\cos\vartheta)\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\alpha\right],$$

$$N_{\substack{o\\e}n} = \frac{1}{k_0 r}\left\{ r_0 n(n+1)\sqrt{\frac{\pi}{2k_0 r}} H^{(2)}_{n+1/2}(k_0 r) P^{(1)}_n(\cos\vartheta)^{\cos}_{\sin}\alpha + \right.$$

$$+ \vartheta_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}}\left[\sqrt{k_0 r} H^{(2)}_{n+1/2}(k_0 r)\right]' \frac{d}{d\vartheta} P^{(1)}_n(\cos\vartheta)^{\sin}_{\cos}\alpha \pm$$

$$\left. \pm\alpha_0 \frac{1}{\sin\vartheta}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\left[\sqrt{k_0 r} H^{(2)}_{n+1/2}(k_0 r)\right]' P^{(1)}_n(\cos\vartheta)^{\cos}_{\sin}\alpha \right\}.$$

Индексы *o* и *e* в последних формулах соответствуют выбору соответственно верхнего и нижнего вариантов двойного знака и тригонометрической функции. Коэффициенты в круглых скобках формул (11), (12) определяются выражениями, приведенными в [4]. Формулы (11), (12) позволяют рассчитать поле вне сферы радиуса *R* для волн СНЧ-ОНЧ-диапазона.

Количественные оценки. Для получения количественных оценок вклада дифракционного поля в суммарную картину проводилось численное моделирование дифракции с помощью специально разработанной на основе алгоритмов, предложенных в [2], программы DIFFRACT [4]. На рис. 3 и 4 приведены примеры результатов моделирования дифракции на проводящем цилиндре для падающих ЭМ-волн с частотами 10—30 Гц и 1—3 кГц соответственно.

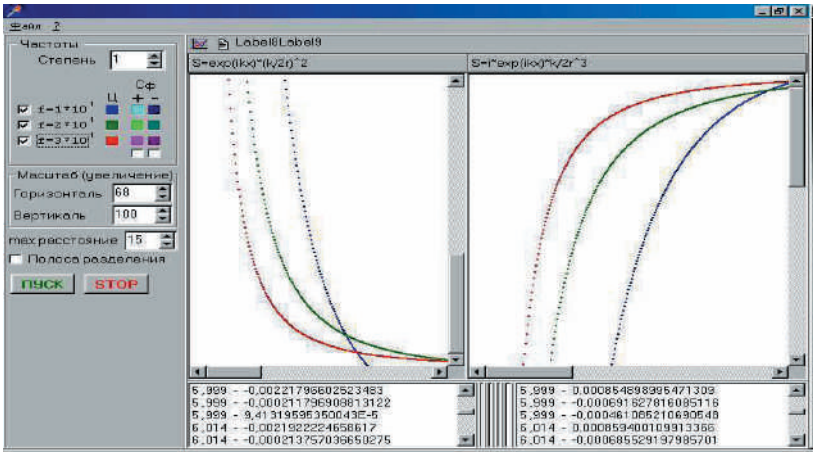


Рис. 3. Результаты моделирования вклада дифракционной составляющей в суммарное поле в частотном диапазоне $f = 10 \div 30$ Гц

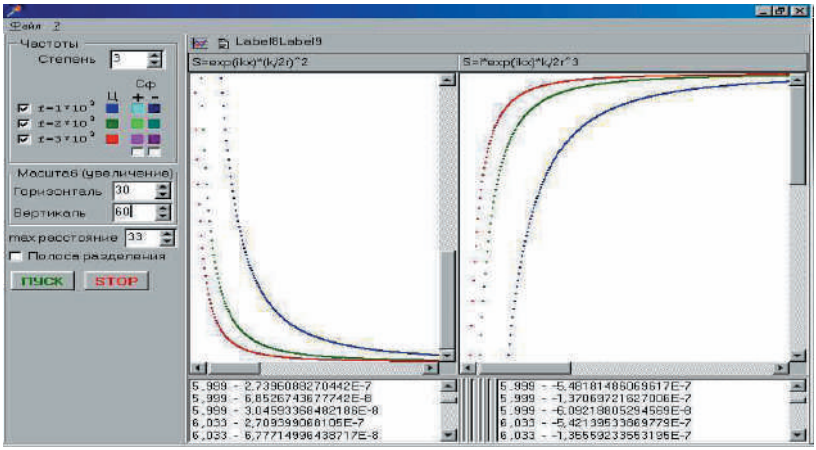


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для частотного диапазона $f = 1 \div 3$ кГц

Дифракционное поле для сферического проводящего объекта имеет качественно такой же характер: модули его компонент вне сферы убывают экспоненциально с ростом r, причем, как и в случае дифракции на объекте цилиндрической формы, амплитуды составляющих вблизи объекта зависят обратно пропорционально от частоты падающей волны. Однако, в отличие от случая дифракции на цилиндре, вклад в суммарное поле дифракционного поля на сферическом объекте оказывается при тех же условиях практически на порядок большим. Полученные результаты, несмотря на некоторую идеализацию задачи, позволяют сделать заключение о некотором искажении низкочастотного поля в результате дифракции, увеличивающемся с уменьшением частоты по законам (8), (11), (12), однако эти искажения, ввиду их относительной малости, должны учитываться лишь при построении высокочувствительных к внешним воздействиям систем.

Заключение. В работе представлен теоретический анализ и даны количественные оценки вклада поля дифракции электромагнитных волн на симметричных проводящих объектах цилиндрической и сфероидальной формы в суммарное поле СНЧ-ОНЧ-диапазона вблизи источников, которыми могут являться отдельные элементы ЭЭС. Результаты, полученные для объектов, обладающих высокой степенью симметрии, могут служить основой при изучении структуры и интенсивности ЭМ-поля вблизи объектов более сложной конфигурации (строения, трубопроводы, открытые кабельные линии и т.п.), отдельные участки которых геометрически симметричны. Во всех случаях при этом необходим анализ суммарной картины, представляющей собой суперпозицию поля источника и поля, являющегося результатом дифракции на соответствующем объекте, или суперпозицию дифракционных полей его отдель-

ных элементов. Результаты представлены в виде простых и удобных для расчетов соотношений и представляют интерес при решении задач, связанных с различными аспектами проблем ЭМС, помехозащищенности и безопасности жизнедеятельности в электроэнергетике.

Литература

1. **Белашов В.Ю.** Оценка влияния дифракции на кабеле на характеристики естественного электромагнитного поля КНЧ-ОНЧ-диапазона, принимаемого антенной // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. № 5. С. 851—853.
2. **Белашов В.Ю.** Специальные функции и алгоритмы их вычисления. Магадан: МПУ, 1997. 36 с.
3. **Никольский В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 544 с.
4. **Белашов В.Ю., Александров И.А.** Задачи дифракции электромагнитных волн в курсе электродинамики: компьютерное моделирование // II Межд. науч.-метод. конф. «Новые технологии в преподавании физики: школа и вуз» 13—16 марта 2000 г.: Сб. докл. М.: МПГУ, 2000. С. 89.

А.Ю. Старкова, StarkovaAY@mpei.ru
В.Н. Тульский, TulskyVN@mail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СИСТЕМА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ»

С 2018 г. в России реализуется переход от системы планово-предупредительного вида организации ремонта на объектах электросетевого хозяйства к организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учетом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков) — к так называемому риск-ориентированному подходу.

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 29 ноября 2017 г. № 2664-р «О внесении изменений в Стратегию развития электросетевого комплекса России» [1], если оборудование работает без отклонения от номинальных параметров и если соблюдены все процедуры по продлению срока эксплуатации, то ограничения дальнейшей эксплуатации могут быть сняты. Отраслевые принципы технического воздействия на оборудование по планово-предупредительному виду организации ремонта устанавливают необходимость его ремонта или обслуживания независимо от технического состояния, что в условиях общего ограничения ресурсов приводит к недостаточному выполнению работ на оборудовании, имеющем наибольшие риски возникновения отказа.

Для проведения оценок технического состояния в настоящий момент используется количественная интегральная величина, характеризующая техническое состояния оборудования и соответствующий уровень технического риска, — индекс технического состояния (далее ИТС), введенный постановлением Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов энергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей» [2].

Результаты оценки технического состояния основного технологического оборудования ранжируются по убыванию индекса технического состояния в группах однотипного оборудования. Наименьший ИТС в группе выбранного основного технологического оборудования определяет наивысший приоритет необходимости осуществления технического воздействия. Диапазоны индекса технического состояния установлены пунктом 2.4. «Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» (утвержденной приказом Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676) [3].

Согласно Методике [3] оценка технического состояния основного технологического оборудования должна осуществляться на основе различной информации, в том числе данных мониторинга и технической диагностики, полученных в процессе эксплуатации.

Однако в настоящее время в среднем 6,6 % отключений воздушных линий электропередачи происходит из-за неучета дефектов при расчете механических нагрузок. Предлагаемая к использованию система позволит проводить расчеты ИТС и дополнительно оценивать последствия механических нагрузок на каждую опору с уникальным набором дефектов с учетом реальных метеорологических условий.

В действующей на настоящий момент методике оценки состояния технологического оборудования с использованием ИТС были приняты следующие допущения [4]:

– отказ оборудования является следствием отказа функциональных узлов;

– события происходят в соответствии с наиболее пессимистическим сценарием, при котором техническое состояние ухудшается стремительно и линейно, а следовательно, таким же образом возрастает вероятность отказа (рис. 1).

По состоянию на 2020 г. в зоне ответственности ПАО «ФСК ЕЭС» находится 142 тыс. км высоковольтных магистральных линий электропередачи [5], в зоне ответственности ПАО «Россети» — 2,35 млн км линий электропередачи [6]. При этом сроки эксплуатации большинства воздушных линий электропередачи (ВЛ) составляют 40—50 лет и более, следовательно, при ис-

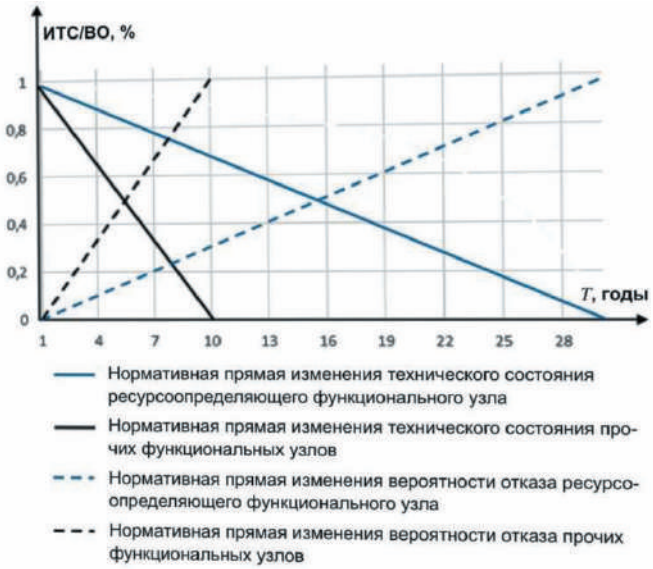


Рис. 1. Динамика изменения технического состояния и вероятности отказа функциональных узлов

следовании этих объектов при помощи ИТС абсолютному большинству ВЛ будет требоваться усиленный контроль технического состояния и немедленное техническое перевооружение. В условиях ограниченности бюджета и с учетом зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации (рис. 2) единовременно вывести в ремонт большое количество линий не представляется возможным.

Вместе с тем в среднем 6,6 % отключений ВЛ происходит из-за неучета дефектов при расчете механических нагрузок, т.е. из всех линий, ИТС которых находится ниже нормативного значения, необходимо определить узлы, которые в первую очередь нуждаются в осуществлении технического воздействия.

3D-моделирование опор линий электропередачи с возможностью учета дефектов позволит проводить расчеты механической прочности конструкций для определения наиболее уязвимых мест и на основании этих расчетов оптимизировать затраты на техническое обслуживание ВЛ.

За основу при разработке 3D-модели была взята промежуточная металлическая опора типа П110-4В. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Разработка проводилась в системе трехмерного моделирования «Компас-3D». Созданная модель позволяет отображать дефекты опор линий электропередачи, учитывать их при расчете механической прочности.

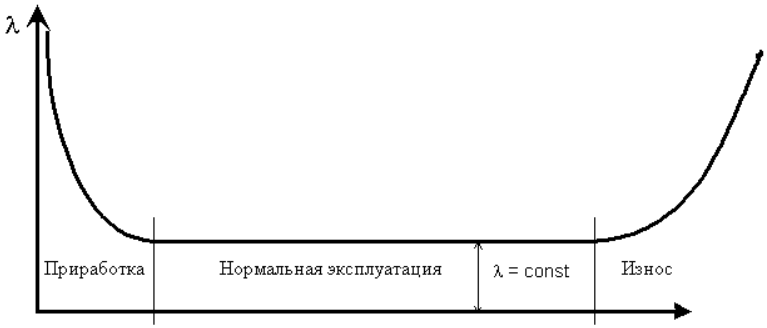


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации

Рис. 3. 3D-модель опоры П110-4В

Созданная 3D-модель позволила провести расчеты механической прочности на основе конечно-элементарного анализа в системе АРМ FEM — интегрированного в «Компас-3D» инструмента для прочностного анализа твердых тел. На рис. 4 представлены результаты расчета траверсы при отсутствии дефектов (ИТС = 100 %).

Рассмотрим пример расчета ИТС опоры, траверса которой имеет дефекты. По Методике [3], если траверса имеет трещины в сварных швах (вне зависимости от их количества и глубины) и отсутствует защитное покрытие, ИТС будет иметь значение 65,6 %. Необходимый вид технического воздействия: усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт,

реконструкция. Очевидно, что при условии механических нагрузок на опору в первую очередь в ремонте будет нуждаться опора с наличием трещин в сварных швах, но при использовании вычислений ИТС это не является очевидным. При расчетах с помощью аппаратно-программного комплекса значения механических нагрузок и степень деформации узлов при различных механических воздействиях позволят сделать однозначный вывод о необходимости ремонта.

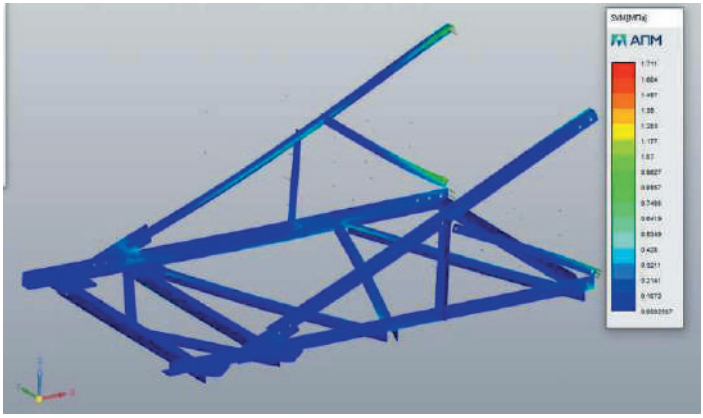


Рис. 4. Результаты расчета модели без дефектов

В дальнейшем для расширения возможностей аппаратно-программного комплекса планируется создать базу данных 3D-моделей опор других типов и других классов напряжения, постепенно создавая цифровые двойники линий электропередачи.

Для оптимизации работы с 3D-моделью необходимо создание программного обеспечения, которое позволит автоматизировать сбор и обработку данных осмотров ВЛ, которые являются исходными данными для дальнейшей оценки технического состояния ВЛ.

Программное обеспечение должно иметь интуитивно понятный интерфейс, возможность составления базы данных и ведения статистики по конкретным объектам для мониторинга их состояния в течение всего срока эксплуатации. Созданное программное обеспечение позволяет обрабатывать результаты осмотра ВЛ при использовании типовых форм (рис. 5).

Исходными данными являются параметры ВЛ, использующиеся для расчета ИТС, указанные в «Методике оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» [3].

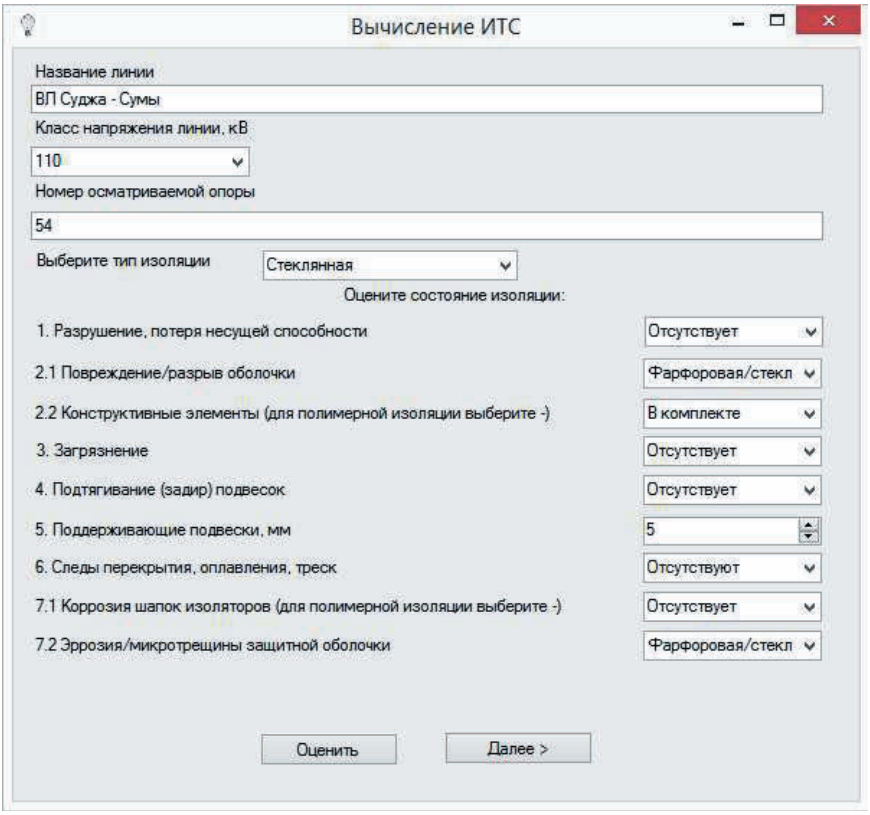


Рис. 5. Интерфейс программного обеспечения

Результатом работы программы является расчет ИТС, выдача заключения о состоянии ВЛ в соответствии с [3] и генерация кода, описывающего 3D-модель с выявленными дефектами.

Программное обеспечение является интуитивно понятным, поля для ввода данных представлены в виде выпадающих списков с выбором одного варианта либо же поля для ввода одного численного значения, размерность указана. Следовательно, работа с программой возможна при наличии заполненного листка осмотра, не является сложной для работников электросетевого комплекса, не требует дополнительного обучения персонала.

Впоследствии предполагается создание приложения для мобильных устройств (планшетов), которыми, в соответствии с программой ПАО «Россети» «Цифровой монтер», будут снабжаться сотрудники. Мобильное приложение позволит заполнять формы с исходными данными непосредственно во

время проведения осмотра, что позволит оптимизировать и автоматизировать сбор данных.

Система оценки надежности воздушных линий электропередачи позволит уточнить результаты расчета надежности при использовании ИТС, выявить слабые узлы в системе, прежде всего нуждающиеся в осуществлении технических воздействий, что позволит оптимизировать затраты электросетевых компаний на ремонт оборудования. Вместе с тем программный комплекс позволит вести базу данных состояния электросетевого оборудования, что позволит впоследствии на ее основе осуществлять прогнозирование технического состояния ВЛ.

Литература

1. **Распоряжение** Правительства РФ от 29 ноября 2017 г. № 2664-р «О внесении изменений в Стратегию развития электросетевого комплекса России». URL: http://government.ru/docs/30360/
2. **Постановление** Правительства РФ от 19 декабря 2019 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов энергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей». URL: https://base.garant.ru/71570850/
3. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». URL: https://base.garant.ru/71779722/
4. **О методологии** расчета технического риска на основе вероятности и последствий отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования / Е.П. Грабчак, Е.А. Медведева, А.О. Петренко, Т.В. Щинова // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019 № 1(52). С. 22—29.
5. **Сайт** организации ПАО «ФСК ЕЭС». URL: https://www.fsk-ees.ru/
6. **Сайт** организации ПАО «Россети». URL: http://www.rosseti.ru/

М.М. Сергеева, SergeevaMM@mpei.ru,
А.А. Самойлов, SamoylovAnA@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

УСТРОЙСТВО ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЗА СЧЕТ УЧЕТА ТЕРМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Доклад посвящен одному из наиболее важных вопросов современной энергетики — обеспечению надежного и бесперебойного питания потребителей электроэнергией. В настоящее время режимы работы электрических сетей в ряде динамично развивающихся регионов страны обуславливаются опережающим ростом электропотребления, связанным как с повышением

энерговооруженности отдельных потребителей, так и с подключением новых абонентов к существующей сети. Данное обстоятельство приводит к увеличению нагрузки воздушных линий, на которые дополнительно могут накладываться транзитные перетоки мощности.

Проблема повышения пропускной способности воздушных линий — одна из наиболее характерных и тяжелых проблем развития энергосистем мегаполисов, которая связана с возникновением перегрузок в сетях всех напряжений, чаще всего в ремонтных схемах и при аварийных отключениях элементов сети, когда электрическая нагрузка потребителей ложится на оставшиеся в работе воздушные линии.

Одним из самых распространенных управляющих воздействий противоаварийной автоматики, предназначенной для предотвращения развития аварийных режимов в электроэнергетической системе (ЭЭС), является отключение нагрузки [1]. Отключение нагрузки потребителей электрической энергии применяется для предотвращения нарушений устойчивости, ограничения снижения частоты и напряжения, ликвидации перегрузки контролируемых сечений, линий электропередачи (ЛЭП) и оборудования. Однако такое воздействие нежелательно, так как снижает надежности электроснабжения потребителей.

Большинство существующих подходов к сохранению устойчивости ЭЭС при небалансах мощности путем отключения нагрузки не учитывают различия требований по надежности электроснабжения отдельных потребителей. В связи с этим необходима разработка способа стабилизации работы ЭЭС, учитывающего требования по надежности потребителей электроэнергии и исключающего их полное отключение [2].

Для повышения надежности и предотвращения каскадного развития аварий, связанных с перегрузкой электротехнического оборудования, необходимо разработать устройство, выполняющее функции контроля токовой загрузки проводов воздушных линий, и, в зависимости от полученных показаний, выделения и ограничения электроэнергии потребителей III категории надежности на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ. Отключение данных потребителей приводит к меньшему ущербу от перерыва электроснабжения у потребителей, чем отключение потребителей I и II категорий.

Данное устройство должно обеспечить:

1) повышение надежности электроснабжения потребителей;

2) минимизацию ущерба у потребителей при авариях в энергосистеме;

3) наиболее эффективное использование линий электропередачи за счет исключения их полного отключения и предоставление возможности работы воздушных линий с полной загрузкой по передаваемой мощности;

4) более равномерную загрузку линий благодаря возможности подключения ответственных и неответственных потребителей к одной распределительной линии.

Устройство повышения пропускной способности воздушной линии было разработано на основании патента на изобретение «Устройство повышения пропускной способности» (заявка № 2019116773 от 30.05.2019 г.). Главная составляющая устройства — блок учета параметров воздушной линии, задача которого — формирование уставки по максимально допустимой в данном режиме температуре нагрева провода, для чего необходимо задание сведений о настоящей воздушной линии. Сформированная уставка передается по каналам связи на реле приоритета нагрузки, которое, в зависимости от величины текущего тока в линии, лимитирует потребляемую от сети электрическую мощность.

Принцип работы устройства регулирования передаваемой мощности заключается в следующем: при наличии достаточной свободной мощности в сети появляется возможность временной работы воздушной линии в условиях утяжеленного режима для предотвращения отключения потребителей. Блок контроля свободной мощности по каналу связи подает сигнал о наличии свободной мощности в энергосистеме на блок учета параметров линии, тем самым разрешая работу воздушной линии в утяжеленном режиме. Блок учета параметров линии, на основе заложенных в нем параметров линии (материал и сечение провода, тип изоляции, наружная температура, предварительная загрузка линии, срок эксплуатации воздушной линии), формирует уставку по максимально допустимой температуре нагрева провода на пределе возможности, в том числе по условиям механической прочности и сохранения допустимых габаритов провиса провода. Значение температуры провода воздушной линии, измеренное посредством датчика тока, поступает на компаратор и сравнивается со значением уставки, заданной блоком учета параметров линии. Как только значение температуры воздушной линии становится равным уставке, срабатывает контактор и отключает необходимое количество очередей неприоритетной нагрузки. При отключении нагрузки устройство сигнализации оповещает о срабатывании контактора и отключении потребителей. Как только температура воздушной линии станет ниже уставки, происходит обратный процесс подключения неприоритетной нагрузки.

Были сформулированы основные функциональные требования для устройства повышения пропускной способности воздушных линий:

- постоянный контроль тока нагрузки;
- изменение уставки в зависимости от входного сигнала;
- сравнение тока нагрузки с током уставки;
- отключение неответственных потребителей от питающей сети.

Разработанный способ повышения пропускной способности воздушных линий способен заметно повысить надежность электроснабжения потребителей в условиях аварийных ситуаций в результате возможности работы элементов электрической сети в режиме перегрузки в дополнительный отрезок времени, необходимый для ликвидации аварии или восстановления работоспособности поврежденных элементов; минимизировать ущерб потребителям при нарушении электроснабжения [3].

Литература

1. **Овчаренко Н.И.** Автоматика энергосистем: учеб. для вузов. 3-е изд., испр. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 476 с.
2. **Формирование** графиков нагрузки потребителей электроэнергии для стабилизации работы электроэнергетической системы / Д.Н. Удинцев, Г.В. Шведов, П.К. Милованов, М.М. Сергеева // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (16—17 May, 2020). 2020. Vol. 837. P. 1—9.
3. **Удинцев Д.Н., Шведов Г.В., Милованов П.К.** Предотвращение развития аварийных ситуаций в электроэнергетической системе за счет гибкого регулирования потребления электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 5(56). С. 58—63.

Е.П. Младзиевский, ev.mladzievskiy@gmail.com,
Е.Н. Рыжкова, RyzhkovaYN@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ КАК СПОСОБ БОРЬБЫ С ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМИ ПРИ БОЛЬШИХ РАССТРОЙКАХ КОМПЕНСАЦИИ

Применение дугогасящих реакторов (ДГР) оправдано в сетях среднего напряжения со значениями емкостного тока, превышающими заданные нормативные уровни [1]. Дугогасящие реакторы представляют собой регулируемые катушки индуктивности, подключаемые к нейтральной точке распределительной сети. При возникновении в сети однофазного замыкания на землю ДГР ограничивает ток в месте замыкания, так как создаваемый им индуктивный ток компенсирует емкостную составляющую первой гармоники тока замыкания. При этом важным критерием в сетях с использованием ДГР является степень компенсации емкостного тока. Нормативно допускается расстройка компенсации не более 5 % емкостного тока сети, причем только в режиме перекомпенсации [2, 3].

Однако функционирующие в настоящее время в распределительных сетях ДГР далеко не всегда могут обеспечить нормативные требования по степени расстройки компенсации, так как большинство из них не оборудовано системами автоматической подстроки тока реактора под емкостный ток сети [4],

который в условиях однофазного замыкания на землю может изменяться в достаточно широких пределах. В рамках данной работы рассмотрены негативные процессы, происходящие в сети с однофазным замыканием на землю при большой степени расстройки компенсации, и способы борьбы с ними.

Для определения действующего значения остаточного тока ОЗЗ в сети с дугогасящим реактором можно воспользоваться формулой

$$I_{\text{ост}} = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_L)^2},$$

где I_a — активный ток в месте замыкания; I_C — емкостный ток в сети; I_L — ток реактора.

Здесь необходимо отметить, что в остаточном токе замыкания, помимо приведенных выше составляющих промышленной частоты, присутствуют токи высших гармоник, генерируемые потребителями с нелинейной нагрузкой. Также источником гармонических токов является заземляющая дуга и часто сам дугогасящий реактор. Эти токи оказывают негативное влияние на сеть, осложняют характер горения заземляющей дуги и снижают эффективность применения дугогасящего реактора. Для борьбы с этим явлением необходимо использовать различные фильтры гармоник, выбранные исходя из конкретных условий эксплуатации сети. В рамках данной работы сосредоточимся на рассмотрении активной и индуктивной составляющих тока замыкания на землю.

Запишем приведенную выше формулу через емкостную составляющую первой гармоники тока ОЗЗ:

$$I_{\text{ост}} = I_C \sqrt{\left(\frac{I_a}{I_C}\right)^2 + \frac{(I_C - I_L)^2}{I_C^2}}.$$

Первое слагаемое под корнем обусловлено активными потерями в реакторе, а также утечками активного тока по изоляции сети. Данную величину называют коэффициентом успокоения сети. Для удобства обозначим ее через d. Коэффициент успокоения является безразмерной величиной, или его выражают в процентах, для сети с компенсированной нейтралью принимают $d = 0{,}05$.

Второе слагаемое под корнем называют степенью расстройки компенсации и обозначают как ν. Его также можно выражать в процентах. Как было отмечено выше, степень расстройки компенсации не должна превышать 5 %.

Рассмотрим характер восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги однофазного замыкания на землю. Для этого построим график этого напряжения и его огибающей. При этом учтем две ситуации: в

одном случае степень расстройки компенсации задана в пределах нормативно допустимой (5 %), а в другом при — расстройке компенсации 30 %.

Известно, что уравнение огибающей напряжения на поврежденной фазе после погасания заземляющей дуги имеет вид

$$U_{\text{ог}}(t) = U_{\text{ф}m}\sqrt{1+e^{-\omega dt}-2e^{-\frac{\omega dt}{2}}\cos\omega\left(1-\sqrt{1-\vartheta}\right)t},$$

где $U_{\text{ф}m}$ — максимальное фазное напряжение сети; ω — угловая частота.

При этом напряжение на поврежденной фазе с момента гашения дуги изменяется в соответствии со следующим выражением [5]:

$$U_a(t) = U_{\text{ф}m}\left[\sin(\omega t+\varphi_{\text{гаш}})-e^{-\frac{d\omega t}{2}}\sin(\omega_{\text{з}}t+\varphi_{\text{гаш}})\right],$$

где $\varphi_{\text{гаш}}$ — угол, при котором произошло гашение дуги; $\omega_{\text{з}}$ — частота свободных колебаний переходного процесса изменения напряжения на нейтрали.

Используя выражения для напряжения на поврежденной фазе и его огибающей, построим графики переходного процесса после погасания дуги при различных степенях расстройки компенсации. Примем коэффициент успокоения сети d = %. Как видно на рис. 1, при малых степенях расстройки компенсации (5 %) после погасания заземляющей дуги на поврежденной фазе практически не наблюдается перенапряжений (максимальный уровень $1{,}07U_{\text{ф}m}$). Кроме того, напряжение не сразу достигает максимальных значений, а имеет некоторую задержку времени до полного восстановления, что способствует восстановлению диэлектрической прочности дугового промежутка и снижает вероятность повторного пробоя.

Если увеличить степень расстройки компенсации до 30 %, то переходный процесс приобретает более выраженный колебательный характер с ростом значения перенапряжений.

Как видно на рис. 2, с увеличением расстройки компенсации растут и перенапряжения на поврежденной фазе после погасания заземляющей дуги. В данном случае они составляют $1{,}6U_{\text{ф}m}$. Кроме того, теряется эффект плавного восстановления напряжения. При низкой скорости восстановления диэлектрической прочности в месте замыкания такие уровни перенапряжений приведут к повторному пробою, ОДЗ будет иметь перемежающейся характер с биением напряжения в переходном процессе после каждого погасания дуги. Такой характер горения дуги неизбежно приведет к развитию повреждения и увеличению сопутствующего ущерба. Именно по этой причине максимальная расстройка ДГР ограничена значением 5 %, но не более 5 А [2, 3].

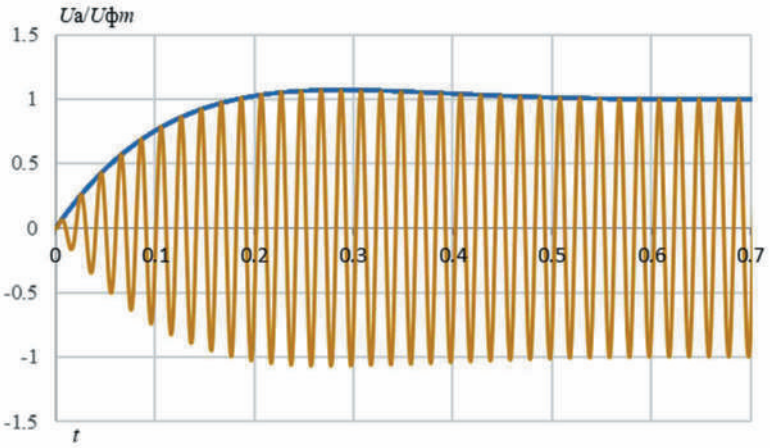


Рис. 1. Процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе при *d* = 0,05 и ν = 0,05

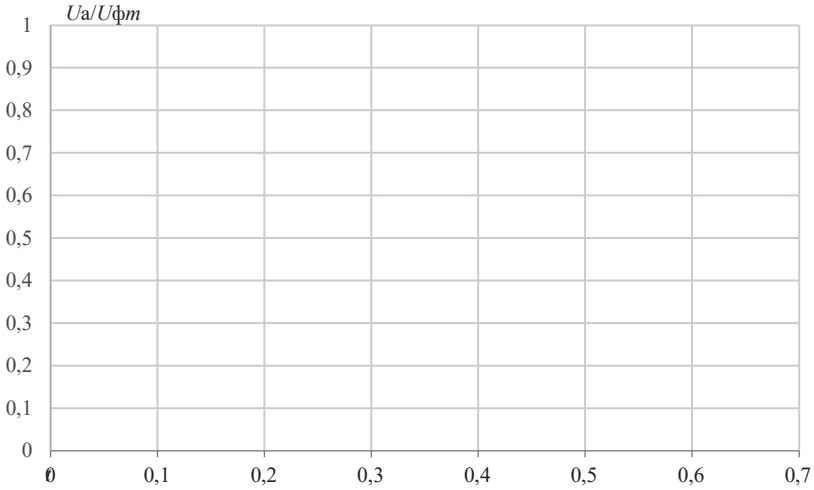


Рис. 2. Процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе при *d* = 0,05 и ν = 0,3

Кроме поврежденной фазы, при больших расстройках компенсации перенапряжения возникают и на «здоровых» фазах. Чтобы оценить возможные уровни этих перенапряжений (например, на фазе *B*) после погасания дуги, можно воспользоваться следующим выражением [5]:

$$U_{B\max} = 1,5U_{\text{ф}m} + \left[U_{\text{ф}m} + U_{Nm} e^{-\frac{d\pi}{2\left|1-\sqrt{1-\vartheta}\right|}} \right] (1-k)(1-k_d),$$

где k_d — коэффициент снижения амплитуды свободных колебаний за половину периода переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги, для производимых расчетов $k_d = 0,1$; k — коэффициент, определяющий влияние междуфазных емкостей на начальные напряжения на неповрежденных фазах при зажигании дуги, при этом для воздушных сетей $k \approx 0,15$; для кабельных сетей трехфазного исполнения $k \approx 0,2$; в сети, проложенной однофазными кабелями, где междуфазные емкости отсутствуют, $k = 0$.

В приведенной выше формуле для расчета максимальных перенапряжений на фазе B значение максимального напряжения на нейтрали после погасания дуги можно определить как

$$U_{Nm} = U_{\text{ф}m} + \frac{2}{3} U_{\text{ф}m} (1-k)(1-k_d).$$

В таблице приведены данные, полученные при различных степенях расстройки компенсации ν. При этом приняты следующие значения расчетных коэффициентов: $d = 0,05$; $k = 0,2$; $k_d = 0,1$. Из представленных значений можно сделать вывод, что при соблюдении нормативного значения расстройки компенсации, перенапряжения на фазах сети значительно ограничены, а время восстановления напряжения на поврежденной фазе достаточно для полной деионизации дугового промежутка.

Расчетные параметры сети после погасания дуги при различных ν

ν	0,05	0,1	0,3	0,5
$U_{\max}/U_{\text{ф}m}$ на поврежденной фазе	1,07	1,25	1,63	1,77
$U_{\max}/U_{\text{ф}m}$ на «здоровой» фазе	2,27	2,45	2,88	3,03
Время восстановления напряжения до $U_{\text{ф}m}$, с	0,18	0,086	0,022	0,012

Однако при увеличении расстройки данные положительные эффекты компенсированного заземления нейтрали исчезают, перенапряжения растут, следовательно, увеличивается вероятность развития повреждения из однофазного замыкания в многофазное с сопутствующими негативными последствиями.

Топология сети постоянно изменяется: происходят оперативные переключения, аварийные отключения, добавляются ответвления к новым потребителям. Соответственно изменяется и емкостный ток сети. В таких условиях точную настройку компенсации могут обеспечить только реакторы с автоматическим регулированием индуктивности. Реакторы, позволяющие осуществлять автоматическую настройку, достаточно дороги, а процесс технического перевооружения занимает продолжительное время, поэтому большое число реакторов, работающих в настоящее время в сетях, имеют либо ступенчатое регулирование, либо не имеют его вообще. Такое положение дел неизбежно ведет к увеличению числа аварийных ситуаций по причинам, описанным выше.

Решением данной проблемы может стать использование комбинированного заземления нейтрали. При комбинированном заземлении к нейтрали сети подключаются параллельно друг другу дугогасящий реактор и резистор. В данном случае реактор будет обеспечивать частичное снижение тока замыкания, а резистор демпфирует перенапряжения и биения, вызванные неточной настройкой.

Известно, что при выборе сопротивления заземляющего резистора в сети с резистивным заземлением нейтрали исходят из условия, что активный ток резистора должен быть равен емкостному току сети. Тогда в случае с комбинированным заземлением нейтрали можно принять, что активный ток резистора должен быть равен нескомпенсированному емкостному току сети, то есть

$$I_R = \vartheta I_C.$$

Отсюда легко получить, что

$$I_R / I_C = \vartheta.$$

Перепишем данное выражение через проводимости и введем обозначение:

$$G_{N^*} = G_N / (3\omega C_\text{ф}) = \vartheta.$$

Оценим уровни перенапряжений, возникающие в сети с комбинированным заземлением нейтрали при выполнении данного равенства. Для этого воспользуемся ранее приведенной формулой для расчета перенапряжений на фазе *B*, изменяя в ней значение расстройки компенсации ν. Так как коэффициент успокоения сети $d = I_a / I_c$, легко показать, что

$$d = \frac{I_a}{I_C} = \frac{U_{\text{ф}m} G_N}{U_{\text{ф}m} 3\omega C_\text{ф}} = G_{N^*}.$$

На диаграмме (рис. 3) показаны максимальные перенапряжения на фазе B при однофазном замыкании на фазе A для различных степеней расстройки компенсации. При этом коэффициент $k = 0$ (наихудший случай), $k_d = 0{,}1$. Значения перенапряжения, полученные для коэффициента успокоения сети $d = G_{N*} = 0{,}05$, характерны для случая приведенных расстроек компенсации для сети с дугогасящим реактором без применения заземляющего резистора, то есть когда имеет место сеть с компенсированной нейтралью. При увеличении значения G_{N*} наблюдается значительное снижение перенапряжений, что свидетельствует об эффективности применения комбинированного заземления нейтрали в тех случаях, когда невозможно добиться точной настройки компенсации.

Из рис. 3 следует, что при выполнении условия $G_{N*} = \nu$ максимальные перенапряжения ограничены уровнем $2{,}5U_{\phi m}$. Данный уровень перенапряжений является приемлемым для сети среднего напряжения, так как при этом внутренняя изоляция электрических машин, как наиболее уязвимый к перенапряжениям элемент, не пострадает (испытательное напряжение такой изоляции $2{,}6U_{\phi m}$).

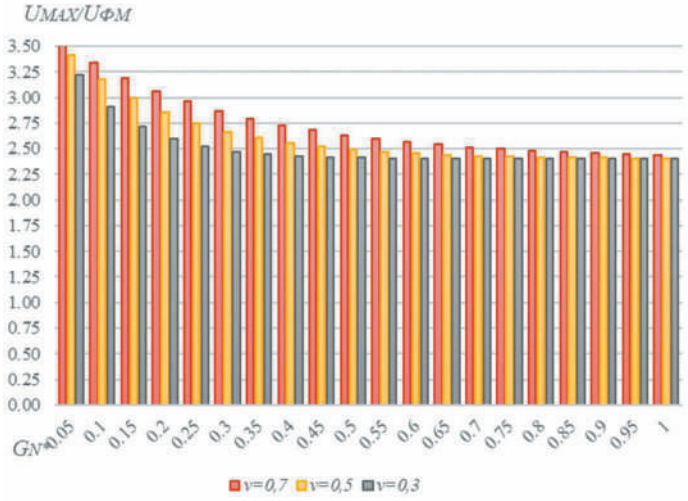


Рис. 3. Перенапряжения при комбинированном заземлении нейтрали

Также можно отметить, что эффект достаточного ограничения перенапряжений ($U_{\max}/U_{\phi m} \leq 2{,}6$) сохраняется до значений $G_{N*} \approx 0{,}7\nu$. Данное более мягкое условие можно использовать для уменьшения суммарного тока ОДЗ там, где это необходимо по соображениям электробезопасности.

Из полученных данных можно сделать вывод, что использование дугогасящих реакторов в сетях среднего напряжения эффективно и безопасно только при возможности автоматического регулирования его индуктивности. Если данное условие является трудновыполнимым, то параллельно реактору в нейтральную точку сети необходимо включить заземляющий резистор, выбранный из максимально возможной в данных условиях расстройки компенсации. Такое решение позволит значительно ограничить значения возникающих при однофазном замыкании на землю перенапряжений, а также создаст условия для самопогасания дуги.

Литература

1. **Правила** устройства электроустановок / Главгосэнергонадзор России. 7-е изд. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007.
2. **РД 34.20.179.** Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ.
3. **СО 153-34.20.501–2003.** Правила технической эксплуатации станций и сетей Российской Федерации.
4. **Кричко В., Миронов И.** Особенности применения дугогасящих реакторов [Электронный ресурс] // Новости Электротехники. 2007. № 1 (43). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php
5. **Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.** Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118 с.

Д.С. Золин, diffl@mail.ru, НИУ «МЭИ», Москва

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Режим работы нейтрали является основополагающим фактором определения многих характеристик сетей среднего напряжения: уровень изоляции электротехнического оборудования; безопасность персонала, имеющего риск попасть под напряжение; надежность электроснабжения.

С точки зрения надежности электроснабжения оптимальным является метод заземления нейтрали через дугогасящий реактор, поскольку возможна продолжительная работа сети при наличии однофазного короткого замыкания. Указанный вариант целесообразно использовать только в случае его применения с автоматической плавной настройкой в резонанс [1] — при этом перенапряжения в случае ОЗЗ не превышают допустимых значений, а ток в месте повреждения не вызывает существенных нарушений в работе оборудования. Эффективная работа ДГР возможна только в случае полного

резонанса, что можно осуществить только при автоматической настройке индуктивности, так как емкостный ток зависит от режима работы сети и подвержен изменениям во времени.

Классификация методов работы систем автоматического управления режима работы нейтрали. Существует множество разновидностей систем автоматического управления индуктивным сопротивлением ДГР — одна из основных классификаций разделяет их по методу определения емкостного тока замыкания на землю (табл. 1) [2—11].

Представленные методы являются косвенными, поскольку место замыкания фазы в сети не определено и ток в точке замыкания не может быть непосредственно измерен. Косвенные методы определения обладают некоторой погрешностью, которая может быть оценена в каждом отдельном случае.

Требования к системам автоматического управления режимом заземления нейтрали. В современных реалиях к средствам автоматизации предъявляется ряд требований, имеющих целью организовать надежную и экономически оправданную систему управления силовым оборудованием:

– совместная работа реакторного оборудования разных типов и производителей при объединении секций;

– автоматизация ступенчато-регулируемых и неуправляемых реакторов;

– измерение емкостного тока в сетях с большим смещением напряжения нейтрали и в сетях с низкой добротностью контура нулевой последовательности;

– поиск поврежденного фидера при полностью скомпенсированном емкостном токе;

– сбор данных о работоспособности систем компенсации различных типов, в том числе осциллограмм работы, записанных непосредственно системой управления, позволяющих снять у оперативного персонала вопросы о работоспособности, в частности, реакторов с подмагничиванием, спровоцированные необъективными исследованиями коммерчески заинтересованных лиц;

– сбор данных для статистического и технического анализа работы оборудования при ОЗЗ с применением облачного хранилища.

Совместная работа реакторного оборудования разных типов и производителей при объединении секций, регулирование различных ДГР средствами автоматизации, не имеющими каналов связи и алгоритмов взаимодействия между собой, невозможны. Для осуществления подключения регулируемых реакторов к системе управления необходимо обеспечить интерфейс для каждой модели, используемой на конкретном объекте. Кроме того, необходимо обеспечить управление и для нерегулируемых реакторов. В этом случае наилучшим решением считается управляемый емкостный корректор мощности, подключаемый параллельно реактору.

Таблица 1

Методы определения емкостного тока замыкания на землю

Метод	Способ определения	Недостатки
По модели сети	Моделирование участка сети с соответствующими параметрами с последующим определением емкостного тока с учетом текущей конфигурации сети [2]	Высокая погрешность настройки компенсатора, вызванная изменением параметров отдельных участков сети от первоначального значения и отклонением частоты, а также сложность передачи информации о состоянии сети по каналам телеуправления
По реактивным проводимостям	Измерение полной реактивной проводимости контура нулевой последовательности сети, емкостной проводимости или разности емкостной проводимости и проводимости реактора [4, 5]	В нормальном режиме работы сети при значительной несимметрии фазных проводимостей относительно земли не может быть проведена резонансная настройка ДГР; чувствительность устройства зависит от емкости сети: и могут возникнуть автоколебания, что приводит к увеличению погрешности настройки и ограничивает использование ДГР с изменяемым воздушным зазором; низкая помехоустойчивость; влияние сопротивления изоляции сети (в основном в сетях напряжением 0,4 кВ) на точность настройки компенсации; наличие дополнительного источника питания. Этот метод не может быть использован в сетях с высоким уровнем несимметрии. В сетях же с большой несимметрией фазных проводимостей относительно земли может выполняться при подключении ДГР к нейтрали сети через быстродействующий коммутатор и раздельном измерении емкости сети и индуктивности реактора [2]
По фазовым характеристикам	Измерение фазы напряжения (тока) по отношению к опорной величине в нормальном режиме работы сети, а в аварийном режиме — напряжение (ток) поврежденной фазы сети. Для повышения точности результатов данного метода необходимо создать искусственную несимметрию в сети или добавить источник опорного напряжения [2, 6, 7]	На реальных объектах с изолированной нейтралью значительная погрешность автоматической настройки системы управления обеспечивается за счет существенных колебаний фазного напряжения. Данное влияние компенсируется подключением малой емкости к одной из фаз или добавлением источника опорного напряжения с целью искусственного смещения нейтрали [2, 6, 7]. Также на точность настройки влияет наличие активных потерь в сети. Указанный способ настройки используется при незначительной несимметрии в нормальном режиме работы и при большой несимметрии в режиме металлического замыкания. Если дуга является перемежающейся, то устройство блокируется

Окончание табл. 1

Метод	Способ определения	Недостатки
По амплитудным (максимальным) характеристикам	Измерение максимального значения напряжения нейтрали или тока дополнительного источника промышленной частоты, подключаемого к нейтрали сети, и минимального значения напряжения поврежденной фазы в режиме замыкания. Источник дополнительного питания не требуется (серьезное преимущество)	Значительное снижение чувствительности измерителя при нарушении компенсации. Также данный способ оказывает влияние на активные потери в контуре нулевой последовательности
По соотношению параметров нулевой последовательности сети	Метод основывается на расчете отношения напряжения (тока) непромышленной частоты (обычно кратной основной), получаемого от источника, к вводимому на ДГР напряжению. Получаем возможность контролировать степень компенсации и селективность сигнализации замыкания на землю. В качестве устройства автоматической настройки для данного метода принято использовать электромагнитный параметрический делитель частоты	В параметрических генераторах с нелинейным полупроводниковым конденсатором может действовать несколько механизмов ограничения амплитуды колебаний. Одним из них может быть изменение среднего (за период колебаний) значения нелинейной емкости в зависимости от амплитуды, вследствие чего колебательная система рассматривается относительно частот возбужденных колебаний. В результате этого ухудшатся условия передачи энергии от генератора накачки к возбужденным колебаниям и прекращается рост амплитуды. Этот механизм ограничения амплитуды возбужденных колебаний называют расстроечным217
По частотным параметрам	Измерение частоты колебаний при переходных процессах — естественных и искусственных (принудительная модуляция параметров контура нулевой последовательности сети). Данный метод сравнительно точен и имеет преимущество при оценке возможности технической реализации	

Адаптация к сложным условиям. Использование резонансного метода настройки реактора с применением смещающего конденсатора и проведением анализа проводимости на непромышленной частоте в условиях низкого сопротивления изоляции в сети. Проводится качественная, а не количественная оценка резонанса с последующим определением знака и степени отклонения. Метод анализа со смещающим конденсатором используется для реакторов без сигнальной обмотки или для сетей с плохой добротностью. Заключается в установке на одну из фаз высоковольтного конденсатора и периодическом измерении напряжения нейтрали, которое зависит от емкостной и активной проводимости изоляции. Затем вычисляется необходимый уровень компенсации.

При анализе проводимости изоляции сети в сигнальную обмотку реактора вводится переменный ток непромышленной частоты и измеряется напряжение нейтрали, являющееся реакцией на это воздействие. На основании напряжения и тока вычисляется активная и емкостная составляющие проводимости изоляции и определяется необходимая настройка реактора.

Также для обеспечения надежной автоматизации ДГР обеспечивается запись всех системных параметров и сигналов. Эти записи содержат изменения настроек, журнал системных событий, журнал замыканий на землю, осциллограммы переходных процессов, графики значений параметров и т.д., с возможностью удаленного доступа для любого специалиста с соответствующим уровнем допуска. Необходимо обеспечить облачное хранение всех оперативных данных.

Реализация автоматического управления режимом нейтрали. На данный момент существуют системы автоматического управления отечественного производства, удовлетворяющие указанным выше требованиям: САНК, УАРК и др. Данные системы имеют ряд недостатков [12]:

– резонансная настройка осуществляется сравнением индуктивности ДГР на промышленной частоте с ранее замеренной емкостной проводимостью на непромышленной частоте; для этого необходимо проводить опыт искусственного однофазного замыкания при наладке на реальной подстанции, в процессе которого подбирают соответствующие коэффициенты;

– существующие устройства лишь отслеживают соотношение текущего емкостного сопротивления сети и индуктивного сопротивления реактора при возникновении замыкания;

– достаточная сложность в схемотехнической реализации и наладке комплекса на подстанции.

Внедрение современных ДГР. В ряде европейских стран в сетях с резонансным заземлением нейтрали используются совместно ДГР и резистор. В сетях среднего напряжения этих стран эксплуатируются ДГР со специальной вторичной обмоткой, к которой может быть подключен низковольтный

резистор. При дуговых замыканиях на землю проявляются все положительные стороны компенсации емкостных токов, т.е. ДГР, настроенный автоматикой в резонанс, снижает перенапряжения до приемлемого с точки зрения эксплуатации уровня. При металлическом замыкании на землю к специальной дополнительной обмотке ДГР подключается резистор на время, достаточное для срабатывания защит от замыкания на землю [13].

Не рекомендуется внедрение в сетях 6—35 кВ ДГР с подмагничиванием ввиду недоработанности их автоматических регуляторов, которые не обеспечивают резонансную настройку, и плохих метрологических характеристик самих реакторов (большие активные потери на максимальных токах подмагничивания, большое содержание высших гармоник в токе компенсации).

Для «резистивно-индуктивного» способа заземления нейтрали сетей 6—35 кВ необходимо применять только плунжерные ДГР. Применение совместно с резистором ступенчатых ДГР и дугогасящих реакторов с подмагничиванием менее эффективно.

Автоматика заземляющего резистора. Какой-то сложной специальной автоматики управления резистором, в отличие от ДГР, не применяют. В сущности, резистор может быть подключен к сети или отключен от нее целиком. Управление ведется через силовой выключатель в ячейке КРУ, который подключает трансформатор заземляющего резистора.

При высокоомном заземлении резистор может длительное время работать при наличии ОЗЗ, поэтому можно обойтись только релейной защитой присоединения.

При низкоомном заземлении используют отключение нормально включенного резистора после истечения определенного времени существования ОЗЗ (0,3—0,4 с). Это связано с требованиями безопасности людей и нагревом самого резистора.

В качестве пускового обычно используют токовый орган по $3I_0$. При этом вся автоматика резистора может быть выполнена на обычном терминале РЗА присоединения [14].

Заключение

1. Применяемые в эксплуатации системы автоматического управления режимом компенсации выполняют регулирование тока ДГР до (плунжерные и статические реакторы) или после (реакторы с подмагничиванием) возникновения замыкания на землю. Формирование управляющего сигнала происходит по результатам измерения амплитудных и фазовых характеристик напряжения на нейтрали или первичных параметров контура нулевой последовательности. Максимальная эффективность компенсации емкостного тока предполагает необходимость использования обоих принципов.

2. Наиболее устойчивыми к изменениям конфигурации и нагрузки сети являются методы управления ДГР, основанные на определении параметров контура нулевой последовательности путем кратковременного возбуждения нейтрали на непромышленной частоте. Они не требуют дополнительного смещения нейтрали с поддержанием постоянной несимметрии фазных напряжений.

3. Повышение точности настройки управляемых реакторов с 5 до 1 % связано с объективными сложностями, особенно в диапазоне малых токов компенсации. В этом случае требуется учет и автоматическая коррекция ряда параметров, отличающихся для разных конструкций ДГР, и принципов их регулирования.

4. Предложенные технические требования к автоматике управления режимом компенсации предусматривают ее устойчивую работу и настройку реактора, близкую к резонансной, независимо от конфигурации и конструкции сети. В сетях, не оснащенных селективными устройствами релейных защит от ОЗЗ, целесообразно дополнение автоматики терминалом ОПФ (определения поврежденного фидера).

Литература

1. **Сафонов Д.Г., Ощепков В.А., Гиршин С.С.** Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 1 (145). С. 58—60.
2. **Сирота И.М**., **Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
3. **Всережимный** регулятор автоматической настройки дугогасящих катушек в кабельных сетях 6—35 кВ / В.Ф. Степанчук и др. // Электрические станции. 1978. № 9. С. 65—68.
4. **Гиря В.И., Петров О.А.** Классификация систем автоматического регулирования настройки дугогасящих реакторов // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т им. Ленинского комсомола. 1977. № 196. С. 189—193.
5. **Гиря В.И., Петров О.А.** Автоматическая настройка компенсации емкостных токов // Электрические станции. 1977. № 3. С. 80—83.
6. **Миронов И.А.** Дугогасящие реакторы в сетях 6—35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока // Новости электротехники. 2007. № 5 (47). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/47/06.php (дата обращения: 31.07.2020).
7. **Миронов И.А., Кричко В.А.** Особенности применения дугогасящих реакторов // Новости электротехники. 2007. № 1 (43). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php (дата обращения: 31.07.2020).
8. **Пат. 2148833 РФ, МПК G 01 R 27/18, G 01 R 27/26**. Устройство быстродействующей селективной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с возможностью безаварийного ввода резерва / А.М. Брянцев,

М.А. Брянцев, А.Г. Долгополов, С.Г. Долгополов; заявитель и патентообладатель Научно-технический центр Всерос. электротехн. ин-та им. В.И. Ленина. № 2009108827/07; заявл. 26.10.1998; опубл. 10.05.2000. Бюл. № 30.
9. **Козлов В., Ильин В.** Дугогасящие реакторы 6—35 кВ. Реализация метода автоматического управления // Новости электротехники. 2008. № 2 (50). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/12.php (дата обращения: 31.07.2020).
10. **Druml G., Kugi A., Parr B.** Дугогасящие реакторы 6—35 кВ. Повышение точности настройки // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 1 (43). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/08.php (дата обращения: 13.04.2007).
11. **Druml G., Seiferd O.** Дугогасящие реакторы 6—35 кВ. Новый метод определения параметров сети // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2 (44). Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/07.php (дата обращения: 31.07.2020).
12. **Шкрабец Ф.П., Остапчук А.В**. Система автоматического управления дугогасящим реактором // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 6. Режим доступа: http://masters.donntu.org/2011/etf/agytin/library/tez2.htm (дата обращения: 31.07.2020).
13. **Кричко В., Миронов И.** Особенности применения дугогасящих реакторов. Новости ЭлектроТехники. Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php (дата обращения: 31.07.2020).
14. **Василевский Д.** Защита и автоматика заземляющего резистора 6(10) кВ. Проект РЗА. Режим доступа: https://pro-rza.ru/zashhita-i-avtomatika-zazemlyayushhego-rezistora-6-10-kv/(дата обращения: 31.07.2020).

Ю.Ф. Лыков, lykyurij1943@yandex.ru, СамГТУ, г. Самара

СЕТЬ 0,4 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ДЛЯ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ

Важная проблема повышения бесперебойности питания электроприемников собственных нужд понизительных подстанций напряжением 110—220/6—35 кВ связана с правильным выбором системы заземления электрической распределительной сети 0,4 кВ собственных нужд. Рекомендуемая в настоящее время руководящими документами [1, 2] система заземления TN-C-S по степени надежности электроснабжения собственных нужд уступает системе с изолированной нейтралью IT. Главная причина заключается в том, что, в отличие от системы TN-C-S, первое однофазное замыкание на землю в системе IT не является коротким замыканием и не вызывает перерыва электроснабжения. Переход на систему IT приведет также к снижению вероятности возникновения электротравм персонала и пожаров, вызванных короткими замыканиями в электрических сетях собственных нужд напряжением ниже 1000 В.

В электрических сетях напряжением ниже 1000 В в России и во многих зарубежных странах, где приняты стандарты МЭК, различают три системы заземления:

а) TN, которая существует в двух вариантах:

TNC — нейтраль заземлена, открытые проводящие части (ОПЧ) занулены с помощью совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего проводника PEN (четырехпроводная схема);

TNS — нейтраль заземлена, ОПЧ занулены и заземлены с помощью нулевого защитного проводника PE (пятипроводная схема);

б) TT — нейтраль заземлена, ОПЧ заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от заземленной нейтрали источника;

в) IT — нейтраль изолирована от земли, ОПЧ заземлены.

Свойства этих систем в нормальном режиме, при трех- и двухфазных КЗ одинаковы. Но в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) (по статистике — до 80 % всех замыканий) они значительно отличаются друг от друга по бесперебойности электроснабжения потребителей, по степени пожарной опасности, по условиям и способам обеспечения электробезопасности, требованиям к заземляющим устройствам, простоте и удобству проектирования и эксплуатации.

Характеристика сетей TNC, TNS. Нейтраль источника глухо заземлена. ОПЧ присоединены к проводнику PEN (система TNC) или к проводнику PE (система TNS), последний присоединен к нейтрали источника и к заземляющему устройству. Ток однофазного КЗ на ОПЧ велик (сотни ампер), высока опасность пожара. Автоматическое отключение должно быть обеспечено максимальной токовой защитой (МТЗ), для чего ток однофазного КЗ должен быть достаточно большим, а сопротивление петли «фаза—ноль» — весьма малым. Прямое прикосновение (прикосновение к токоведущей части, находящейся под напряжением) всегда опасно, так как напряжение прикосновения равно фазному напряжению сети. Косвенное прикосновение (прикосновение к ОПЧ при однофазном замыкании на ОПЧ) считается безусловно опасным.

Преимущества:

- один вид защиты — максимальная токовая защита (МТЗ) от одно-, двух- и трехфазных КЗ;
- экономия за счет возможного отказа от УЗО;
- экономия в схеме TNC благодаря устранению одного полюса выключателей и одного проводника;
- не требуется постоянный эксплуатационный надзор.

Недостатки:

- самая высокая среди сетей TN, TT, IT опасность возникновения пожара при однофазном КЗ на ОПЧ;

- низкая степень бесперебойности электроснабжения: первое же однофазное замыкание на ОПЧ вызывает отключение питания.

В соответствии с нормативными документами [1, 2] именно система заземления TN-C-S должна использоваться для питания потребителей собственных нужд подстанций.

Характеристика сети IT. Нейтраль источника изолирована от земли или присоединена к ней через большое сопротивление; ОПЧ соединены между собой и с землей. Первое однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) или на ОПЧ не является аварией, величина тока замыкания обычно не превышает 1 А. Косвенное прикосновение (прикосновение к ОПЧ при однофазном замыкании на корпус) безопасно, быстрое отключение при первом замыкании не требуется. Напряжение прямого прикосновения в исправной сети меньше фазного; прямое прикосновение может быть опасно при большой емкости сети и/или в режиме работы сети с заземленной фазой.

Общий сигнал о первом замыкании в сети 0,4 кВ подается с помощью устройства контроля изоляции, включенного между нейтралью источника и землей. При двойном ОЗЗ установка автоматически отключается с помощью МТЗ. Проверка надежности отключения при двойном ОЗЗ осуществляется путем расчетов или замеров.

Преимущества:

- первое замыкание не вызывает срабатывания МТЗ;

- при первом замыкании отсутствует пожарная опасность и электротравматизм из-за косвенного прикосновения;

- высокий уровень электромагнитной совместимости;

- в исправной сети IT напряжение прямого прикосновения меньше, чем в сети TN.

Недостатки:

- необходим эксплуатационный надзор;

- эксплуатационный персонал должен иметь достаточную квалификацию, чтобы отыскивать место первого замыкания, и достаточный уровень производственной дисциплины, чтобы не допускать длительной работы сети с заземленной фазой или нейтралью. Для ускорения поиска места первого замыкания на отходящих от ТСН линиях 0,4 кВ рекомендуется установка УЗО высокой чувствительности с действием на сигнал или применение автоматизированной системы контроля изоляции типа Vigilohm Schneider Electric [3];

- необходим высокий уровень изоляции сети; для этого протяженные сети делят на участки; ЭП с плохой изоляцией подключают через разделительные трансформаторы и т.п.;

- прямое прикосновение в поврежденной (с заземленной фазой), но работающей сети более опасно, чем в сетях TT и TN, так как напряжение прямого прикосновения равно линейному;

- повышенная вероятность перенапряжений.

На упрощенной схеме сети IT (рис. 1) показаны: E_a, E_b, E_c — фазные напряжения относительно нейтрали; U_a, U_b, U_c — фазные напряжения относительно земли; U_n — напряжение нейтрали относительно земли; I_a, I_b, I_c, I_n — токи, протекающие через емкости провод-земля. Нагрузка отключена, провод фазы *C* замкнут на землю.

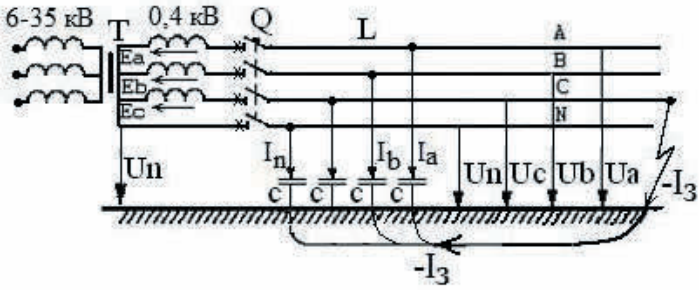


Рис. 1. Первое замыкание в сети IT (принципиальная схема)

Формула расчета тока получают из векторной диаграммы (рис. 2):

$$I_з = I_a \cos 30° + I_b \cos 30° + I_n = 2\frac{U_л}{X_C}\cos 30° + \frac{U_ф}{X_C} =$$

$$= 2\frac{\sqrt{3}U_ф}{X_C}\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{U_ф}{X_C} = 3\frac{U_ф}{X_C} + \frac{U_ф}{X_C} = 4\frac{U_ф}{X_C} = \frac{U_ф}{X_C/4},$$

где X_C — емкостное сопротивление одной фазы по отношению к земле.

Последнее выражение соответствует расчетной схеме (рис. 3, *а*), в которой эквивалентное емкостное сопротивление $X_{Cэ} = X_C/4$ включено между нейтралью и землей. Если нейтральный провод не распределен по сети (трехпроводная сеть), то $X_{Cэ} = X_C/3$.

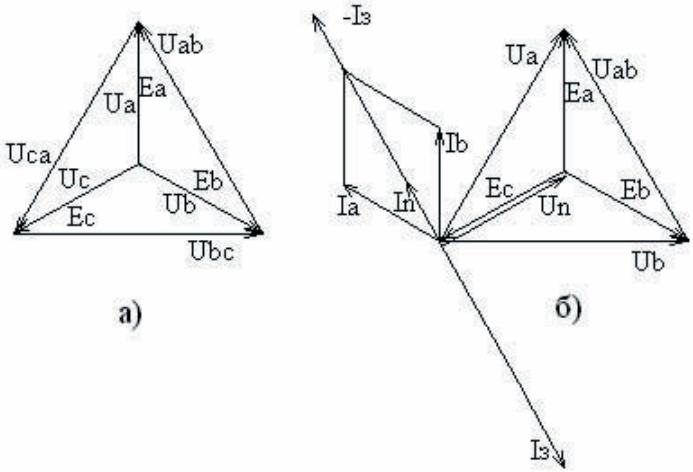


Рис. 2. Векторные диаграммы: *а* — исправная сеть, *б* — первое замыкание в сети

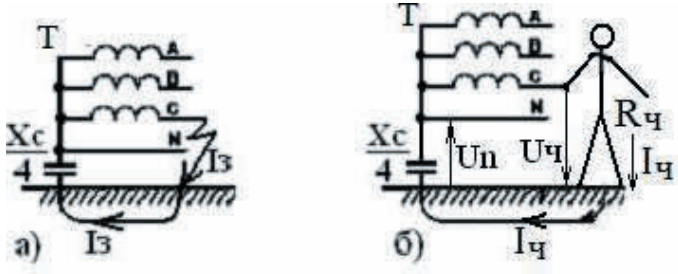


Рис. 3. Расчетные схемы первого замыкания (*а*) и прямого прикосновения (*б*) в исправной сети

Если в отсутствие первого замыкания человек касается токоведущей части, находящейся под напряжением (рис. 3, *б*), то ток $I_ч$ будет протекать через два сопротивления: тело человека (сопротивление $R_ч$) и эквивалентное емкостное сопротивление изоляции сети $X_C/4$, включенные последовательно:

$$I_ч = \frac{U_ф}{Z} = \frac{U_ф}{\sqrt{(X_C/4)^2 + R_ч^2}}.$$

В отличие от системы TN, напряжение прямого прикосновения $U_ч$ меньше фазного $U_ф$:

$$U_{\text{ч}} = I_{\text{ч}} R_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}} R_{\text{ч}}}{\sqrt{(X_C/4)^2 + R_{\text{ч}}^2}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{\left(\frac{X_C/4}{R_{\text{ч}}}\right)^2 + 1}}.$$

Пример. Определить величину тока ОЗЗ и напряжения прямого и косвенного прикосновений в сети IT с распределенной нейтралью, $U_{\text{н}} = 380$ В. Сеть выполнена кабелями, имеющими удельную емкость одной жилы относительно заземленной оболочки $C_0 = 0{,}35 \cdot 10^{-6}$ Ф/км, $L = 1$ км, $R_{\text{заземл}} = 30$ Ом, сопротивление тела человека $R_{\text{ч}} = 2500$ Ом.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_0 L} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 0{,}35 \cdot 1} = 9{,}1 \text{ кОм},$$

Ток ОЗЗ: $I_{\text{з}} = 4U_{\text{ф}} / X_C = 4 \cdot 220 / 9{,}1 = 97$ мА.

Напряжение прямого прикосновения в исправной сети:

$$Z = \sqrt{R_{\text{ч}}^2 + (X_C/4)^2} = \sqrt{2{,}5^2 + (9{,}1/4)^2} = 3{,}38 \text{ кОм},$$

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z} = \frac{230}{3{,}38 \cdot 10^3} = 0{,}068 \text{ А} = 68 \text{ мА},$$

$$U_{\text{ч}} = I_{\text{ч}} R_{\text{ч}} = 0{,}068 \cdot 2500 = 170 \text{ В}.$$

Меньшее сопротивление тела человека, например $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом, приведет к снижению напряжения прямого прикосновения. При любом соотношении сопротивлений $R_{\text{ч}}$ и $X_C/4$ напряжение прямого прикосновения меньше фазного. Напряжение косвенного прикосновения при первом ОЗЗ безопасно:

$$U_{\text{косв}} = I_{\text{з}} R_{\text{заземл}} = 0{,}097 \cdot 30 = 2{,}91 \text{ В}.$$

Ток ОЗЗ не представляет никакой опасности, напряжение прямого прикосновения меньше фазного, напряжение косвенного прикосновения при первом замыкании безопасно.

Вывод. При выборе системы заземления сети 0,4 кВ для электроснабжения потребителей собственных нужд подстанций предпочтение следует отдавать системе заземления IT, превосходящей систему TN-C-S по бесперебойности питания, по электро- и пожарной безопасности.

Литература

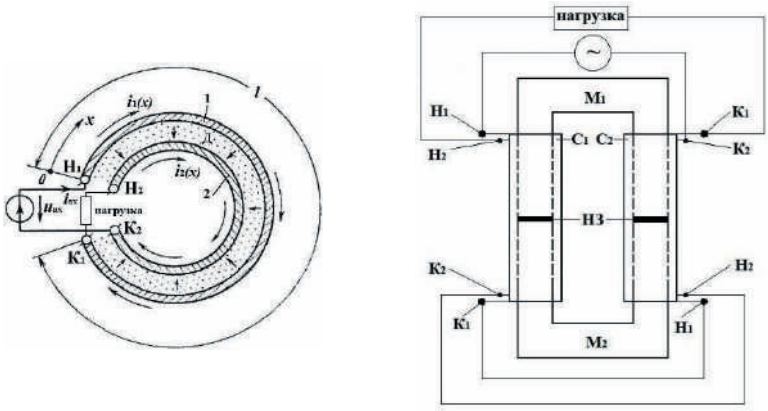
1. **СТО 56947007-29.240.40.263-2018.** Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения : стандарт организации ПАО «ФСК ЕС».
2. **СТО 70238424.29.240.10.013-2009.** Системы собственных нужд подстанций. Условия создания. Нормы и требования : стандарт организации НП «ИНВЭЛ».
3. **Система заземления IT для повышения бесперебойности энергоснабжения.** Vigilohm. Каталог 2019. URL: https://www.se.com/ru/ru/download/document/MKP-CAT-VIGILOHM-19/
4. **Лыков Ю.Ф.** Выбор системы заземления электрической сети индивидуального жилого дома // Фёдоровские чтения – 2019 : XLIX Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 20—22 ноября 2019 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.

П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, М.В. Карпунина, А.А. Кваснюк, Ф.Н. Шакирзянов, MikheevDV@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КАТУШКИ-КОНДЕНСАТОРА (КАТКОНА)

Введение. Катушка-конденсатор (каткон) является пассивным элементом электрической цепи, обладающим одновременно индуктивными и емкостными свойствами [1—5]. Общий принцип построения электротехнических устройств на основе каткона, впервые описанный в трудах Р. Ривза [1], П.Н. Мёргатройда [2], И.В. Волкова, А.Н. Миляха [3, 6], Г.П. Задерея [7], представлен на рис. 1, *а* [4] и заключается в следующем. Два проводника *1* и *2* длиной *l* изолируют друг от друга слоем диэлектрика Д, а источник питания $u_{вх}$ подключают к началу первого проводника $Н_1$ и к концу второго проводника $К_2$ (входные выводы). Выходные выводы каткона $К_1$ и $Н_2$ (начало второго проводника и конец первого проводника) могут оставаться разомкнутыми (режим холостого хода — ХХ) или замкнутыми (режим короткого замыкания — КЗ), а также к ним может быть подключена произвольная нагрузка [8].

В результате такого подключения источника в проводниках *1* и *2* возникают токи проводимости $i_1(x)$ и $i_2(x)$, в сумме дающие входной ток $i_{вх}$, а в диэлектрике между проводниками — токи смещения [5]. Таким образом, электротехнические устройства на базе каткона характеризуется двумя рабочими параметрами — индуктивностью и емкостью. Общая характеристика электромагнитных процессов в катконе как элементе электрической цепи приведена в [1—3, 5, 8].



а) *б*)

Рис. 1. Общий принцип построения каткона [4, 9—10] и функциональная схема двухсекционной модели электротехнического устройства на основе каткона [8, 11—12]

При создании силовых электротехнических устройств и комплексов для решения ряда энергетических задач эффективной является конфигурация каткона, представленная на рис. 1, *б* [13]. Секции устройства C_1 и C_2 выполняются в виде двухзаходной намотки катушки в виде сложенных вместе изолированных друг от друга пленками диэлектрика проводников, соединяются между собой последовательно согласно и располагаются на двух П-образных участках магнитопровода M_1 и M_2, отделенных друг от друга равными по длине немагнитными зазорами НЗ. Источник напряжения подключается к выводам H_1 секции C_1 (проводник *1*) и K_2 секции C_2 (проводник *2*). Таким образом, одно техническое устройство сочетает в своей структуре функции реактора и конденсатора. В частности, такое конструктивное исполнение каткона позволяет изменять значение его эквивалентной индуктивности, достигать необходимых резонансных частот и реализовывать различные функциональные схемы для разнообразных инженерных задач [13], например при разработке фильтрокомпенсирующих (ФКУ) и токоограничивающих устройств (ТОУ).

Схемотехнические решения ФКУ на базе каткона. Далее описаны разработанные функциональные схемы реализации пассивных ФКУ на базе каткона с улучшенными технико-экономическими показателями, в частности:

- одночастотные ФКУ;
- двухчастотные и поличастотные ФКУ;
- гребенчатая фильтрокомпенсирующая установка (ГФКУ).

Рассмотрим конфигурацию *одночастотного ФКУ на базе каткона* с магнитопроводом, представленную на рис. 2. На двух П-образных участках

магнитопровода из электротехнической стали, разделенных друг от друга немагнитными зазорами НЗ, расположены две секции — $С_1$ и $С_2$. У каждой секции есть выводы: $Н_1$ и $К_1$ — начало и конец первого проводника (листа фольги), $Н_2$ и $К_2$ — начало и конец второго проводника. К выводу $Н_1$ секции $С_1$ и к выводу $К_2$ секции $С_2$ подключены намотанные на магнитопровод катушки коррекции К1—К4. Секции $С_1$ и $С_2$ и катушки К1—К4 соединены последовательно согласно.

Принцип работы рассматриваемого ФКУ заключается в следующем. Источник переменного напряжения $u_{вх}$ подключается через катушки коррекции К1—К4 к выводу $Н_1$ секции $С_1$ и к выводу $К_2$ секции $С_2$, а выводы $Н_2$ секции $С_1$ и $К_1$ секции $С_2$ остаются разомкнутыми ($Z_н \to \infty$, режим ХХ). Согласное включение первой и второй намоток фольги через любые выводы секций обеспечивает суммирование намагничивающих сил, определяемых токами в них. Таким образом, между намотками фольги каждой секции возникает электрическое поле, приводящее к возникновению токов смещения, которые являются намагничивающими для магнитопровода М.

Немагнитные зазоры НЗ необходимы для снижения нелинейности магнитопровода ФКУ, регулирования параметров устройства и настройки режимов работы ФКУ путем изменения их длины (в частности, установления необходимого значения резонансной частоты) [14]. Наличие в ФКУ катушек коррекции К1—К4 позволяет снизить потоки рассеяния за счет канализации потока Ф по магнитопроводу М на соответствующих участках, а также осуществлять регулирование режимов работы устройства [14]. Например, в результате увеличения или уменьшения количества витков катушек имеется возможность изменять значения резонансной частоты, эквивалентной индуктивности и индуктивного сопротивления ФКУ на необходимых частотах.

В результате применения ФКУ на основе каткона реализуется повышение значения cosφ на промышленной частоте за счет компенсации реактивной мощности ($X_{C(\omega)} > X_{L(\omega)}$) при передаче электроэнергии. Снижение коэффициентов гармонических составляющих напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения электрической сети реализуется посредством фильтрации высшей гармоники напряжения при последовательном резонансе ($X_{C(k\omega)} \sim X_{L(k\omega)}$) [15].

Благодаря наличию одновременно двух рабочих параметров (емкости и индуктивности) и явлению самокомпенсации реактивной мощности в едином техническом объекте применение ФКУ на основе каткона позволяет реализовать не только непосредственную техническую задачу, но и обеспечить надежность устройства, снизить количество элементов, соединений и массогабаритные показатели устройства.

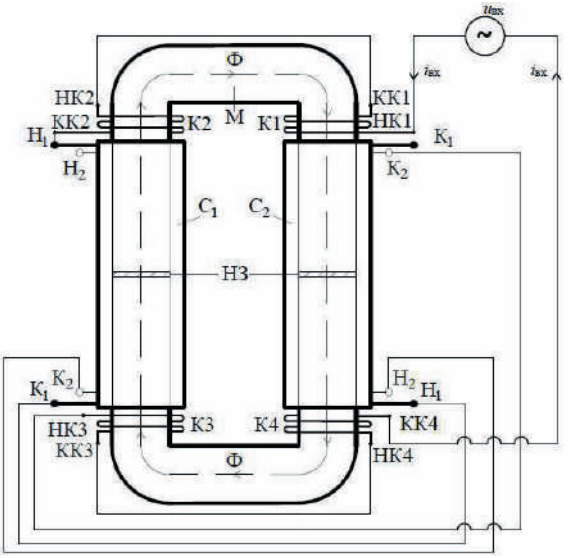


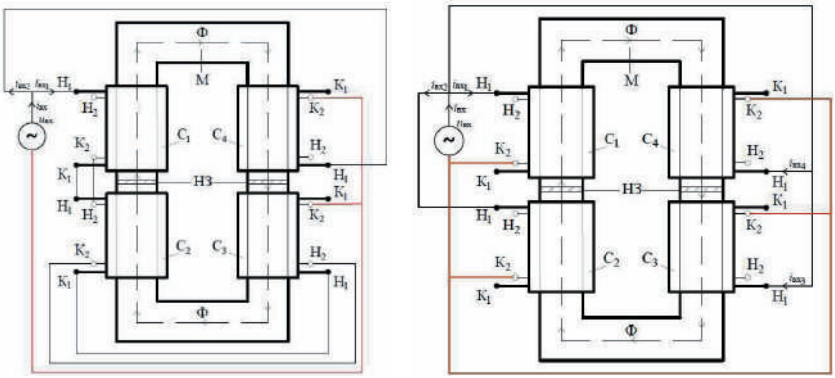
Рис. 2. Функциональная схема одночастотного ФКУ с двумя секциями катконов, магнитопроводом и катушками коррекции [14]: М с НЗ — магнитопровод с немагнитным зазором; C_1 и C_2 — секции каткона, выполненные из двухзаходной катушки, намотанной на М с НЗ; H_1, H_2, K_1, K_2 — начальные и конечные выводы секций C_1 и C_2; К1—К4 — катушки коррекции; НК1—НК4, КК1—КК4 — начальные и конечные выводы катушек коррекции К1—К4

Кроме того, на базе каткона могут быть реализованы не только однофазные, но и трехфазные ФКУ: как при расположении трех секций катконов на двух Ш-образных участках магнитопровода, разделенных немагнитными зазорами, так и при применении трех однофазных ФКУ (рис. 2).

Схема реализации *двухчастотного четырехсекционного ФКУ* представлена на рис. 3, *а*. В этом случае источник напряжения $u_{вх}$ подключается к группе секций C_1, C_2, C_3 (секции соединены между собой последовательно согласно) и секции C_4, при этом все секции идентичны по габаритам и параметрам. Так как группа секций C_1—C_3 и секция C_4 имеют отличные друг от друга интегральные эквивалентные параметры, то приведенная схема соединения позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности на промышленной частоте и фильтрацию сразу двух высших гармоник напряжения одновременно на двух частотах.

Очевидно, что предлагаемая схема реализации позволяет улучшить массогабаритные показатели ФКУ ввиду фильтрации двух высших гармоник при применении одного технического объекта, что является принципиальным отличием данной схемы от ранее предложенной (рис. 2). Однако использование этой схемы в реальных условиях работы устройства приведет

к увеличению потоков рассеяния (из-за наличия соединений секций C_1—C_3) и, как следствие, к низкой добротности колебательного контура. Для устранения данного недостатка необходимо добавить катушки коррекции (по аналогии со схемой на рис. 2).



а) *б*)

Рис. 3. Функциональные схемы поличастотных ФКУ [16, 17]: *а* — двухчастотного ФКУ с четырьмя идентичными секциями с магнитопроводом; *б* — четырехчастотного ФКУ с четырьмя неидентичными секциями с магнитопроводом

Другим подходом к реализации поличастотного ФКУ (ПФКУ) является размещение *n*-го числа секций на магнитопроводе, при этом интегральные параметры данных секций должны быть не идентичны, а источник напряжения должен быть подключен к каждой из секций. Пример схемы реализации четырехчастотного четырехсекционного ПФКУ представлен на рис. 3, *б*. В отличие от предыдущей схемы (рис. 3, *а*) источник напряжения $u_{вх}$ подключен отдельно к секциям C_1, C_2, C_3 и C_4, при этом все секции неидентичны по параметрам. Использование такой схемы реализации ПФКУ на основе каткона позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности на промышленной частоте и достичь резонанса напряжений на четырех различных частотах с целью фильтрации высших гармоник. Стоит отметить, что применение данного подхода позволяет также создавать ПФКУ с одним магнитопроводом (с двумя П-образными участками) в трехфазном исполнении (каждая секция ПФКУ при этом будет подключаться к соответствующей фазе источника).

На основе нескольких ФКУ может быть создана *ГФКУ на базе каткона* для осуществления компенсации реактивной мощности и фильтрации нескольких гармонических составляющих напряжения [11, 18]. На рис. 4 представлена принципиальная условная схема ГФКУ на основе катконов

(на одну фазу). К электрической сети (между проводами $L1$ и $L2$) для компенсации 5-й ($k = 11$), 7-й ($k = 7$) и 11-й ($k = 11$) гармонической составляющих напряжения параллельно подключены фильтрокомпенсирующие устройства ФКУ-1, ФКУ-2 и ФКУ-3 (конструктивное исполнение каждого ФКУ представлено на рис. 2), при этом параметры обмоток и магнитопроводов каждого из них абсолютно идентичны, как и схемы соединений. Магнитопроводы М каждого из ФКУ отличаются только длиной двух немагнитных зазоров НМ в них. Секции С1—С6 идентичны и содержат проводники в виде проводящей фольги *1* и *2* (секции С1, С3 и С5), *3* и *4* (секции С2, С4 и С6), которые соединены последовательно согласно и изолированы между собой диэлектриком Д (рис. 4). При этом сечение проводников из проводящей фольги *1* и *3* больше, чем сечение проводов *2* и *4*, что обусловлено убыванием токов проводников вдоль их длины по закону, близкому к линейному [18]: от выводов $1Н^2$, $3Н^2$, $5Н^2$ секций С1, С3, С5 к выводам $2К^1$, $4К^1$, $6К^1$ секций С2, С4, С6 и от выводов $2К^2$, $4К^2$, $6К^2$ секций С2, С4, С6 к выводам $1Н^1$, $3Н^1$, $5Н^1$ секций С1, С3, С5. Такое исполнение позволяет снизить потери мощности в обмотках и расход материалов на изготовление ФКУ, что подробно описано в [18].

На рис. 5 представлена схема электрической цепи с распределенными параметрами для параллельно подключенных к сети ФКУ-1, ФКУ-2, ФКУ-3. Стоит отметить, что значения индуктивности на единицу длины L_0 для каждого ФКУ устанавливаются за счет изменения длины немагнитных зазоров для настройки резонансной частоты и поэтому различны.

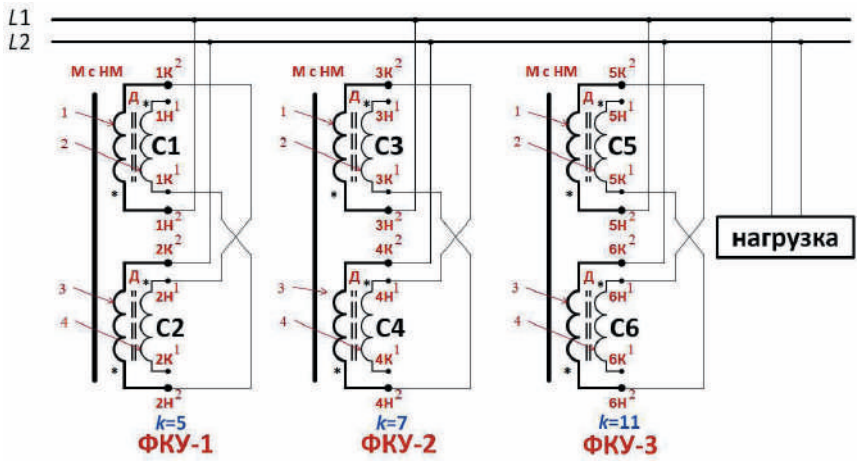


Рис. 4. Принципиальная условная схема ГФКУ [11, 18]

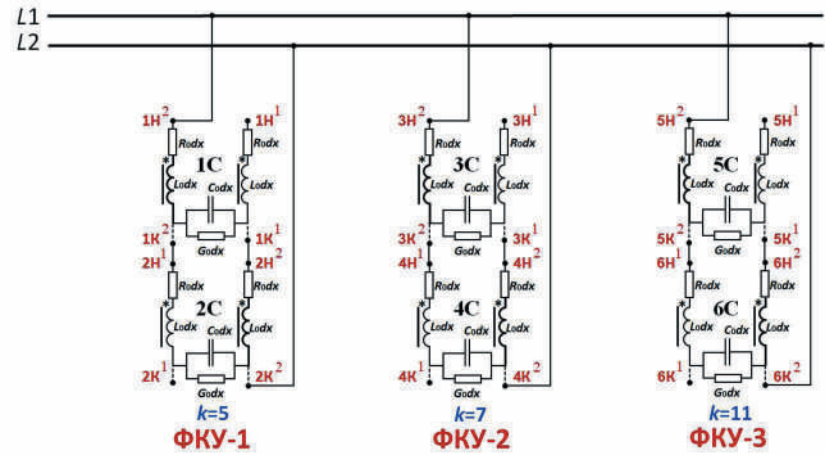


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема замещения ГФКУ [11, 18]

Схемотехнические решения ТОУ на базе каткона. На рис. 6 приведена условная принципиальная схема соединения элементов ТОУ на базе каткона с источником питания *EN*, выключателем *QF* и нагрузкой с сопротивлением $\underline{Z}_{load}$. ТОУ содержит магнитопровод *M* с немагнитным зазором *NG* и катушками коррекции *CC* для снижения нелинейности и возможности регулирования параметров устройства и резонансных частот. На магнитопровод *M* намотаны два проводника (*1* и *2*), выполненных в виде двузаходных обмоток из проводящей фольги, которые отделены друг от друга пленками диэлектрика *D*. У каждого проводника есть выводы для соединения между собой и источником: у проводника *1* — выводы S_1 и E_1; у проводника *2* — выводы S_2 и E_2. Между выводом E_1 проводника *1* и выводом S_2 проводника *2* находится искровой промежуток *SG*. К источнику питания *EN* и к выводу E_2 проводника *2* подключена нагрузка.

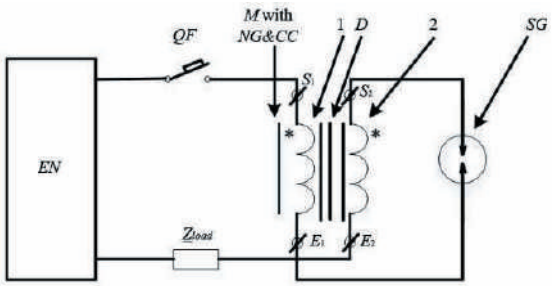


Рис. 6. Условная принципиальная схема соединения элементов ТОУ [19, 20]

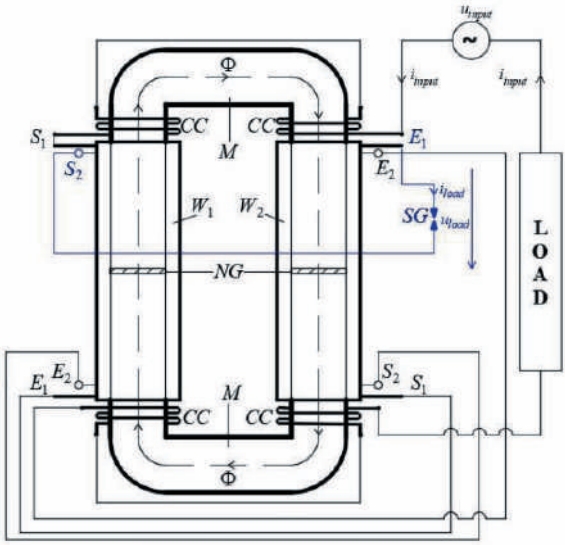
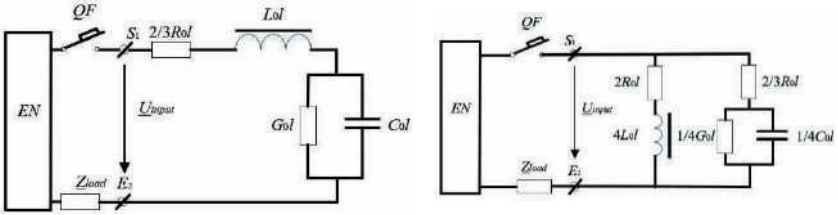


Рис. 7. Функциональная схема ТОУ на базе каткона [21]

На рис. 7 представлена функциональная схема двухсекционного ТОУ на базе каткона.

На рис. 8 изображены схемы ТОУ с эквивалентным представлением электрической цепи относительно входа устройства между выводом S_1 проводника *1* и выводом E_2 проводника *2*. Эквивалентные части схем замещения, учитывающие магнитопровод *M*, проводники *1*, *2* и пленки диэлектрика *D*, получены на основе синтеза цепи с распределенными параметрами [4] с учетом, что искровой промежуток *SG*, подключенный к выводу E_1 проводника *1* и к выводу S_2 проводника *2*, разомкнут (рис. 8, *а*) и замкнут (рис. 8, *б*).



а) *б*)

Рис. 8. Эквивалентная электрическая схема замещения ТОУ на базе каткона при разомкнутом (*а*) и замкнутом (*б*) искровом промежутке *SG* [4, 16, 19]

Принцип действия ТОУ на основе каткона заключается в следующем. В нормальном режиме работы (при отсутствии короткого замыкания — рис. 8, *а*) ТОУ на базе каткона настроено в режим резонанса и представляется относительно выводов S_1 и E_2 (искровой промежуток разомкнут) эквивалентным элементом с практически чисто резистивным сопротивлением, определяемым режимом резонанса напряжений. В случае возникновения короткого замыкания напряжение на нагрузке уменьшается до нуля, а напряжение на входе ТОУ значительно возрастает, что приводит к увеличению выходного напряжения ТОУ (между искровым промежутком *SG*). Выходное напряжение примерно в $2Q$ раз больше [20], чем входное напряжение (Q — добротность), поэтому его увеличение приводит к пробою искрового промежутка, в результате чего входное сопротивление ТОУ существенно возрастает из-за достижения резонанса токов на этой же частоте (рис. 8, *б*). Увеличение входного сопротивления ТОУ приводит к ограничению возникшего тока короткого замыкания.

Показатели надежности, быстродействия и энергоэффективности ФКУ и ТОУ на базе каткона, сформированные на основе анализа [22, 23], приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Показатели надежности, быстродействия и энергоэффективности ФКУ на базе каткона

Показатель	Критерий
Надежность	
Интенсивность отказов в период приработки (первые 2 года), 1/ч, не более	$1 \cdot 10^{-7}$
Интенсивность отказов после периода приработки, 1/ч, не более	$5 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент готовности, не менее	0,995
Срок службы, лет, не менее	30
Проверка на надежность	ФКУ должны выдерживать проверку на надежность при напряжении 1,4 номинального напряжения переменного тока частоты 50 Гц при времени наблюдения
Допустимые превышения напряжения между выводами конденсатора при длительности: - 12 ч в течение каждых 24 ч; - 30 мин в течение каждых 24 ч; - 5 мин не более 200 раз в течение срока службы; - 1 мин не более 200 раз в течение срока службы	 $1{,}10U_{\text{ном}}$ $1{,}15U_{\text{ном}}$ $1{,}20U_{\text{ном}}$ $1{,}30U_{\text{ном}}$

Окончание табл. 1

Показатель	Критерий
Испытательное напряжение, приложенное между выводами конденсаторов (переменное/постоянное), кВ	$2{,}15U_{ном}$ / $4{,}3U_{ном}$ в течение 10 с
Отклонение значения емкости от номинального, %, не более	5
Быстродействие	
Быстродействие системы регулирования, с	1—60
Энергоэффективность	
Потери активной мощности, Вт/квар	≤0,2
Добротность, о.е.	≥80
Показатели, характеризующие несинусоидальность напряжения	ГОСТ 32144–2013
Экономические характеристики	
Удельная масса, кг/квар	5 (на 5 квар) 0,45 (1200 квар)
Удельные габариты, м3/квар	0,0715
Удельная стоимость, руб./квар	≤2000

Таблица 2

Показатели надежности, быстродействия и энергоэффективности ТОУ на базе каткона

Показатель	Критерий
Надежность	
Остаточное напряжение на шинах РУ при коротком замыкании за ТОУ, %, не менее	80
Срок службы, лет, не менее	30
Установленный ресурс за срок службы, не менее	100 КЗ при суммарной продолжительности не более 180 с
Время короткого замыкания, с, не менее	3
Ток термической стойкости, А, не менее	В соответствии с ГОСТ 14794–79
Ток электродинамической стойкости, А, не менее	В соответствии с ГОСТ 14794–79
Быстродействие	
Время срабатывания ТОУ, мс, не более	100

Окончание табл. 2

Показатель	Критерий
Энергоэффективность	
Номинальный ток	Номинальные / удельные потери (индуктивное сопротивление) одинарных реакторов, кВт и Вт/кВ·А, не более:
250 А	5,4 / 29 (1,0); 6,0 / 23 (1,4); 7,8 / 21 (2,0); 10,5 / 23 (2,5)
400 А	5,7 / 34 (0,35); 7,5 / 35 (0,45)
630 А	7,5 / 26 (0,25); 10,2 / 22 (0,40); 12,0 / 18 (0,56)
1000 А	10,5 / 25 (0,14); 14,4 / 22 (0,22); 17,4 / 21 (0,28); 18,6 / 18 (0,35); 22,2 / 17 (0,45); 25,5 / 16 (0,56)
1600 А	22,8 / 22 (0,14); 27,9 / 19 (0,2); 31,5 / 17(0,25); 41,4 / 17 (0,35)
2500 А	51,0 / 20 (0,14); 61,5 / 17 (0,2); 67,5 / 15 (0,25); 91,5 / 14 (0,35)
4000 А	79,5 / 17 (0,10); 108,0 / 13 (0,18)
Добротность, о.е.	≥80
Показатели, характеризующие несинусоидальность напряжения	ГОСТ 32144–2013
Экономические характеристики	
Удельная масса, кг/квар	0,5
Удельные габариты, $м^3$/квар	0,0715
Удельная стоимость, руб/квар	≤2000

Основные направления оптимизации конструктивного исполнения ФКУ и ТОУ на базе каткона.

Надежность:

• соблюдение государственных и отраслевых стандартов в области требований к безопасности, электробезопасности, герметичности, заземлению, условиям окружающей среды, размещению, климатическому исполнению, механической прочности узлов и элементов и тепловым режимам работы устройств при их проектировании и эксплуатации;

• организация эффективной системы охлаждения устройств;

• использование коммутационно-защитных аппаратов, средств автоматики для защиты и управления режимами функционирования устройств;

• соблюдение критериев выбора и проверки проводников устройств на нагрев в длительно допустимом режиме, электродинамическую и термическую стойкость и механическую прочность;

• соблюдение критериев выбора и проверки изоляции секции устройств (ГОСТ 28885–90);

• уменьшение количества контактных и иных соединений в конструкции устройств;

• обеспечение механической прочности вспомогательных конструкций устройств;

• обеспечение защиты металлических конструкций устройства от коррозии.

Быстродействие:

• применение устройства регулирования под нагрузкой для изменения количества витков катушек коррекции при регулировании параметров устройств;

• оптимизация времени протекания переходных процессов (например, посредством подключения резистивного сопротивления, равного волновому сопротивлению каткона к выходным выводам ТОУ [13]).

Энергоэффективность:

• обеспечение высокого значения добротности устройств на основе каткона в резонансных режимах (не менее 70—80) и снижение потерь активной мощности в результате применения наиболее эффективных марок электротехнической стали, обеспечивающих снижение потерь на гистерезис и вихревые токи; изготовление проводников из материалов с высокой удельной проводимостью; использование изоляции с высокой электрической и механической прочностью, хорошими короностойкими и тепловыми свойствами при малой толщине (например, пленочная комбинированная слюдосодержащая изоляция на основе кондуктофола или элмикафола);

• применение дополнительных катушек коррекции для канализации магнитного потока и снижения потоков рассеяния;

• работа устройств в линейной области основной кривой намагничивания магнитопровода.

Заключение. Представлены результаты разработки наиболее эффективных вариантов схемотехнических решений для ФКУ и ТОУ на основе каткона с учетом сформированных критериев и показателей надежности, быстродействия и энергоэффективности. Предложены основные направления по оптимизации конструктивного исполнения ФКУ и ТОУ на базе каткона с улучшенными массогабаритными характеристиками и показателями быстродействия, надежности и энергоэффективности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00730 А.

Литература

1. **Reeves R.** Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. Vol. 122. № 11. P. 1323—1326.
2. **Kemp R.J., Murgatroyd P.N., Walker N.J.** Self-resonance in foil inductors // Electronics Letters. 1975. Vol. 11. № 15. P. 337—338.
3. **Волков И.В., Закревский С.И.** Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Электричество. 1984. № 10. С. 40—43.
4. **Демирчян К.С., Гусев Г.Г.** Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3—10.
5. **Ehsani M., Stielau O.H., van Wyk J.D.** Integrated reactive components in power electronic circuits // IEEE Trans. Power Electron. 1993. Vol. 8. P. 208—215.
6. **Милях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В.** Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. Киев: Наукова думка, 1964. 299 с.
7. **Задерей Г.П.** Многофункциональные магнитные радиокомпоненты. М.: Советское радио, 1980. 136 с.
8. **Разработка** математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев и др. // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 81—88.
9. **Захаров И.В.** Развитие теории, разработка методов и средств повышения эффективности индукторов с самокомпенсацией реактивной мощности: автореф. дисс. … д-ра техн. наук: 05.09.10. Алматы, 2007. 41 с.
10. **Ижикова А.Д.** Индукторы с самокомпенсацией реактивной мощности систем электроснабжения электротехнологического назначения: дисс. … канд. техн. наук: 05.09.03. Челябинск, 2007. 172 с.
11. **Оптимизация** параметров фильтрокомпенсирующей установки на основе каткона / Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, М.В. Карпунина, А.А. Кваснюк // Фёдоровские чтения – 2018 : XLVIII Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 14—16 ноября 2019 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 170—179.
12. **Михеев Д.В.** Экспериментальное исследование частотных характеристик катушки-конденсатора при различных граничных условиях // Электричество. 2018. № 9. С. 52—55.
13. **Моделирование** переходных процессов в катушке-конденсаторе при импульсном воздействии / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев и др. // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 109—122.
14. **Патент 2714925** Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, М.В. Карпунина и др., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2019128529; заявл. 11.09.2019, опубл. 21.02.2020. Бюл. № 6.
15. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** Алгоритм определения параметров каткона — элемента оптимизации режимов электрических сетей // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 69—75.
16. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** Физическое моделирование поличастотного фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 5. С. 67—74.

17. **Патент 167845** Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, Ф.Н. Шакирзянов, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2016130355; заявл. 25.07.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1
18. **Патент 2690689** Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующая установка / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, А.А. Кваснюк и др.; заявитель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2018141885; заявл. 28.11.2018, опубл. 05.06.2019. Бюл. № 16. ГФКУ.
19. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.** Coil-Capacitor As A Basis For Creating Efficient Devices For Distribution Power Networks // Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018. September 20—21, 2018, Hamburg, Germany. Pp. 173—178.
20. **Патент 2660177** Российская Федерация, МПК H02H 9/02 (2006.01). Устройство ограничения токов короткого замыкания / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2017131883; заявл. 12.09.2017, опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19.
21. **Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование электротехнических комплексов на основе каткона (катушки-конденсатора): дисс. … канд. техн. наук: 05.09.03. Москва, 2019. 217 с.
22. **СТО 34.01-3.2.11-012-2017**. Устройства компенсации реактивной мощности. конденсаторные установки 0,4—220 кВ. Общие технические требования.
23. **СТО 56947007-29.180.04.165-2014.** Реакторы токоограничивающие на номинальное напряжение 6—500 кВ. Типовые технические требования.

П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, М.В. Карпунина, А.А. Кваснюк, Ф.Н. Шакирзянов, MikheevDV@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КАТКОНА

Введение. Катушка-конденсатор (каткон) [1—3] является индуктивно-емкостным элементом, на основе которого могут быть созданы электротехнические устройства различного функционального назначения с улучшенными массогабаритными показателями, например, фильтрокомпенсирующие и токоограничивающие устройства (ФКУ и ТОУ). Практическая реализация этих устройств требует разработки алгоритма их проектирования и создания системы автоматизированного проектирования (САПР).

Проектирование ФКУ на базе каткона. С учетом особенностей и допущений математической модели каткона (как для схемы с распределенными параметрами, так и для синтезированной схемы замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами), изложенных в [3—6], эквивалентная схема замещения ФКУ на базе каткона может быть принята в соответствии с рис. 1, где:

• $R_0 l$ (Ом) — резистивное сопротивление ФКУ, определяющее потери в проводниках;

• $L_s l$ (Гн) — индуктивность рассеяния ФКУ;

• $C_0 l$ (Ф) — емкость ФКУ;

• $G_0 l$ (См) — проводимость, учитывающая потери в изоляции между проводниками ФКУ;

• $G_{ст} l$ (См) — активная проводимость магнитопровода ФКУ;

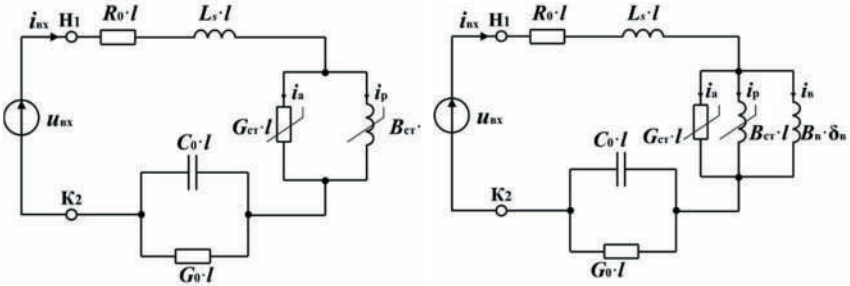
• $B_{ст} l$ (См) — реактивная проводимость магнитопровода ФКУ;

• $B_в \delta_в$ (См) — реактивная проводимость, обусловленная наличием немагнитного зазора в магнитопроводе ФКУ.

Параллельную схему замещения, представленную на рис. 1, можно преобразовать к более простому виду (рис. 2), где:

• $(2/3)R_{0эк} l$ (Ом) — эквивалентное резистивное сопротивление ФКУ;

• $L_{0эк} l$ (Гн) — эквивалентная индуктивность ФКУ.



а) *б*)

Рис. 1. Синтезированные схемы замещения ФКУ с эквивалентными сосредоточенными параметрами на базе каткона с магнитопроводом [7]: *а* — без зазора; *б* — с зазором

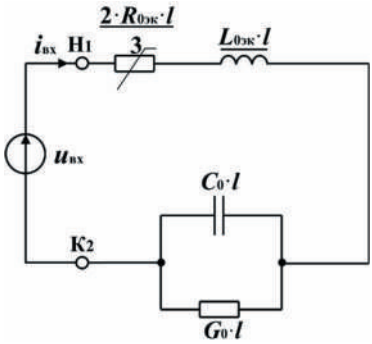


Рис. 2. Преобразованная синтезированная схема замещения ФКУ с эквивалентными сосредоточенными параметрами на базе каткона с магнитопроводом [7]

Установившийся режим в ФКУ определяется напряжением питания электросети $u_{вх}$ и током $i_{вх}$. В приведенных схемах (рис. 1 и 2) имеется возможность пренебречь потерями, обусловленными несовершенством диэлектрика ($G_0 l \approx 0$), так как они несоизмеримо меньше по сравнению с потерями в проводниках и магнитопроводе [3].

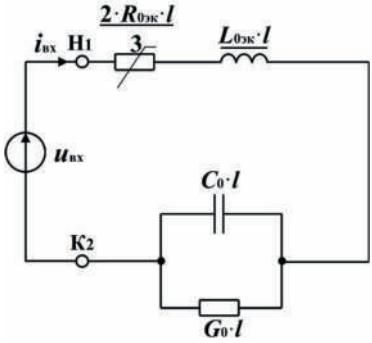


Рис. 2. Преобразованная синтезированная схема замещения ФКУ с эквивалентными сосредоточенными параметрами на базе каткона с магнитопроводом [7]

Алгоритм определения параметров ФКУ на базе каткона с магнитопроводом заключается в реализации следующей последовательности действий:

1. Вводятся исходные данные — как задание, обеспечивающее необходимый режим электрической сети: номинальное напряжение электросети $U_{вх(\omega)}$, промышленная частота f, необходимое для компенсации реактивной мощности (КРМ) значение Q_C, номер высшей гармоники (ВГ) k, которую необходимо подавить, условия окружающей среды. На основе заданного k-го коэффициента гармонической составляющей $k_г = (U_{вх(k)}/U_{вх(\omega)})\cdot 100$, находится допустимое значение напряжения этой гармоники в сети $U_{вх(k)}$.

2. Выбирается конфигурация каткона и его функциональная схема с необходимыми соединениями.

3. Выбираются конструкционные материалы для магнитопровода [марка стали и характеризующие ее параметры согласно зависимостям $B(H)$, $Q_0(B)$, $P_0(B)$] и обмоток каткона (тип алюминиевой фольги — проводников и параметры пленки — диэлектрика, а также характеризующие их параметры).

4. Вычисляются эквивалентные сосредоточенные параметры ФКУ согласно схемам, представленным на рис. 1 и 2.

4.1. Определяются значения емкости конденсатора C (Ф) и его сопротивления X_C (Ом) как устройства, установка которого обеспечивала бы выполнение задания п. 1 по компенсации реактивной мощности Q_C на промышленной частоте f:

$$C = \frac{Q_C}{\omega\, U_{\text{вх}}^2},\ \Phi \quad X_C = \frac{1}{\omega\, C},\ \text{Ом}. \tag{1}$$

4.2. Значения параметров элементов $L_{0\text{эк}}l$ и C_0l в принятой схеме замещения ФКУ (рис. 2) находятся с учетом двух ограничений, накладываемых на них необходимостью обеспечения режимов:

• резонанса на частоте k-й гармоники f_k, из условия существования которого следует выражение эквивалентной индуктивности ФКУ:

$$L_{0\text{эк}}\, l = \frac{1}{(2\pi f_k)^2\, C_0\ l},\ \text{Гн}. \tag{2}$$

• КРМ согласно заданию п. 1, т.е. из рассмотрения равенства сопротивления п. 4.1 и входного реактивного сопротивления цепи (рис. 2) на промышленной частоте f:

$$X_C = X_{C_0 l} - X_{L_{0\text{эк}} l},\ \text{Ом}. \tag{3}$$

4.3. Значение емкости конденсатора C_0l вычисляется из условия выполнения режима КРМ п. 4.2, полагая, что индуктивное сопротивление ФКУ на частоте f учитывает индуктивность, обеспечивающую резонанс на k-й гармонике. Расчет проводится из условия $X_{C0l} = X_C + X_{L_{0\text{эк}} l}$, которое может быть представленное в развернутой форме:

$$\frac{1}{2\pi\ f\ C_0\ l} = \frac{1}{2\pi\ f\ C} + 2\pi\ f\, L_{0\text{эк}}\ l = \frac{1}{2\pi\ f\ C} + 2\pi\ f \frac{1}{(2\pi f_k)^2 C_0\ l}. \tag{4}$$

Выражение для определения значения эквивалентной емкости ФКУ:

$$C_0\ l = C \frac{f_k^2}{f^2 + f_k^2},\ \Phi. \tag{5}$$

4.4. Значение $(2/3)R_{0\text{эк}}l$ определяется при преобразовании первоначальной схемы замещения (рис. 1, *а* и *б* в зависимости от наличия немагнитных зазоров) в эквивалентную (рис. 2) с учетом параметров и характеристик выбранных материалов.

5. Расчет режимов функционирования ФКУ по схеме на рис. 2. На основе принципа суперпозиции выполняется расчет в комплексной форме для двух режимов (с учетом допущения в виде линейности ФКУ):

• режим резонанса напряжений для подавления ВГ напряжения в компенсируемой электросети;

• режим КРМ на промышленной частоте электросети с целью повышения коэффициента мощности.

5.1. Определение значений входного тока и потерь активных мощностей, возникающих в эквивалентном резистивном элементе на каждой из гармоник:

$$\underline{I}_{\text{вх}(\omega)}=\frac{\underline{U}_{\text{вх}(\omega)}}{\underline{Z}_{\text{вх}(\omega)}},\ \text{А},\quad \underline{I}_{\text{вх}(k)}=\frac{\underline{U}_{\text{вх}(k)}}{\underline{Z}_{\text{вх}(k)}},\ \text{А},\quad i_{\text{вх}}=i_{\text{вх}(\omega)}+i_{\text{вх}(k)},\ \text{А}. \qquad (6)$$

$$\Delta P_{(\omega)}=I^2_{(\omega)}\ R_{0\text{эк}(\omega)},\text{Вт},\ \Delta P_{(k)}=I^2_{(k)}\ R_{0\text{эк}(k)},\text{Вт},\ \Delta P=\Delta P_{(\omega)}+\Delta P_{(k)},\text{Вт}. \qquad (7)$$

5.2. Определение значений напряжения на каждом n-м элементе для каждой гармоники:

$$\underline{U}_{n(\omega)}=\underline{I}_{n(\omega)}\underline{Z}_{n(\omega)},\text{В},\ \underline{U}_{n(k)}=\underline{I}_{n(k)}\underline{Z}_{n(k)},\text{В},\ u_n=u_{n(\omega)}+u_{n(k)},\text{В}. \qquad (8)$$

6. Уточнение конструктивного исполнения и компоновки магнитопровода и обмоток ФКУ. На основе полученных данных и расчетов в пп. 3—5 вычисляются конструктивные и массогабаритные параметры ФКУ: масса, длина, площадь сечения, объем, немагнитный зазор магнитопровода; габаритные размеры и количество витков обмоток каткона.

7. Проводится сравнение электрических параметров ФКУ на основе выбранного конструктивного исполнения (п. 6) с электрическими параметрами ФКУ по результатам теоретического расчета (п. 4). При существенных различиях осуществляется варьирование параметров ФКУ. Изменению подвергаются следующие параметры: эквивалентные индуктивность $L_{0\text{эк}}l$ и емкость C_0l, число витков w, геометрия магнитопровода (длина $l_\text{м}$ и площадь сечения S), длина немагнитного зазора $\delta_\text{в}$, изоляция каткона (толщина и ширина пленки диэлектрика).

После этого проводится повторный расчет до установленного совпадения значений из пп. 4 и 7.

8. Осуществляется выбор оснастки, дополнительных соединительных проводников, системы охлаждения, коммутационно-защитных аппаратов и измерительных приборов.

9. Оценивается соответствие ФКУ заданным критериям: энергетическая эффективность, потери активной мощности и добротность, массогабаритные показатели, надежность, механическая прочность, климатические условия, электробезопасность и т.д.

Графическая иллюстрация предлагаемого алгоритма приведена на рис. 3. Его программная реализация осуществлена в программных средах MatLab и MathCAD, а графическая — в AutoCAD, на основе чего сформирована САПР для определения электрических, магнитных и конструктивных параметров ФКУ на базе каткона и расчета режимов его функционирования. Предлагаемые алгоритм и САПР могут быть применены и при проектировании других устройств на основе каткона (например, ТОУ).

Основные аналитические соотношения в электротехнических устройствах на базе каткона. Настройка параметров ФКУ на базе каткона с магнитопроводом может осуществляться посредством применения дополнительных катушек коррекции (патент) или изменения длины $\delta_в$ немагнитных зазоров [8]. В этой связи достаточно важным является учет частотной характеристики $\delta_в(f_0)$ как функции длины немагнитного зазора $\delta_в$ от резонансной частоты f_0.

На основе полиномиальной аппроксимации основной кривой намагничивания (ОКН) магнитопровода $B(H) = \Sigma K_n H^n$ ($n = 2m - 1$, $m = 1…5$), применения закона полного тока, метода гармонической линеаризации и операции усреднения с учетом преобразований [5, 9] было получено аналитическое выражение для определения эквивалентной индуктивности ФКУ на базе каткона:

$$L_{0эк}\, l = \alpha_1 + \alpha_3\ I^2_{m(k)} + \alpha_5\ I^4_{m(k)} + \alpha_7\ I^6_{m(k)} + \alpha_9\ I^8_{m(k)}\,, \text{Гн}, \qquad (9)$$

где α_1, α_3, α_5, α_7, α_9 — коэффициенты, учитывающие аппроксимационные коэффициенты K для ОКН $B(H)$ и значение амплитуды тока $I_{m\omega}$ входного напряжения по промышленной частоте [5, 9]:

$$\alpha_1 = K_1 \frac{w^2 S}{l_м} + \frac{3}{2}\beta_3\, I^2_{m\omega} + \frac{15}{8}\beta_5\, I^4_{m\omega} + \frac{35}{16}\beta_7\, I^6_{m\omega} + \frac{315}{128}\beta_9\, I^8_{m\omega},$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2}\beta_3 + \frac{5}{2}\beta_5\, I^2_{m\omega} + \frac{105}{16}\beta_7\, I^4_{m\omega} + \frac{105}{8}\beta_9\, I^6_{m\omega},$$

$$\alpha_5 = \frac{3}{8}\beta_5 + \frac{63}{16}\beta_7\, I^2_{m\omega} + \frac{567}{32}\beta_9\, I^4_{m\omega},$$

$$\alpha_7 = \frac{5}{16}\beta_7 + \frac{45}{8}\beta_9\, I^2_{m\omega},$$

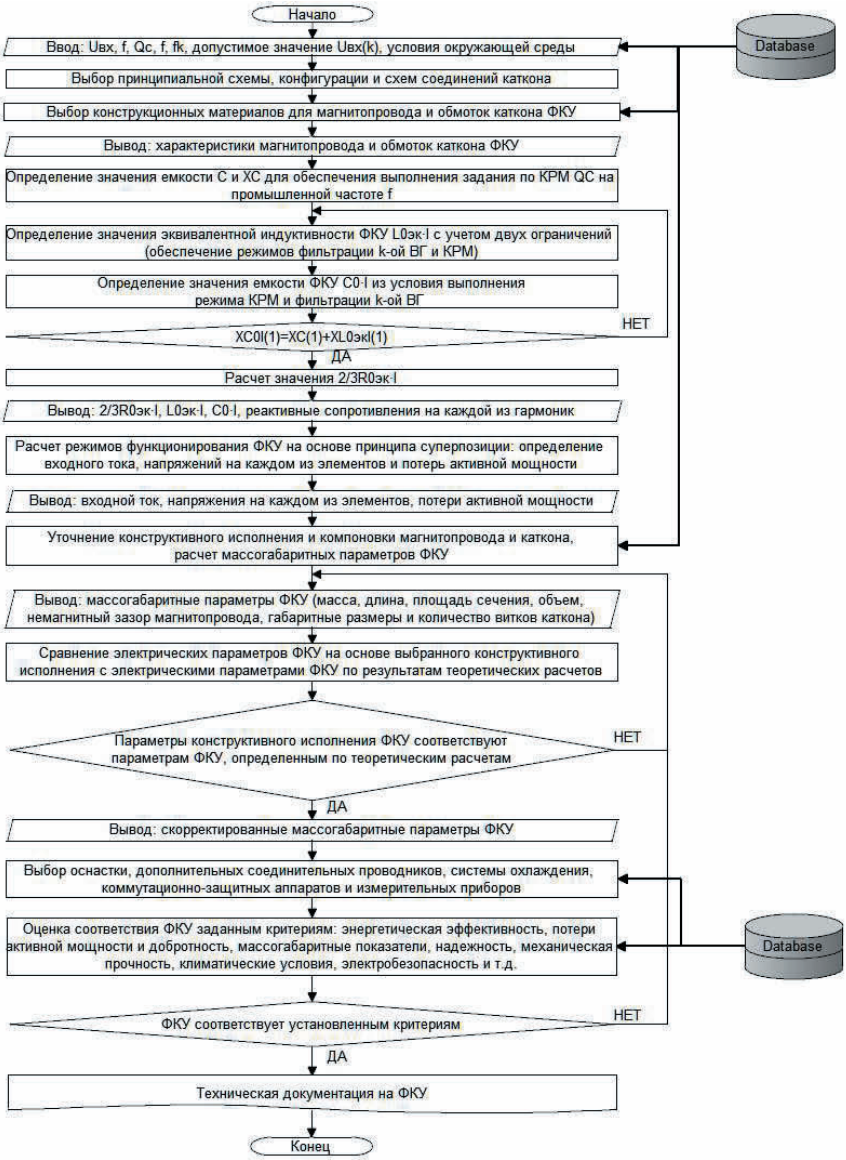


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета ФКУ на базе каткона с магнитопроводом и немагнитными зазорами

$$\alpha_9 = \frac{35}{128}\beta_9,$$

где $\beta_3 = K_3 \frac{w^4 S}{l_м^3}$; $\beta_5 = K_5 \frac{w^6 S}{l_м^5}$; $\beta_7 = K_7 \frac{w^8 S}{l_м^7}$; $\beta_9 = K_9 \frac{w^{10} S}{l_м^9}$;

w (шт.) — число витков; S (м^2) — сечение магнитопровода; $l_м$ (м) — средняя длина магнитопровода.

В рамках линейной модели ФКУ на базе каткона аппроксимация основной кривой намагничивания магнитопровода $B(H)$ определяется коэффициентом K_1: $n = 1$, $m = 1$. При этом в соответствии с [5, 9] эквивалентную индуктивность определяет значение коэффициента α_1, т.е. $L_{0эк} l = \alpha_1$:

$$L_{0эк}\, l = \alpha_1 = K_1 \frac{w^2 S}{l_м}.$$

Для развития полученных в [5, 9] теоретических результатов получим для линейной модели ФКУ на базе каткона с магнитопроводом рекуррентное выражение, устанавливающее непосредственно связь длины немагнитного зазора $\delta_в$ и резонансной частоты f_0. Применим соотношение $\Psi = L_{0эк} l (i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)})$, обратимся к закону полного тока $[H l_м = w(i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)})]$, и, преобразуя форму его записи, получим следующее равенство:

$$\left(i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)}\right) = \left(\frac{\delta_в}{\mu_0 w^2 S} + \frac{l_м}{\mu_а w^2 S}\right)\Psi, \text{ А}, \qquad (10)$$

где $\mu_а = \mu_r \mu_0$ — магнитная проницаемость магнитопровода в линейной модели; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) — магнитная постоянная.

Используя определение индуктивности как отношение $\Psi/(i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)})$, можно выразить (10) через формулу для расчета резонансной частоты:

$$\frac{\Psi}{i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)}} = L_{0эк}\, l = \frac{1}{f_0^2\ 4\pi^2 C_0 l} = \frac{\mu_0 w^2 S}{\delta_в} + \frac{\mu_а w^2 S}{l_м}, \text{ Гн}. \qquad (11)$$

При высокой добротности в режиме резонанса, значение f_0 практически не зависит от потерь, поэтому в (11) учтено, что $G_0 l \approx 0$.

Резонансная частота f_0, при отсутствии немагнитного зазора ($\delta_в = 0$), как следует из (11), определяется следующим выражением:

$$f_0\big|_{\delta_в=0} = f_0 = \sqrt{\frac{l_м}{4\pi^2 \mu_r \mu_0 w^2 S C_0 l}}\ , \text{Гц}. \qquad (12)$$

С учетом последующих преобразований получим в общем виде зависимость $\delta_в$ от резонансной частоты f_0:

$$\delta_в = N\left(f_0^2 - f_{0'}^2\right), \text{ м}, \qquad (13)$$

где $N = 4\pi^2 \mu_0 w^2 S C_0 l$.

С другой стороны, в [5, 9] не рассматривалась возможность получения значения эквивалентной индуктивности ФКУ с магнитопроводом на основе каткона через полиномиальную аппроксимацию ОКН магнитопровода $H(B)$:

$$H(B) = \sum_{n=1}^{n=9} K'_n B^n, \qquad (14)$$

где $n = 2m - 1$, $m = 1, 2, \ldots, 5$; K'_n (о.е.) — коэффициенты аппроксимации.

Применение данного типа аппроксимации в сравнении с ранее рассмотренным является более целесообразным ввиду удобства дальнейших преобразований и большей точности аппроксимации [10].

Используя закон полного тока, связь между потокосцеплением, эквивалентной индуктивностью и магнитной индукцией, запишем выражение для определения $L_{0эк} l$:

$$i_{вх(\omega)} + i_{вх(k)} = \frac{\Psi}{L_{0эк} l} = \frac{w B S}{L_{0эк} l} = \frac{H(B) l_м + H_в \delta_в}{w}, \text{ А}, \qquad (15)$$

затем, используя формулу для расчета резонансной частоты, преобразуем выражение (15) к следующему виду:

$$L_{0эк} l = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0 l + \dfrac{G_0^2 l^2}{C_0 l}} = \frac{w^2 B S}{H(B) l_м + H_в \delta_в}, \text{ Гн}. \qquad (16)$$

Далее с учетом преобразований из (15) и уравнения связи для участка с немагнитным зазором $B = \mu_0 H_в$ получим выражение, отражающее аналитическую зависимость $\delta_в$ от резонансной частоты f_0:

$$\delta_{\text{в}}(f_0) = \frac{w^2 BS\left(4\pi^2 f_0^2 C_0 l + \dfrac{G_0^2 l^2}{C_0 l}\right) - H(B) l_{\text{м}}}{H_{\text{в}}} =$$

$$= \frac{\mu_0 w^2 BS\left(f_0^2 4\pi^2 + \dfrac{G_0^2 l^2}{C_0 l}\right) - \mu_0 H(B) l_{\text{м}}}{B},$$

и окончательно:

$$\delta_{\text{в}}(f_0) = \mu_0 w^2 S\left(4\pi^2 f_0^2 C_0 l + \frac{G_0^2 l^2}{C_0 l}\right) - \mu_0 \left(\sum_{n=1}^{n=9} K'_n B^{n-1}\right) l_{\text{м}}, \text{ м}, \qquad (17)$$

где $n = 2m - 1$, $m = 1, 2, \ldots, 5$.

В случае отсутствия немагнитного зазора $\delta_{\text{в}} = 0$ резонансная частота $f_{0'}$ будет определяться следующим образом:

$$f_0\big|_{\delta_{\text{в}}=0} = f_{0'} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\left(\sum_{n=1}^{n=9} K_n B^{n-1}\right) l_{\text{м}}}{w S C_0 l} - \frac{G_0^2 l^2}{C_0^2 l}}, \text{ Гц}. \qquad (18)$$

В соответствии с (16)—(18) для ФКУ на базе каткона ($C_0 l$ = 12 мкФ) с магнитопроводом из электротехнической стали ЭТ 3407 (S = 0,0005 м^2, $l_{\text{м}}$ = = 0,85 м, w = 304, аппроксимация ОКН: $H(B)$ = 22,655·B – 30,769B^3+ + 35,169B^5 – 19,123B^7 + 4,068B^9) были построены аналитические зависимости (в предположении отсутствия потоков рассеяния и потерь на гистерезис), устанавливающие связь:

- между значениями эквивалентной индуктивности $L_{0\text{эк}}l$ и магнитной индукции B при различных длинах немагнитного зазора $\delta_{\text{в}}$ в магнитопроводе ФКУ на базе каткона (рис. 4, *а* и *б*);
- между значениями эквивалентной индуктивности $L_{0\text{эк}}l$ и длиной немагнитного зазора $\delta_{\text{в}}$ в магнитопроводе ФКУ на базе каткона при различных значениях магнитной индукции B (рис. 5);
- между значениями длины немагнитного зазора $\delta_{\text{в}}$ и резонансной частоты f_0 при различных значениях магнитной индукции B в ФКУ с магнитопроводом на базе каткона (рис. 6).

Анализ полученных зависимостей для ФКУ на базе каткона с магнитопроводом свидетельствует о том, что:

• изменение магнитной индукции B в широком диапазоне при наличии немагнитного зазора ($\delta_в \neq 0$) практически не влияет на изменение других величин (см. зависимости $L_{0эк}l(B)$ на рис. 4, *а* и *б*) и не приводит к изменению зависимостей $L_{0эк}l(\delta_в)$ и $\delta_в(f_0)$ (рис. 5 и 6: данные кривые при изменении значения B накладываются друг на друга);

• увеличение длины немагнитного зазора в магнитопроводе ФКУ приводит к снижению эквивалентной индуктивности и увеличению значения резонансной частоты (рис. 5 и 6).

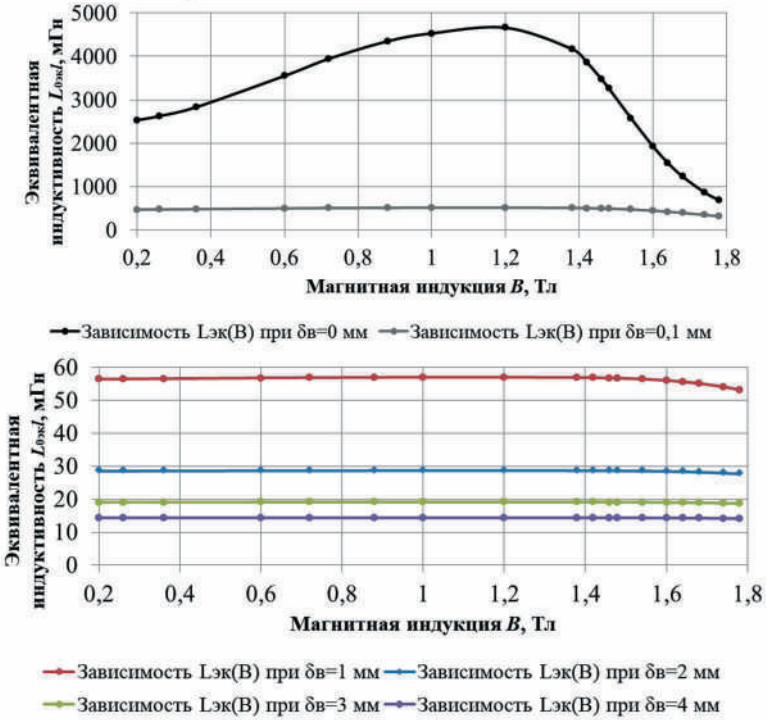


Рис. 4. Зависимость между значениями эквивалентной индуктивности $L_{0эк}l$ и магнитной индукции B при различных длинах немагнитного зазора $\delta_в$ в магнитопроводе ФКУ на базе каткона на основе (16)

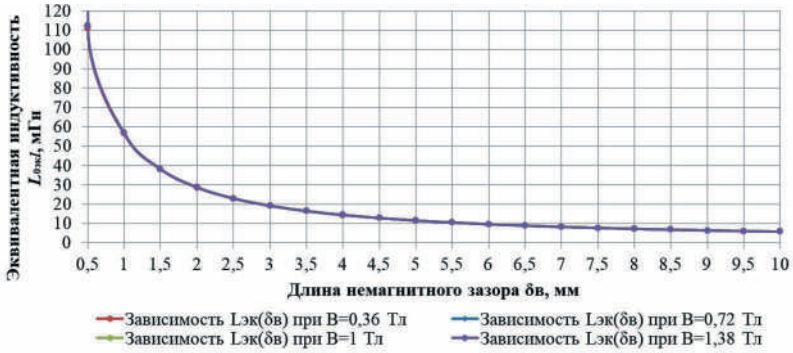


Рис. 5. Зависимость между значениями эквивалентной индуктивности $L_{0эк}l$ и длиной немагнитного зазора $\delta_в$ в магнитопроводе ФКУ на базе каткона при различных значениях магнитной индукции B на основе (16)

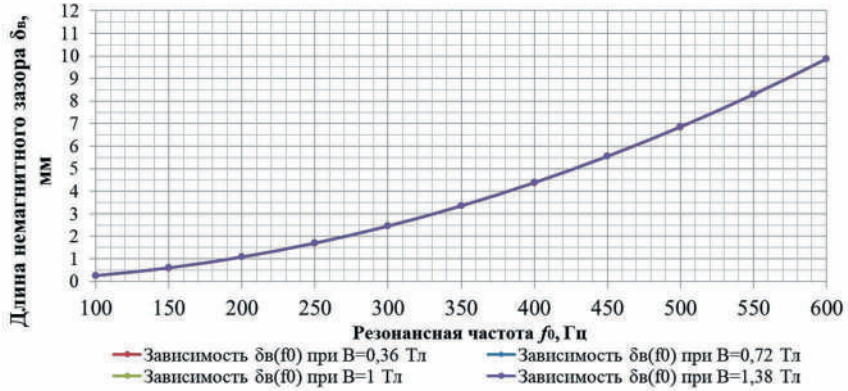


Рис. 6. Зависимость между значениями длины немагнитного зазора $\delta_в$ и резонансной частоты f_0 при различных значениях магнитной индукции B в ФКУ с магнитопроводом на базе каткона на основе (17), (18)

Применение алгоритма расчета ФКУ на базе каткона и технико-экономическое сравнение. Для верификации алгоритма рассматривалось его применение для расчета трехфазного ФКУ компании Hans von Mangoldt GmbH & Co. KG. Исходные данные для расчета: фазное напряжение питания $U_{вх} = 6$ кВ; частота сети $f = 50$ Гц; индуктивность ФКУ на фазу $L_{0эк}l =$ $= 15{,}4$ мГн; площадь сечения магнитопровода $S = 26901$ мм^2; частота 5-й гармоники $f_k = 250$ Гц; материал магнитопровода — электротехническая сталь (технология изготовления — PolyGap, масса 438 кг); материал обмоток — алюминий (масса 82 кг); общая масса реактора с обмотками и

вспомогательными конструкциями — 1035 кг (без вспомогательных конструкций — 520 кг), масса конденсаторов 210 кг, общий объем ФКУ 1,2 м^3, общая площадь около 1,2 м^2.

Согласно п. 2 алгоритма была предложена эквивалентная схема замещения ФКУ, данные по конструктивному исполнению устройства были приведены компанией-производителем (пп. 2 и 3). Согласно п. 4 алгоритма была определена емкость конденсатора ФКУ, составившая $C_0 l$ = 26,344 мкФ. Значения $R_{0эк} l$ для частоты сети (50 Гц) — 0,095 Ом, для частоты 5-й гармоники (250 Гц) — 0,448 Ом [7]. Согласно п. 5 алгоритма были рассмотрены частоты электросети (k = 1) и 5-й гармоники (k = 5) ФКУ, для которых были определены значения величин, представленных в табл. 1.

На основе данных из табл. 1 могут быть представлены мгновенные значения токов и напряжений на входе и на каждом из элементов согласно п. 5. Действующее значение входного фазного тока ФКУ составило 90,1 А, а потери активной мощности на фазу устройства — 1957 Вт. Согласно п. 6 было определено значение немагнитного зазора $\delta_в$ = 5,2 мм и количество витков w = 49. Таким образом, результаты вычислений по алгоритму совпадают с данными о выпускаемой продукции компании Hans von Mangoldt GmbH & Co. KG. В табл. 2 представлены результаты сравнения массогабаритных показателей ФКУ компании Hans von Mangoldt GmbH & Co. KG и ФКУ на базе каткона [7].

Таблица 1

Результаты моделирования установившихся режимов работы ФКУ на базе каткона [7]

Параметр	k = 1	k = 5
Ток $I_{вх}$, А	69	58
Сопротивление $R_{0эк} l$, Ом	0,095	0,448
Напряжение U_R, В	6,523	25,98
Потери мощности на фазу ΔP, Вт	450	1507
Сопротивление индуктивной катушки X_L, Ом	4,836	24,178
Сопротивление конденсатора X_C, Ом	120,89	24,178
Напряжение на индуктивной катушке U_L, В	333,66	1402,32
Напряжение на конденсаторе U_C, В	8341,38	1402,32
Реактивная мощность реактора Q_L, вар	23022,29	81334,79
Реактивная мощность конденсатора Q_C, вар	575555	81334,79

Таким образом, анализируя результаты, представленные в табл. 2, можно сделать заключение о том, что реализация ФКУ на основе каткона потенциально позволяет сократить общую массу устройства примерно на

10 %, занимаемую площадь примерно на 20 %, занимаемый объем примерно на 12 %. Это достигается за счет исполнения конденсатора и реактора в едином техническом объекте.

Таблица 2

Результаты сравнения массогабаритных показателей ФКУ компании Hans von Mangoldt GmbH & Co. KG и ФКУ на базе каткона [7]

Показатель	ФКУ Hans von Mangoldt	ФКУ на базе каткона
Общая масса ФКУ, кг	1245	1117
Общая площадь, занимаемая ФКУ, $м^2$	1,151 $м^2$	0,923
Объем магнитопровода, $м^3$	0,071019	
Общий объем, занимаемый ФКУ, $м^3$	1,196	1,048

Заключение.

1. Предложены синтезированные эквивалентные схемы замещения ФКУ с магнитопроводом на базе каткона с сосредоточенными параметрами,

2. Разработан алгоритм расчета основных эквивалентных параметров ФКУ на базе каткона, учитывающий оптимизацию ФКУ по показателям надежности и энергоэффективности.

3. Установлены аналитические соотношения между основными интегральными величинами и параметрами ФКУ на базе каткона с магнитопроводом.

4. Представлена апробация разработанного алгоритма при расчете стандартного пассивного ФКУ. Показано, что исполнение пассивного ФКУ на базе каткона позволяет снизить массогабаритные параметры устройства.

5. Выбраны программные средства для решения задачи компьютерного моделирования и проектирования каткона и устройств на его основе (MatLab, MathCAD, AutoCAD), разработана система автоматизированного проектирования ФКУ на основе каткона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00730 А.

Литература

1. **Reeves R.** Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. Vol. 122. № 11. P. 1323—1326.
2. **Волков И.В., Закревский С.И.** Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Электричество. 1984. № 10. С. 40—43.
3. **Демирчян К.С., Гусев Г.Г.** Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3—10.

4. **Математическое** и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман, Д.В. Михеев // Электричество. 2014. № 11. С. 58—62.
5. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В.** Математическая модель фильтрокомпенсирующего устройства на основе катушки-конденсатора // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 130—135.
6. **Разработка** математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев и др. // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 81—88.
7. **Алгоритм** определения параметров каткона — элемента оптимизации режимов электрических сетей / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, Ф.Н. Шакирзянов // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 69—75.
8. **Патент 2714925** Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, М.В. Карпунина, А.А. Кваснюк и др., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2019128529; заявл. 11.09.2019, опубл. 21.02.2020. Бюл. № 6.
9. **Математическая** модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман и др. // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 79—84.
10. **Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование электротехнических комплексов на основе каткона (катушки-конденсатора): дисс. … канд. техн. наук: 05.09.03. Москва, 2019. 217 с.

А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
С.В. Белоусов, BelousovSV@mpei.ru,
К.И. Таратонкина, TaratonkinaKI@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ИЗУЧЕНИЕ ЛАВИННО-СТРИМЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВОЗДУХЕ СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ I: ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАВИНАХ

В различных отраслях промышленности применяются технологии, в процессе реализации которых возникают пожаро- и взрывоопасные среды, и потому недопустимо искрение любой природы, в том числе электрической. Причина очевидна: появление высокотемпературной искры способно инициировать возгорание. Электрические разряды могут возникать, например, из-за статической электризации при перекачке нефтепродуктов по трубопроводам и других контактных взаимодействиях материалов с различными значениями работы выхода электронов [1]. Опасность также представляют встречные разряды с заземленных элементов конструкций в

электрическом поле лидера молнии, если они появляются вблизи выходов горючих газов (например, метана) из грунта и сооружений [2].

Поэтому представляемая авторами работа определяет один из аспектов физических основ энергоэффективных высоковольтных электротехнологий и молниезащиты зданий и сооружений [1—3]: в ней сделаны оценки параметров разрядов в однородном поле, превышение которых делает разряды «опасными» в сформулированном выше смысле.

Развитие электрического разряда в газе начинается с появления в нем начального свободного электрона благодаря физическим процессам, объединенным понятием «внешнего ионизатора» [3]. К ним относятся электромагнитные и корпускулярные ионизирующие излучения различной природы, развал отрицательных ионов в электроотрицательных газах.

Если напряженность электрического поля (ЭП) достаточна для ударной ионизации газа электронами, то начальный электрон ионизирует нейтральную молекулу или атом, и в разрядном промежутке (РП) будет двигаться уже два электрона. Они, в свою очередь, ионизируют еще две частицы, и в РП будут двигаться четыре электрона и т.д. В результате ионизации, кроме электронов, появляются положительные ионы. В электроотрицательных газах часть электронов прилипает к нейтральным молекулам с образованием отрицательных ионов. В РП возникает электронная лавина.

Электронная лавина (ЭЛ) — это компактная группа свободных электронов, дрейфующих в газе в ЭП и производящих ударную ионизацию молекул и атомов [3]. После ее прохождения остается след из положительных и отрицательных ионов. По мере распространения лавины число n_e электронов в ней и ионов в следе возрастает, поле между ними ослабевает. Электроны, оставшиеся в ослабленном поле, менее интенсивно ионизируют нейтральные частицы и смешиваются с ионами следа. Возникает плазма, формируется нетермоионизованный плазменный канал с избыточным зарядом в головной части (головке), удлиняющийся за счет ударной ионизации в ЭП головки. Такой канал называется стримером [3]. Преобразование ЭЛ в стример называется лавинно-стримерным (ЛС) переходом, а ее параметры в момент перехода – критическими. В частности, количество электронов в ЭЛ в этот момент именуется их критическим числом $n_{e\text{кр}}$.

Под критерием ЛС перехода понимается значение одного из параметров лавины, достижение которого говорит о завершении преобразования. Здесь принят критерий [3], распространенный для электроотрицательных газов. Он требует выполнения равенства $E_{\min} = E_{\text{кр}}$, где $E_{\min}$ — минимальное значение напряженности поля E между лавиной и ее следом, $E_{\text{кр}}$ — критическая величина E, при которой интенсивность ударной ионизации молекул электронами равна интенсивности их прилипания. В воздухе при

нормальных атмосферных условиях $E_{кр} = 24{,}5 \cdot 10^3$ В/см [3]. В области, где $E \leq E_{кр}$, не происходит эффективная ударная ионизация. В докладах [4, 5] показано, что выполнению равенства $E_{min} = E_{кр}$ соответствует формирование положительной (катодонаправленной) головки стримера.

Для математического моделирования ЭЛ в однородном ЭП применена трехмерная дрейфово-диффузионная математическая модель [3, 6], разработанная на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ». Она описывает процессы, происходящие с тремя видами заряженных частиц: свободными электронами, положительными и отрицательными ионами. Поэтому в модель включены три уравнения неразрывности потока заряженных частиц, описывающие изменение в пространстве и времени концентраций свободных электронов N_e, положительных N_+ и отрицательных N_- ионов. Они дополнены уравнением Пуассона, которое определяет связь между распределениями концентраций и скалярного потенциала ЭП φ. В нее также входит уравнение связи между φ и вектором E. Поскольку скорость дрейфа электронов в поле на два порядка больше, чем ионов [3], то их дрейфом решено пренебречь. В модели приняты во внимание дрейф электронов в ЭП, ударная ионизация газа электронами, их прилипание, развал отрицательных ионов.

Модель реализована в РП с однородным ЭП, который представляет собой плоский конденсатор (рис. 1). Его нижняя плоскость ($z = 0$) является анодом, и при $t \geq 0$ ее потенциал равен $\varphi = U > 0$. Потенциал верхней плоскости ($z = D$) — катода — равен $\varphi = 0$. Средняя напряженность ЭП составляет $E_0 = U/D$. Такая конфигурация достаточно точно описывает ЭП в таких установках, как, например, разрядные камеры устройств для электросинтеза озона с использованием поверхностного разряда.

Развитие разряда начинается с появления на оси симметрии Oz промежутка на расстоянии z_1 ($0 < z_1 < D$) от анода начальной неоднородности в распределении свободных электронов с их максимальной концентрацией N_{max1} и радиусом r_1 (рис. 1). В остальном объеме РП электроны отсутствуют, и он равномерно заполнен положительными и отрицательными ионами в равных концентрациях N_0, $N_{max1} << N$ и $N_0 << N$, где N — концентрация нейтральных молекул в газе. При нормальных атмосферных условиях $N = 2{,}67 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$.

Ниже в качестве характерного примера представлены результаты математического моделирования ЭЛ и ЛС переходов в РП длиной $D = 0{,}3$ см при $E_0 = (6{,}5 \div 7{,}5) \cdot 10^4$ В/см. Начальное расстояние z_1 между ЭЛ и анодом варьировалось от 0,04 до 0,28 см. Значения r_1 и N_{max1} приняты равными 0,005 см и 10^8 см$^{-3}$ соответственно, чему соответствует начальное число электронов в ЭЛ $n_{e0} = 77$ (на момент $t = 0$).

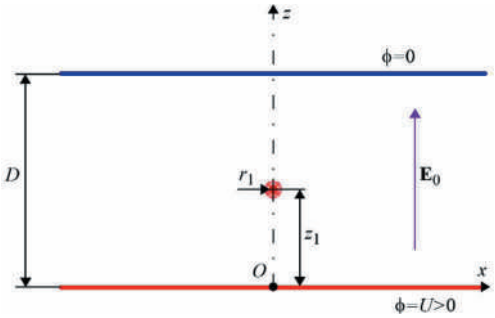


Рис. 1. Расчетная модель разрядного промежутка (РП) с однородным ЭП

В [7] показано, что параметры катодонаправленных стримеров, формирующихся в однородном ЭП, существенно зависят от величины z_1. Это обусловлено изменением формы ЛС перехода: если ЭЛ образуется вдали от электродов в глубине РП, то реализуется однолавинно-стримерный (ОЛС) механизм перехода, а если она появляется вблизи анода — многолавинно-стримерный (МЛС).

В [8] изучено накопление и перераспределение объемного заряда в лавине в процессе ЛС перехода и показано, что в результате ОЛС перехода достигаются на порядок более высокие значения плотности объемного заряда, чем при МЛС переходе. Поэтому в головке стримера, формирующегося благодаря ОЛС переходу, достигается ЭП сильнее по сравнению с тем, который появляется в МЛС переходе.

В этом докладе предпринята попытка более детально проанализировать влияние начального положения z_1 ЭЛ на распределения и значения концентрации заряженных частиц и напряженности ЭП и, как следствие, на критическое число электронов в ней.

Прежде всего сравним распределения плотности объемного заряда ρ в ЭЛ в двух случаях: в первом начальная лавина появляется вблизи анода (z_1 = 0,08 см), а во втором — на удалении от него z_1 = 0,20 см, т.е. в глубине РП. В качестве примера выбраны распределения, полученные при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см. В обоих случаях происходит ОЛС переход, поскольку названные величины z_1 превышают критический путь лавины в поле с указанной напряженностью [3]. На рисунке 2 показаны распределения $\rho = (N_+ - N_e - N_-)\, e$ ($e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный электрический заряд) в координатной плоскости xOz (рис. 1) в моменты ЛС переходов. В случае z_1 = 0,08 см это t = 2,219 нс, при z_1 = 0,20 см — t = 2,227 нс. На рисунке 2 распределения $\rho(x, z)$ приведены в виде полутоновых карт, на которых каждому оттенку серого соответствует свое значение ρ. Справа от них размещены шкалы, определяющие это соответствие.

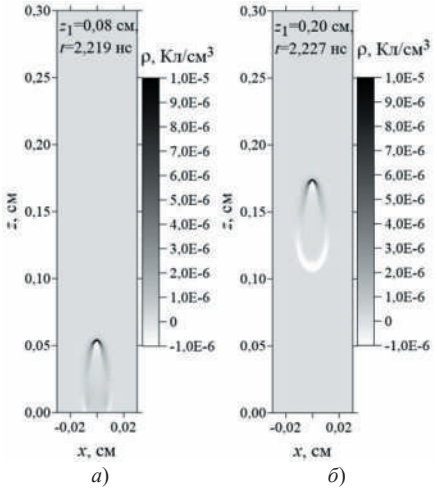


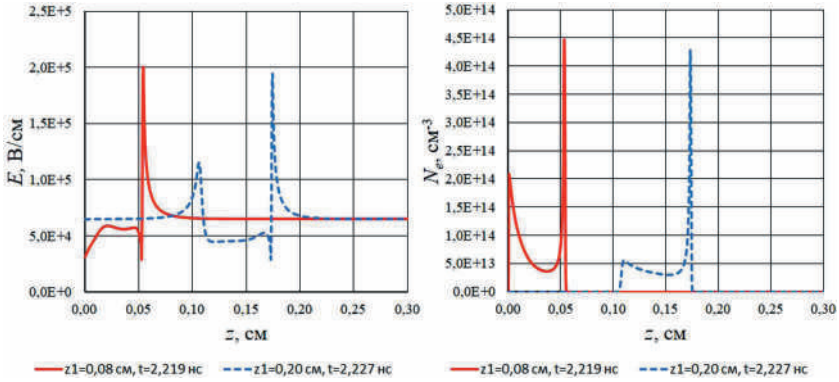
Рис. 2. Расчетные распределения плотности объемного заряда ρ(*x*, *z*) в ЭЛ в координатной плоскости *xOz* РП (рис. 1) при E_0=6,5·10^4 В/см: *а* — для z_1 = 0,08 см; *б* – z_1 = 0,20 см

Легко видеть, что при z_1 = 0,08 см (рис. 2, *а*) к моменту ЛС перехода t = 2,219 нс ЭЛ достигла анода (плоскость z = 0) и большая ее часть, состоящая из свободных электронов, и потому имеющая отрицательный заряд, покинула РП. В нем остались формирующийся квазинейтральный плазменный канал и след, состоящий преимущественно из положительных ионов. При z_1 = 0,20 см (рис. 2, *б*) к моменту ЛС перехода t = 2,227 нс сама лавина, ее след и зарождающийся канал находятся в середине РП вдали от анода и катода (плоскость $z = D$ = 0,3 см).

Таким образом, если ЭЛ развивается в глубине РП (здесь это случай z_1 = 0,20 см), ее суммарный отрицательный и положительный заряды компенсируют друг друга. Если же ЭЛ к моменту ЛС перехода успевает достичь анода (z_1 = 0,08 см), то электроны частично успевают покинуть промежуток, и в нем остается не полностью скомпенсированный положительный объемный заряд. Благодаря этому при прочих равных условиях ЭП перед положительной головкой катодонаправленного стримера, формирующегося вблизи анода по ОЛС механизму, несколько сильнее по сравнению с двухголовочным стримером, возникающим в глубине РП.

Это хорошо видно на рис. 3, где приведены распределения напряженности ЭП $E(z)$ (рис. 3, *а*) и концентрации электронов $N_e(z)$ (рис. 3, *б*) вдоль координатной оси *Oz* промежутка (см. рис. 1), полученные на моменты ЛС переходов t = 2,219 и 2,227 нс в случаях z_1 = 0,08 и 0,20 см соответственно.

В таблице 1 представлены значения максимальной напряженности ЭП $E_{max} = \max[E(z)]$ и наибольших величин концентраций электронов $N_{emax} = \max[N_e(z)]$ и отрицательных ионов $N_{+max} = \max[N_+(z)]$ для указанных величин z_1. Из данных рис. 3 и табл. 1, видно, что в момент ЛС перехода при $z_1 = 0{,}08$ см значение E_{max} на 3 % выше, чем при $z_1 = 0{,}20$ см. Значение N_{emax} в первом случае на 4,05 % больше, чем во втором, а величина N_{+max} — на 2,68 %.



а) *б*)

Рис. 3. Расчетные распределения напряженности ЭП *E* и концентрации электронов *Ne* в ЭЛ вдоль координатной оси *Oz* РП (см. рис. 1) при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см для $z_1 = 0{,}08$ и 0,20 см: *а* — распределения $E(z)$; *б* — распределения $N_e(z)$

Таблица 1

Максимальные расчетные значения напряженности ЭП, концентраций электронов и ионов в момент ЛС перехода при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см

z_1, см	E_{max}, В/см	N_{emax}, см$^{-3}$	N_{+max}, см$^{-3}$
0,08	$2{,}00 \cdot 10^5$	$4{,}44 \cdot 10^{14}$	$5{,}98 \cdot 10^{14}$
0,02	$1{,}94 \cdot 10^5$	$4{,}26 \cdot 10^{14}$	$5{,}82 \cdot 10^{14}$

Изменение концентрации электронов чуть больше, поскольку в воздухе зависимость коэффициента ударной ионизации от напряженности ЭП имеет характер, близкий к квадратичному, и потому с ростом величины E значение N_e увеличивается несколько быстрее, чем E.

На рисунке 4 приведены расчетные кривые $E_{max}(z_1)$ при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$, $7{,}0 \cdot 10^4$ и $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см. В изученном диапазоне величин влияющих параметров при $z_1 = 0{,}09 \div 0{,}28$ см значения E_{max} практически не зависят от z_1 и очень

слабо — от E_0. При $z_1 = 0{,}05 \div 0{,}09$ см значения E_{max} возрастают с уменьшением z_1, а при дальнейшем снижении z_1 быстро падают. Это происходит тем быстрее, чем слабее внешнее поле, поскольку с его ослаблением увеличивается критический путь ЭЛ [3], и, если он становится больше z_1, то изменяется механизм ЛС перехода: из однолавинного он становится многолавинным.

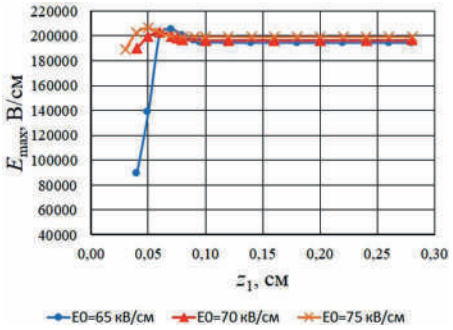


Рис. 4. Расчетные зависимости максимальной напряженности ЭП в ЭЛ на момент ЛС перехода от начального положения z_1 ЭЛ при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$, $7{,}0 \cdot 10^4$ и $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см

Поскольку интенсивность наработки свободных электронов в ЭЛ определяется значением E_{max}, то зависимости $n_{екр}(z_1)$ имеют вид, аналогичный кривым $E_{max}(z_1)$ (рис. 5). В диапазоне $z_1 = 0{,}09 \div 0{,}28$ см значения $n_{екр}$ почти не зависят от z_1, а величина E_0 оказывает на них сравнительно слабое влияние. Увеличение E_0 с $6{,}5 \cdot 10^4$ В/см до $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см, т.е. на 13,33 %, приводит к росту $n_{екр}$ с $3{,}56 \cdot 10^8$ до $3{,}94 \cdot 10^8$, т.е. на 9,64 %. В диапазоне $z_1 = 0{,}06 \div 0{,}10$ см значения $n_{екр}$ возрастают на 33÷34 % с уменьшением z_1, а при дальнейшем снижении z_1 величины $n_{екр}$ резко падают.

Из результатов экспериментальных исследований ЭЛ в воздухе известны значения произведения эффективного коэффициента ударной ионизации $\alpha_{эф}$ на критический путь лавины $x_{кр}$, который ей необходимо пройти, чтобы накопить $n_{екр}$ свободных электронов, и они лежат в пределах $\alpha_{эф} x_{кр} = 18 \div 20$ [9]. Перечисленные величины связаны соотношением $n_{екр} = \exp(\alpha_{эф} x_{кр})$ [3, 9], откуда следует, что $\alpha_{эф} x_{кр} = \ln(n_{екр})$. Рассчитанные в этой работе значения $n_{екр}$ находятся в диапазоне $n_{екр} = (3{,}56 \div 5{,}23) \cdot 10^8$, чему соответствует $\alpha_{эф} x_{кр} = 19{,}69 \div 20{,}08$. Следовательно, полученные расчетные значения $\alpha_{эф} x_{кр}$ лежат вблизи верхней границы диапазона, известного из экспериментов. Это подтверждает достоверность результатов вычислений.

Таким образом, если ЛС переход в сильном однородном ЭП происходит в глубине РП на удалении от электродов, то значения E_{max} и $n_{екр}$ в момент перехода почти не зависят от места ее зарождения и слабо зависят от напряженности E_0 внешнего поля, в котором зарождается лавина.

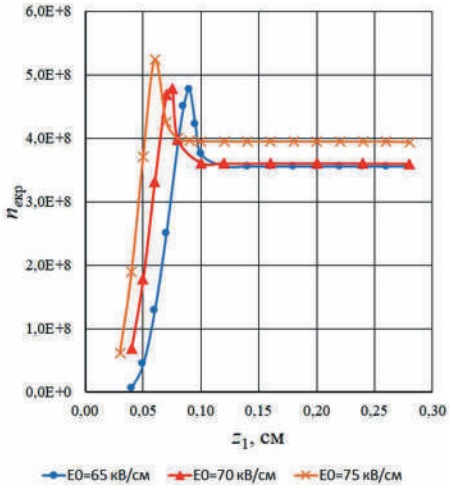


Рис. 5. Расчетные зависимости критического числа электронов в ЭЛ от их начального положения z_1 при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$, $7{,}0 \cdot 10^4$ и $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см

По мере приближения места появления ЭЛ к аноду на расстояние, сопоставимое с длиной ее критического пути, значения E_{max} и $n_{екр}$ несколько увеличиваются. При дальнейшем приближении места ее зарождения к аноду значения E_{max} и $n_{екр}$ снижаются, поскольку вместо однолавинно-стримерного механизм перехода становится многолавинно-стримерным.

При $E_0 = (6{,}5 \div 7{,}5) \cdot 10^4$ В/см критическое число электронов в лавине, развивающейся вдали от электродов, составляет $n_{екр} = (3{,}56 \div 3{,}94) \cdot 10^8$. Если ЭЛ распространяется вблизи анода, то $n_{екр}$ может быть на ≈ 33 % больше.

Полученные данные по соображениям, названным в начале доклада, представляется важным учитывать при создании электротехнологических установок высокого напряжения, в которых используются или могут возникать электрические разряды, а также систем молниезащиты зданий и сооружений. Сделанные выше оценки критического числа электронов $n_{екр}$ в лавинах дают одну из возможных количественных оценок критерия ЛС перехода по однолавинно-стримерному механизму. Найденные величины $n_{екр}$ лежат в сравнительно узком диапазоне $n_{екр} = (3{,}56 \div 5{,}23) \cdot 10^8$. Они могут

быть использованы при теоретическом анализе условий возникновения и трансформации разрядов в качестве критериев для оценки верхней границы численного значения критерия ЛС перехода.

Литература

1. **Высоковольтные** электротехнологии / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. М.: Издательство МЭИ, 2000.
2. **Калугина И.Е., Темников А.Г., Гундарева С.В.** Методы исследования поражаемости наземных объектов молнией. М.: Издательство МЭИ, 2017.
3. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2018.
4. **Белогловский А.А., Ильина Ю.Г.** Численный расчет критических параметров электронной лавины в воздухе // Федоровские чтения – 2015: Тр. 45-й Межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 166—170.
5. **Белогловский А.А.** Перераспределение электрического поля в электронной лавине при однолавинно-стримерном переходе в воздухе // Материалы XXVI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: ИНФРА-М, 2018. С. 438—450.
6. **Белогловский А.А., Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // Электричество. 2011. № 11. С. 17—24.
7. **Белогловский А.А.** Оценка влияния формы лавинно-стримерного перехода на распространение катодонаправленного стримера в воздухе // Вестник МЭИ. 2016. №3. С. 29—34.
8. **Белогловский А.А., Белоусов С.В.** Анализ накопления объемного заряда при лавинно-стримерных переходах в воздухе в сильных однородных электрических полях // Электричество. 2020. № 4. С. 10—15.
9. **Куффель Е., Цаенгль В., Куффель Дж.** Техника и электрофизика высоких напряжений: учебно-справочное руководство. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011.

А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
А.Е. Глушкова, glushkova_97@list.ru,
А.В. Галимова, angelinka2010angelinka10@rambler.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ИЗУЧЕНИЕ ЛАВИННО-СТРИМЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВОЗДУХЕ СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ II: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА

В предыдущем докладе [1] было сказано, что изучение лавинно-стримерного (ЛС) перехода в воздухе и его результаты формируют, в частности, физические основы энергоэффективных высоковольтных электротехнологий и

молниезащиты зданий и сооружений [2, 3]. Этим обусловлен интерес к теоретическим и экспериментальным исследованиям электронных лавин (ЭЛ) и стримеров в воздушной среде, трансформации первых во вторые [4].

ЭЛ — это компактная группа свободных электронов, дрейфующих в газе в электрическом поле (ЭП) и производящих ударную ионизацию молекул и атомов [2]. После ее прохождения остается след из положительных и отрицательных ионов. Постепенно число n_e электронов в ЭЛ и ионов в следе возрастает, поле между ними ослабевает. Электроны, оставшиеся в ослабленном поле, меньше ионизируют нейтральные частицы и смешиваются с ионами следа. Возникает плазма, формируется нетермоионизованный плазменный канал с избыточным зарядом в головной части (головке), удлиняющийся за счет ударной ионизации в ЭП головки. Такой канал называется стримером [2]. Преобразование ЭЛ в стример называется ЛС переходом, а ее параметры в момент перехода — критическими. Количество электронов в ЭЛ в этот момент именуется их критическим числом $n_{e\text{кр}}$.

Под критерием ЛС перехода понимается значение одного из параметров лавины, достижение которого говорит о завершении преобразования. В докладе [1] принят критерий [2] для электроотрицательных газов, который требует выполнения равенства $E_{\min} = E_{\text{кр}}$, где $E_{\min}$ — минимальное значение напряженности поля E между лавиной и ее следом, $E_{\text{кр}}$ — критическая величина E, при которой интенсивность ударной ионизации молекул электронами равна интенсивности их прилипания. В воздухе при нормальных атмосферных условиях $E_{\text{кр}} = 24{,}5 \cdot 10^3$ В/см [2]. В области, где $E \le E_{\text{кр}}$, не происходит эффективная ударная ионизация.

Выполнению равенства $E_{\min} = E_{\text{кр}}$ соответствует формирование положительной головки стримера [5, 6, 1], а не его канала, который появляется несколько раньше. Этот доклад посвящен изучению изменений параметров разряда в интервале времени от зарождения плазменного канала до выполнения равенства $E_{\min} = E_{\text{кр}}$.

Для математического моделирования ЭЛ применена трехмерная дрейфово-диффузионная математическая модель [7], разработанная на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ». В нее включены три уравнения неразрывности потока заряженных частиц, описывающие изменение в пространстве и времени концентраций свободных электронов N_e, положительных N_+ и отрицательных $N_–$ ионов. Они дополнены уравнением Пуассона, которое определяет связь между распределениями концентраций и скалярного потенциала ЭП φ, а также уравнением связи между φ и вектором E. В модели учтены дрейф электронов в ЭП, ударная ионизация газа электронами, их прилипание, развал отрицательных ионов.

Модель реализована в заполненном сухим воздухом при нормальных атмосферных условиях и разрядном промежутке (РП) с однородным ЭП. Он представляет собой плоский конденсатор. Его нижняя плоскость ($z = 0$) является анодом, и при $t \ge 0$ ее потенциал равен $\varphi = U > 0$. Потенциал верхней

плоскости ($z = D$) — катода — равен $\varphi = 0$. Средняя напряженность ЭП равна $E_0 = U/D$.

Развитие разряда начинается с появления на оси симметрии Oz РП на расстоянии z_1 ($0 < z_1 < D$) от анода начальной неоднородности в распределении свободных электронов с их максимальной концентрацией N_{max1} и радиусом r_1. В остальном объеме РП электроны отсутствуют, и он равномерно заполнен положительными и отрицательными ионами в равных концентрациях N_0, $N_{max1} << N$ и $N_0 << N$, где N — концентрация нейтральных молекул в газе. При нормальных атмосферных условиях $N = 2{,}67 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$.

Ниже для сопоставимости результатов приведены результаты математического моделирования ЭЛ и ЛС переходов в тех же условиях, что и в докладе [1]. Параметры лавин представлены по состоянию на два момента времени t:

а) момент t, когда между лавиной и ее следом начинает зарождаться квазинейтральный плазменный канал;

б) момент t, когда выполняется равенство $E_{min} = E_{кр}$.

Здесь принято, что моменту рождения плазменного канала соответствует появление между ЭЛ и ее следом объема ионизированного газа, в котором концентрация положительных ионов примерно равна суммарной концентрации отрицательных частиц (электронов и отрицательных ионов). Его поперечный размер много больше дебаевского радиуса экранирования [2]. Приближенное равенство концентраций положительных и отрицательных частиц понимается так: отношение модуля разности их концентраций к концентрации положительных ионов не должно превышать малой положительной величины $C_{p\max}$, которая здесь принята равной $C_{p\max} = 0{,}001$.

Обратимся к некоторым из полученных результатов. Рисунки 1 и 2 иллюстрируют распределения плотности объемного заряда в РП (рис. 1) и напряженности ЭП на его оси симметрии Oz (рис. 2). Показаны данные, полученные при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см и двух значениях начального расстояния между анодом и ЭЛ $z_1 = 0{,}08$ и $0{,}20$ см.

На рисунке 1 показаны распределения плотности объемного заряда в координатной плоскости xOz в моменты появления канала и выполнения равенства $E_{min} = E_{кр}$ для случаев $z_1 = 0{,}08$ см (рис. 1, *а*) и $z_1 = 0{,}20$ см (рис. 1, *б*). При $z_1 = 0{,}08$ см канал зарождается в момент $t = 1{,}606$ нс, а равенство $E_{min} = E_{кр}$ выполняется в момент $t = 2{,}219$ нс. При $z_1 = 0{,}20$ см эти события происходят чуть позже, в моменты $t = 1{,}709$ и $2{,}227$ нс соответственно.

Легко видеть, что в момент $t = 1{,}606$ нс появления канала при $z_1 = 0{,}08$ см достигается меньшая величина наибольшей плотности положительного объемного заряда $\rho^+_{max} = 4 \cdot 10^{-7}$ Кл/см^3, а в момент $t = 1{,}709$ нс при $z_1 = 0{,}20$ см — большая величина $\rho^+_{max} = 7 \cdot 10^{-7}$ Кл/см^3. То же относится и к наибольшим

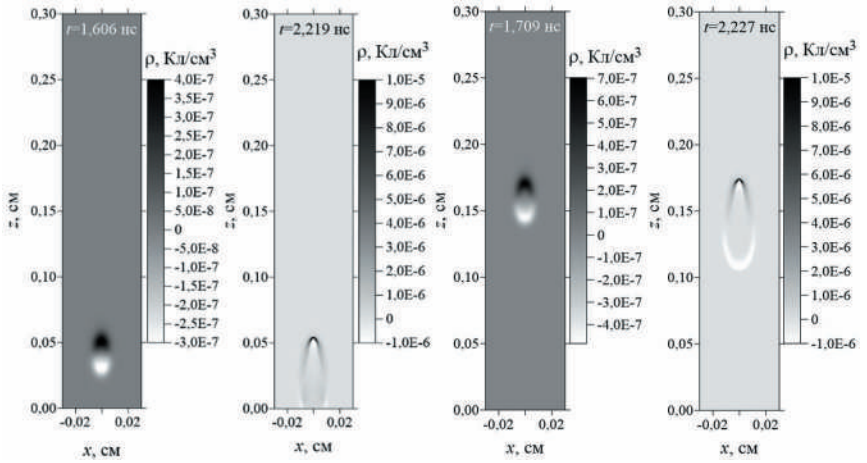


Рис. 1. Расчетные распределения плотности объемного заряда $\rho(x,z)$ в координатной плоскости xOz РП при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см в моменты t, когда зарождается плазменный канал (слева на рис. 1, *а* и 1, *б*) и выполняется равенство $E_{min} = E_{кр}$ (справа на рис. 1, *а* и 1, *б*): *а* — для случая $z_1 = 0{,}08$ см; *б* — для случая $z_1 = 0{,}20$ см

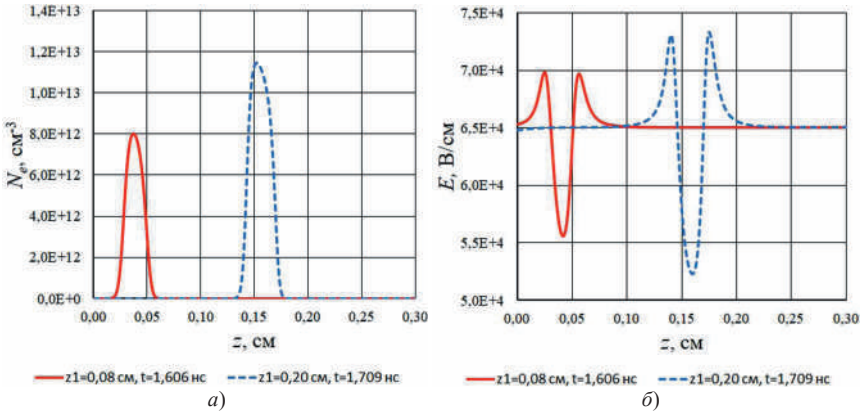


Рис. 2. Расчетные распределения концентрации электронов $N_e(z)$ и напряженности ЭП $E(z)$ вдоль координатной оси Oz РП при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см при $z_1 = 0{,}08$ см и $z_1 = 0{,}20$ см в моменты t, когда зарождается плазменный канал: *а* — зависимости $N_e(z)$; *б* — зависимости $E(z)$

значениям плотности отрицательного объемного заряда: соответствующие величины составляют $\rho^{-}_{max} = -3\cdot10^{-7}$ Кл/см^3 и $\rho^{-}_{max} = -4{,}8\cdot10^{-7}$ Кл/см^3.

Таким образом, чем ближе к аноду появляется начальная лавина, тем меньшие значения ρ^{+}_{max} и ρ^{-}_{max} в ней достигаются к моменту начала формирования стримерного канала. Следствием этого являются меньшие значения концентрации электронов (рис. 2, *а*) и напряженности ЭП (рис. 2, *б*), которые достигаются при формировании ЭЛ вблизи анода, чем в глубине РП.

Это можно объяснить тем, что чем меньше величина z_1, тем существеннее вклад поля отражения зарядов лавины в аноде в суммарное ЭП. В пространстве между лавиной и анодом, а также между нею и следом, поле отражения складывается с полями ЭЛ и следа, усиливая, таким образом, суммарное поле при прочих равных условиях (т.е. при одинаковых величинах и распределениях объемных зарядов в ЭЛ и следе). Это приводит к развитию лавины и появлению канала за меньшее время. Поэтому вблизи анода канал начинает формироваться раньше, и в ЭЛ к этому моменту успевает накопиться несколько меньший заряд, чем в лавине, распространяющейся в средней части РП.

Таким характером зависимостей максимальных значений плотности объемного заряда и напряженности ЭП в лавине от ее начального положения обусловлен вид расчетных функций критического числа электронов в лавине $n_{e\text{кр}}$ от начального расстояния z_1 между нею и анодом, показанных на рис. 3. На нем приведены графики $n_{e\text{кр}}(z_1)$ для $E_0 = (6{,}5\div7{,}5)\cdot10^4$ В/см, которые монотонно возрастают с увеличением значений z_1. При $z_1 = 0{,}05\div0{,}25$ см практически отсутствует зависимость величины $n_{e\text{кр}}$ от напряженности E_0 внешнего ЭП. В указанном диапазоне величин z_1 критическое число электронов меняется в пределах $n_{e\text{кр}} = (1{,}0\div5{,}0)\cdot10^7$.

Расчетные значения минимальной напряженности E_{min} ЭП между лавиной и ее следом в момент появления плазменного канала (рис. 4) монотонно убывают с ростом z_1 и возрастают с усилением внешнего ЭП, оставаясь выше величины $E_{\text{кр}}$, при которой интенсивность ударной ионизации свободными электронами равна интенсивности их прилипания. Следовательно, в плазменном канале, формирующемся между лавиной и следом, с момента его появления до момента выполнения условия $E_{min} = E_{\text{кр}}$ еще продолжается эффективная ударная ионизация.

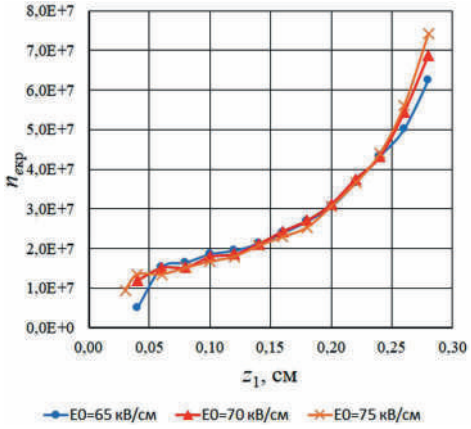


Рис. 3. Расчетные зависимости критического числа электронов в ЭЛ от их начального положения z_1 при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$, $7{,}0 \cdot 10^4$ и $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см по состоянию на моменты времени, когда зарождается плазменный канал

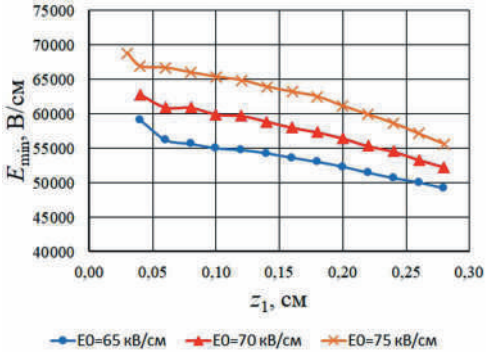


Рис. 4. Расчетные зависимости минимальной напряженности ЭП в ЭЛ на момент времени, когда зарождается плазменный канал, от начального положения z_1 ЭЛ при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$, $7{,}0 \cdot 10^4$ и $7{,}5 \cdot 10^4$ В/см

На рисунке 5 сопоставлены зависимости $n_{екр}(z_1)$, вычисленные для напряженности внешнего ЭП $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см по состоянию на два момента времени: на момент зарождения плазменного канала при $C_{p\max} = 0{,}001$, а также на момент, когда выполняется равенство $E_{\min} = E_{кр}$ при $E_{кр} = 2{,}5 \cdot 10^4$ В/см. Характер кривой $n_{екр}(z_1)$, рассчитанной для каждого z_1 на момент начала формирования канала был пояснен выше. Вид графика $n_{екр}(z_1)$, полученного для каждого z_1 на момент выполнения равенства

$E_{min} = E_{кр}$ был пояснен в докладе [1] и обусловлен двумя факторами: соотношением собственного ЭП зарядов лавины и ее следа с полем их отражений в электродах и формой ЛС перехода. Когда лавина развивается вдали от электродов, вклад полей отраженных зарядов пренебрежимо мал и ЭЛ развивается во внешнем поле и поле, созданном ее собственными зарядами, и потому значения $n_{екр}$ почти не зависят от величины z_1. По мере приближения начального положения лавины к аноду (т.е. уменьшения z_1) поле отраженных зарядов увеличивается, усиливая суммарное ЭП, и потому значения $n_{екр}$ несколько увеличиваются. Дальнейшее приближение начальной ЭЛ к аноду приводит к изменению механизма ЛС перехода с однолавинно-стримерного на многолавинно-стримерный, и величины $n_{екр}$ быстро уменьшаются.

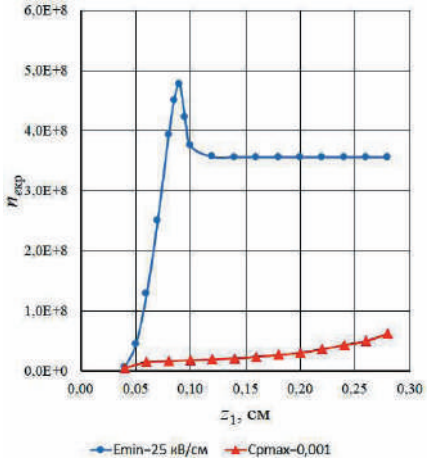


Рис. 5. Расчетные зависимости критического числа электронов в ЭЛ от их начального положения z_1 при $E_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ В/см по состоянию на моменты зарождения плазменного канала и выполнения критерия $E_{min} = E_{кр}$

Очевидно, зависимость $n_{екр}(z_1)$ на рис. 5, полученная на момент начала формирования плазменного канала, ограничивает снизу число электронов $n_{екр}$, при котором формирующееся разрядное образование отвечает определению стримера, сформулированному в начале доклада в соответствии с [2]. Кривая $n_{екр}(z_1)$, рассчитанная на момент выполнения равенства $E_{min} = E_{кр}$ и соответствующая формированиию положительной головки стримера [2, 5, 6], ограничивает значения $n_{екр}$ сверху. Найденные величины $n_{екр}$ могут быть использованы при теоретическом анализе условий возникновения и трансформации разрядов в качестве критериев для оценки нижней и верхней границы численного значения критерия ЛС перехода.

Литература

1. **Белогловский А.А., Белоусов С.В., Таратонкина К.И.** Изучение лавинно-стримерных переходов в воздухе средствами математического моделирования, часть I: Оценка критического числа электронов в лавинах // Федоровские чтения — 2020: Тр. 50-й Межд. научно-практ. конф. с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.
2. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2018.
3. **Калугина И.Е., Темников А.Г., Гундарева С.В.** Методы исследования поражаемости наземных объектов молнией. М.: Издательство МЭИ, 2017.
4. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. Научное издание. — 3-е изд. перераб. и доп. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.
5. **Белогловский А.А., Ильина Ю.Г.** Численный расчет критических параметров электронной лавины в воздухе // Федоровские чтения — 2015: Тр. 45-й Межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 166—170.
6. **Белогловский А.А.** Перераспределение электрического поля в электронной лавине при однолавинно-стримерном переходе в воздухе // Материалы XXVI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: ИНФРА-М, 2018. С. 438—450.
7. **Белогловский А.А., Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // Электричество. 2011. № 11. С. 17—24.

О.С. Белова, belovaos@mail.ru,
А.Г. Темников, a_g_temnikov@mail.ru,
Л.Л. Черненский, leonid5@mail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ РАЗРЯДА МЕЖДУ ИСКУССТВЕННОЙ ГРОЗОВОЙ ЯЧЕЙКОЙ И ЗЕМЛЕЙ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Все более широкое использование на электрических станциях и подстанциях, на воздушных линиях электропередачи современных систем автоматического управления, систем удаленного мониторинга, диагностики и контроля состояния электрооборудования различного назначения, созданных на базе микропроцессорных устройств, требует обеспечения электромагнитной совместимости этих систем и надежной их работы в процессе эксплуатации [1—4]. Грозовые условия и разряды молнии являются одним из ключевых внешних факторов, воздействующих на такие кибер-физические системы.

При этом характер воздействия прямого удара молнии и его вторичных воздействий предполагается в значительной степени стандартизованным [1, 4, 5], не в полной мере учитывая, что импульсы электромагнитного излучения разряда молнии в ближней зоне могут иметь большой спектр возможных форм и частот и зависеть от специфики формирования развития разряда молнии в области вблизи поверхности земли: возникновение восходящих стримеров и лидеров, взаимодействие встречного лидера с объекта или молниеотвода и нисходящего лидера молнии, интенсивное коронирование канала главного разряда и другие. В докладе на основе экспериментов с использованием искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности потенциалом более миллиона вольт исследуется влияние радиальной стримерной короны с канала главной стадии разряда между ячейкой и землей на характеристики импульсов тока разряда и импульсов создаваемого им электромагнитного излучения.

Экспериментальное исследование радиальной стримерной короны разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей. Электрические характеристики. Характерная схема экспериментально-измерительного комплекса «Гроза», использованного при проведении экспериментальных исследованиях, показана на рис. 1.

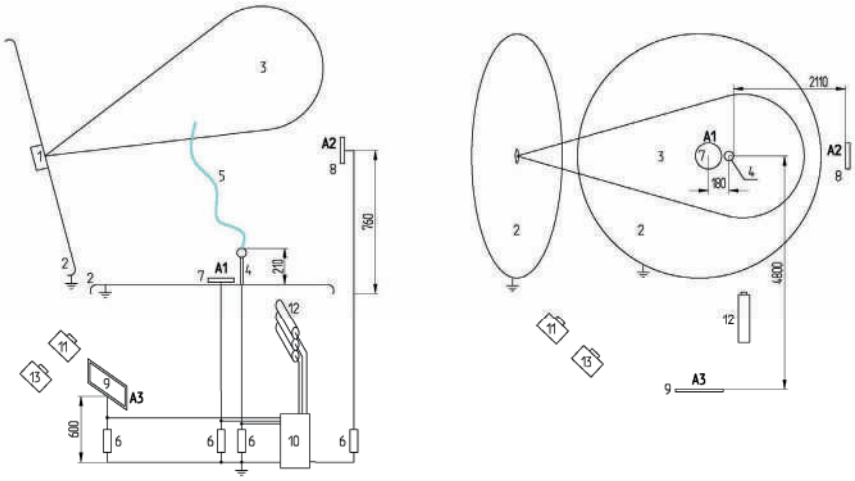


Рис. 1. Схема экспериментально-измерительного комплекса «ГРОЗА»: *1* — генератор заряженного аэрозоля; *2* — заземленные электростатические экраны; *3* — искусственная грозовая ячейка; *4* — стержневой электрод; *5* — искровой разряд; *6* — шунты; *7—9* — плоские антенны; *10* — цифровые запоминающие осциллографы; *11* — цифровой фотоаппарат; *12* — система ФЭУ; *13* — электронно-оптическая камера

Основные параметры комплекса и характеристики создаваемой искусственной грозовой ячейки приведены в [6, 7]. Было проведено исследование влияния наличия радиальной стримерной короны с канала разряда на токовые и спектральные характеристики импульса тока главной стадии разряда типа «облако–земля» и его электромагнитного излучения.

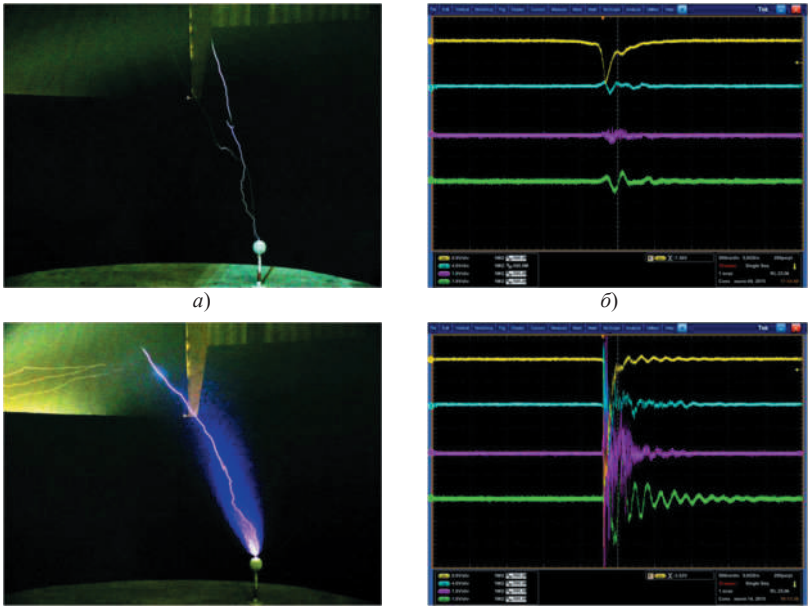
Для регистрации электромагнитного излучения использовалась система широкополосных плоских антенн, расположенных на поверхности земли (антенны А1 и А3) и на высоте расположения искусственной грозовой ячейки (антенна А2).

В результате обработки с помощью специального программного комплекса, разработанного на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ», полученных осциллограмм тока и сигналов, регистрируемых антеннами, определялись следующие электрические характеристики главной стадии тока разряда: $|I_{\text{p}}|$ — амплитуда тока разряда главной стадии; $a_{0.1}$ и $a_{0.3}$ — крутизны импульса тока, измеренные для уровней 0,1–0,9 и 0,3–0,9 от I_{p} соответственно; $|Q_{\text{sum}}|$ — суммарный перенесенный через заземленный электрод заряд.

Проведенное ранее структурирование разрядов, развивающихся между заряженным облаком и землей, по способу формирования главной стадии разряда [7] выявило группы разрядов, в которых существенную роль играла мощная стримерная корона, развивавшаяся с канала главной стадии в радиальном направлении и достигавшая длины в несколько десятков сантиметров. В рассматриваемом в статье исследовании радиальная стримерная корона наблюдалась у разрядов, отнесенных к группе встречных разрядов (встречные восходящий и нисходящий разряды) и у чисто нисходящих разрядов, формирующихся между искусственной грозовой ячейкой и землей.

Характерные особенности формирования главной стадии разряда с радиальной стримерной короной и без нее для обеих групп вместе с характерными осциллограммами тока разряда и индуцируемого им электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами, приведены для случая встречи восходящего положительного лидера с земли и нисходящего отрицательного лидера из облака и для случая отрицательного нисходящего лидера на рис. 1 и 2 соответственно.

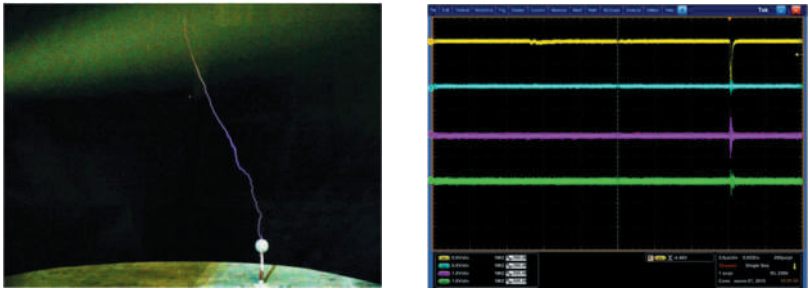
Как видно на рисунках, развитие радиальной стримерной короны с канала главной стадии разряда приводит к существенному изменению формы импульсов электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами на поверхности земли и на высоте расположения искусственной грозовой ячейки.



а) *б*)

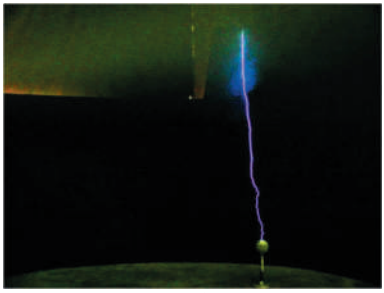
в) *г*)

Рис. 1. ***а***, ***б*** **— фотография и осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн А1-А3 (сверху вниз) для встречного восходящего и нисходящего разрядов без короны;** ***в***, ***г*** **— фотография и осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн А1-А3 (сверху вниз) для встречного восходящего и нисходящего разрядов с короной**

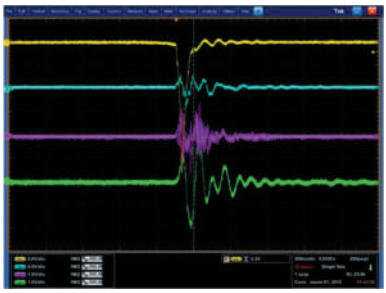


а) *б*)

Рис. 2. ***а***, ***б*** **— фотография и осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн А1-А3 (сверху вниз) для встречного восходящего и нисходящего разрядов без короны;** ***в***, ***г*** **— фотография и осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн А1-А3 (сверху вниз) для нисходящего разрядов с короной**



в)



г)

Рис. 2 (Окончание)

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики импульсов тока главной стадии разряда, формирующейся при взаимодействии нисходящего и восходящего лидерного разряда и наличии радиальной стримерной короны с канала разряда и при ее отсутствии.

Таблица 1

Характеристики импульсов тока восходящего и встречного нисходящего разряда

Наличие короны	$\lvert I_p \rvert$, А	$a_{0.1}$, А/нс	$a_{0.3}$, А/нс	$\lvert Q_{sum} \rvert$, нКл
Без короны	[35,3 ± 17,3]	[3,6 ± 6,6]	[6,2 ± 10,3]	[5944,6 ± 1186,1]
С короной	[67,9 ± 21,8]	[8,4 ± 13,5]	[13,4 ± 19,5]	[7000,0 ± 966,9]

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики импульсов тока главной стадии разряда, формирующейся при развитии нисходящего лидерного разряда из искусственной грозовой ячейки и наличии радиальной стримерной короны с канала разряда и ее отсутствии.

Таблица 2

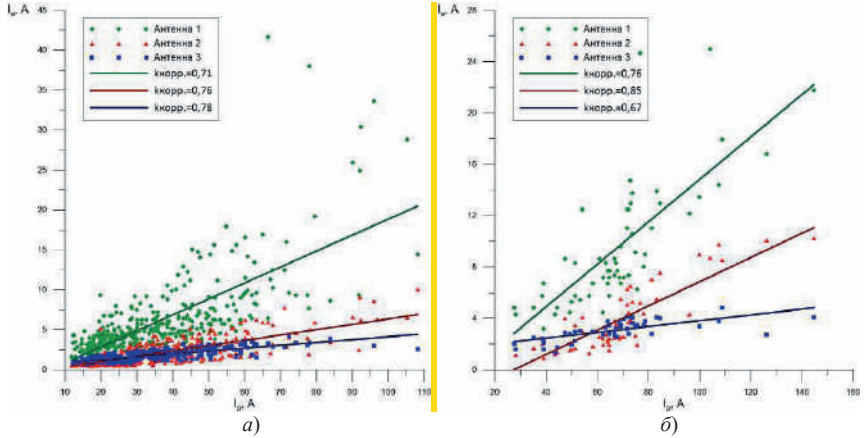
Характеристики импульсов тока нисходящего разряда

Наличие короны	$\lvert I_p \rvert$, А	$a_{0.1}$, А/нс	$a_{0.3}$, А/нс	$\lvert Q_{sum} \rvert$, нКл
Без короны	[66,0 ± 18,6]	[12,2 ± 10,2]	[20,8 ± 15,7]	[6341,6 ± 1294,1]
С короной	[90,3 ± 24,6]	[21,3 ± 18,8]	[28,7 ± 26,9]	[7181,7 ± 984,1]

Как в случае встречных разрядов, так и для нисходящего разряда наличие радиальной стримерной короны с канала разряда приводит к увеличению амплитуды тока и возрастанию крутизны импульса тока главной стадии. Так, при наличии радиальной стримерной короны с канала главной стадии, формирующейся в результате взаимодействия встречных разрядов, амплитуда тока в 2 раза превышает амплитуду тока при отсутствии короны,

при этом крутизна импульса тока тоже возрастает более чем в 2 раза. Для нисходящих разрядов характерно повышение как амплитуды тока, так и его крутизны в 1,4 раза при развитии радиальной стримерной короны. Скорее всего, это связано с тем, что наличие радиальной стримерной короны повышает проводимость канала главной стадии разряда, способствуя переносу большего заряда от искусственной грозовой ячейки. Так, при наличии короны для главной стадии, формирующейся при взаимодействии встречных разрядов, на землю стекает на 18 % больший суммарный заряд, чем в случае отсутствия короны, а для нисходящих разрядов — на 13 % больший заряд, чем для нисходящих разрядов без короны.

Характерные зависимости амплитуды сигналов, регистрируемых антеннами, от амплитуды импульса тока главной стадии разряда показаны на рис. 3 для главной стадии между искусственной грозовой ячейкой и землей, формирующейся в результате взаимодействия встречных разрядов. Для встречных разрядов как с короной, так и без нее наблюдается прямо пропорциональная корреляция амплитулы сигналов $|I_a|$ на антеннах А1-А3 от амплитуды импульса тока $|I_p|$. При этом разрядам с радиальной стримерной короной соответствуют большие значения амплитуды сигналов, регистрируемых антеннами (среднее значение коэффициента корреляции для приведенных зависимостей $I_a(I_p)$ составляет 0,75).



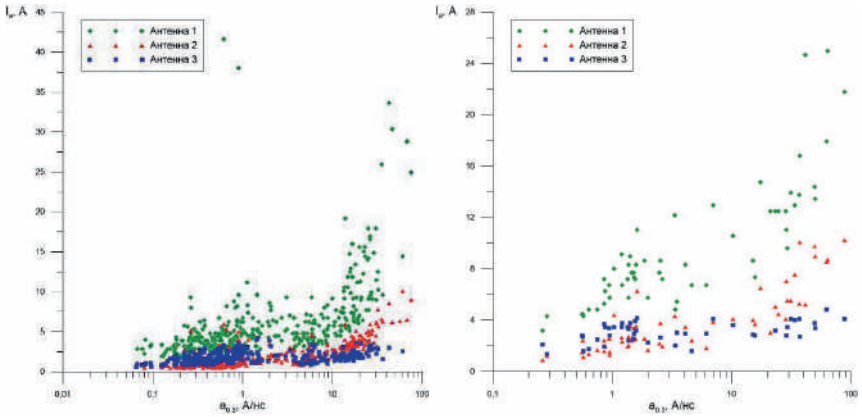
а) *б*)

Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала, регистрируемого антеннами А1-А3, от амплитуды импульса тока главной стадии разряда для встречного восходящего и нисходящего разрядов без короны (*а*); для встречного восходящего и нисходящего разряда с короной (*б*)

Характерные зависимости амплитуды сигналов, регистрируемых антеннами, от скорости нарастания тока на фронте импульса (на уровне 0,3—0,9 от $I_р$) тока главной стадии разряда показаны на рис. 4 для главной стадии между искусственной грозовой ячейкой и землей, формирующейся в результате взаимодействия встречных разрядов. Представленные зависимости амплитуды сигналов, регистрируемых антеннами, имеют сложную нелинейную зависимость от крутизны тока главной стадии разряда.

Для главной стадии, формирующейся в результате взаимодействия встречных разрядов, при отсутствии радиальной стримерной короны (рис. 4, *а*), для каждой из антенн в указанных зависимостях можно выделить две характерные области — с крутизнами тока до 2 А/нс и с крутизнами тока более 2 А/нс. Для второй области (когда крутизны тока $a_{0.3} > 2$ А/нс) характерно более быстрое нарастание амплитуды сигнала на антеннах с ростом крутизны фронта импульса тока главной стадии разряда, особенно при превышении 10,5 А/нс.

Для главной стадии, формирующейся в результате взаимодействия встречных разрядов, при наличии радиальной стримерной короны (рис. 4, *б*) также наблюдается тенденция к росту амплитуды сигналов, регистрируемых на антеннах А1-А3, с ростом крутизны импульса тока главной стадии разряда $a_{0.3}$. Для обоих представленных зависимостей наибольшие значения сигналов, регистрируемых на антеннах, соответствуют наибольшим крутизнам (более 20 А/нс).



а) *б*)

Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала, регистрируемого антеннами А1-А3, от крутизны тока главной стадии разряда для встречного восходящего и нисходящего разрядов без короны (*а*); для встречного восходящего и нисходящего разрядов с короной (*б*)

Вероятно, это обусловлено особенностями формирования главной стадии при взаимодействии встречных лидерных разрядов. Более высокие значения крутизны импульса тока главной стадии разряда характерны для нисходящих разрядов, когда ток быстро нарастает до своих максимальных значений (см. табл. 2). Возможно, что столь высокие значения крутизны тока у встречных разрядов наблюдаются, когда нисходящий разряд успел пройти значительный путь от облака до земли, встречая очень короткий восходящий разряд. При этом нисходящий лидер достигает большой длины, растет и размер участка канала, с которого развивается радиальная стримерная корона. В результате при формировании главной стадии разряда, помимо части заряда облака, нейтрализуется и заряд канала лидера, вследствие чего по каналу разряда протекает больший ток.

Выводы

Таким образом, экспериментальное исследование радиальной стримерной короны разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей показало существенное влияние этой короны как на характеристики импульса тока главной стадии разряда, так и на характеристики импульсов электромагнитного излучения, регистрируемых антеннами, расположенными под искусственной грозовой ячейкой и на расстоянии от нее. Показано, что такое влияние также зависит от специфики формирования главной стадии разряда вблизи поверхности земли. Можно ожидать, что аналогичный характер и специфику могут проявлять и разряды природной молнии, что, в общем случае, не учитывается при оценке возможного воздействии электромагнитного излучения молнии на объекты, в том числе энергетические и киберфизические [1, 2, 5, 8]. Более того, при оценке воздействия таких специфичных разрядов молнии на объекты, в состав которых входят элементы систем с искусственным интеллектом, необходимо учитывать не только изменение вида и электрических характеристик сигналов, наводимых электромагнитным излучением, но и спектральный состав таких сигналов.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

Литература

1. **Электромагнитная** совместимость и молниезащита в современной электроэнергетике: учебное пособие / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. / под ред. Б.К. Максимова. — 3-е изд., перераб. и дополн. М.: Издательство МЭИ, 2018. 688 с.
2. **Гуревич В.И.** Электромагнитные воздействия на микропроцессорные устройства релейной защиты // Компоненты и технологии. 2010. № 2–4 (цикл статей).

3. **Аппаратно-программный** комплекс удаленного мониторинга линейных ОПН под рабочим напряжением / Р.К. Борисов, С.С. Жуликов, П.С. Глазунов и др. // Электротехника. 2019. № 2. С. 42—47.
4. **Система** мониторинга электромагнитной обстановки на подстанциях / Р.К. Борисов, О.М. Кочуров, Е.В. Коломиец, А.Я. Чернокоз // Энергоэксперт. 2019. № 1 (69). С. 38—40.
5. **Кузнецов М.Б., Матвеев М.В.** Защита микропроцессорной аппаратуры и ее цепей на электрических станциях и подстанциях от вторичных проявлений молниевых разрядов // Электро. 2007. № 6. С. 10—15.
6. **Temnikov A.G.** Using of artificial clouds of charged water aerosol for investigations of physics of lightning and lightning protection // IEEE Conference Publications: Lightning Protection (ICLP), 2012 International Conference on. DOI: 10.1109/ICLP.2012.6344279, 2012.
7. **Исследование** специфики спектральных характеристик электромагнитного излучения разряда между искусственным грозовым облаком и землей / О.С. Белова, А.Г. Темников, Л.Л. Черненский и др. // Электричество. 2020. № 5. С. 34—44.
8. **Параметры** импульса молнии. Расчет для защиты микропроцессорной аппаратуры и ее цепей / М. Матвеев, М. Кузнецов, И. Дутов и др. // Новости ЭлектроТехники. 2011. № 4. С. 2—6.

О.С. Белова, belovaos@mail.ru,
А.Г. Темников, a_g_temnikov@mail.ru,
Л.Л. Черненский, leonid5@mail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА МЕЖДУ ИСКУССТВЕННОЙ ГРОЗОВОЙ ЯЧЕЙКОЙ И ЗЕМЛЕЙ

Системы мониторинга, контроля и диагностики состояния и работы различного электрооборудования, внедряемые сейчас на воздушных линиях электропередачи, электрических подстанциях и других наземных объектах и функционирующие с широким использованием цифровой техники и программно-вычислительных комплексов, фактически являются ключевой частью общей системы автоматического управления технологическими процессами, которая вместе с объектами управления представляет собой кибер-физическую систему, работающую в условиях опасных внешних воздействий, к которым в том числе относятся грозовые условия и разряд молнии [1—3].

Электромагнитное воздействие излучения разряда молнии на такие кибер-физические системы и объекты, особенно в ближней зоне, где электромагнитное излучение молнии имеет широкий частотный диапазон от единиц герц до единиц гигагерц [4, 5], может приводить к сбою в работе или

выходу из строя этих систем в результате воздействия излучения на программно-вычислительные комплексы, аналогово-цифровые преобразователи и другие устройства, функционирующие на частотах, которые присутствуют в спектре электромагнитного излучения молнии.

Так как характерные спектральные (частотные) диапазоны импульсов электромагнитного излучения разряда молнии в ближней зоне могут существенно зависеть от условий формирования разряда молнии вблизи поверхности земли, выяснение возможной связи между спецификой развития разряда молнии вблизи наземного объекта при формировании главной стадии и спектром создаваемого им электромагнитного излучения является актуальной задачей. В докладе на основе вейвлетного анализа представлены результаты исследования влияния радиальной стримерной короны с канала главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей [6] на спектральные характеристики импульсов тока разряда и импульсов электромагнитного излучения, одновременно регистрируемых широкополосными антеннами.

Исследование влияния радиальной стримерной короны на спектральные характеристики разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей. Представлены результаты исследования влияния радиальной стримерной короны, формирующейся с канала главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей, на спектральные характеристики электромагнитного излучения такого разряда, регистрируемого антеннами в ближней зоне. Основой для этого являются электрические характеристики (импульсы тока главной стадии и импульсы электромагнитного излучения, регистрируемые широкополосными антеннами), которые были получены в результате экспериментального исследования радиальной стримерной короны разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей при двух вариантах формирования главной стадии (при взаимодействии восходящего и нисходящего лидеров и при развитии нисходящего разряда) [6].

Рассматриваются спектральные (частотные) характеристики импульсов тока главной стадии разряда и импульсов электромагнитного излучения (сигналов, регистрируемых широкополосными плоскими антеннами с использованием цифрового осциллографа DPO 7254 с полосой пропускания 2,5 ГГц). Антенны располагались на поверхности земли непосредственно под искусственной грозовой ячейкой (антенна А1), на высоте нижней границы заряженного облака (антенна А2), на поверхности земли на расстоянии нескольких метров от удара «молнии» в стержневой электрод (антенна А3).

Для определения спектральных характеристик импульсов тока разряда и создаваемого им электромагнитного излучения результаты экспериментов были обработаны с помощью специально разработанного программного

обеспечения на базе вейвлетного анализа. В качестве базисного вейвлета применялся вейвлет «Мексиканская шляпа», который наиболее часто применяется при анализе быстро развивающихся процессов атмосферного электричества [7].

Характерные вейвлетные спектры импульса тока главной стадии разряда, с участка которого формируется радиальная стримерная корона, и при ее отсутствии для случая встречи восходящего положительного лидера с земли и нисходящего отрицательного лидера из облака и для случая отрицательного нисходящего лидера для обеих групп вместе с характерными вейвлетными спектрами индуцируемого им электромагнитного излучения, регистрируемого антенной А3, приведены на рис. 1, *а*—*г*.

Полученные наибольшие значения максимальной частоты f_{max} и значения частоты, соответствующей максимальной интенсивности вейвлетного спектра $f(C_{max})$ главной стадии встречных и нисходящих разрядов при наличии и отсутствии радиальной стримерной короны с канала разряда, приведены в табл. 1.

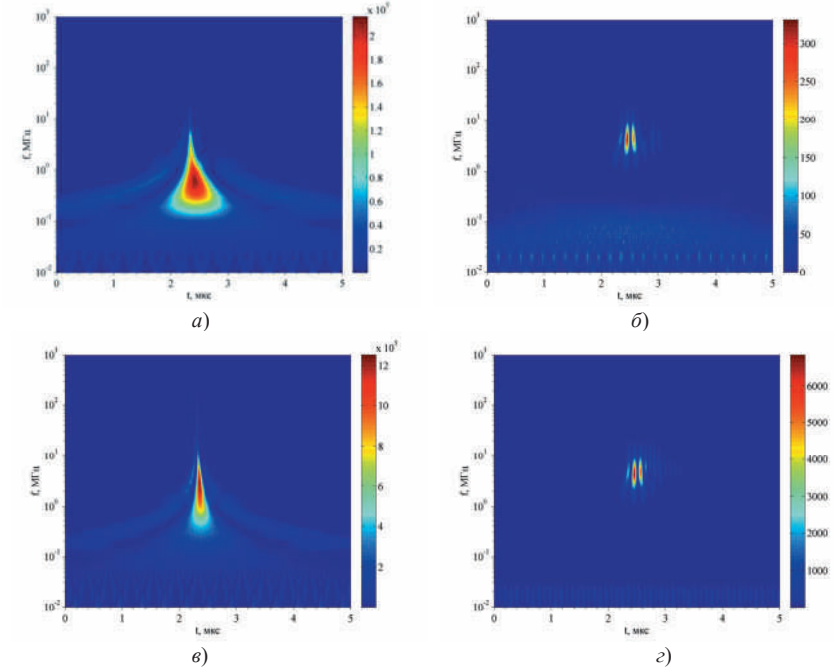


Рис. 1. Спектрограммы тока разряда (*а*, *в*) и его электромагнитного излучения, регистрируемого антенной А3 (*б*, *г*) для встречного восходящего и нисходящего разрядов без короны (*а*, *б*) и при ее наличии (*в*, *г*)

Таблица 1

Спектральные характеристики главной стадии импульса тока разрядов различных типов

Разряд	Встречный разряд		Нисходящий разряд	
	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц
Без короны	[25,2 ± 45,7]	[1,1 ± 0,6]	[95,5 ± 78,1]	[1,8 ± 0,8]
С короной	[34,0 ± 50,6]	[2,0 ± 0,8]	[58,8 ± 74,5]	[2,5 ± 0,8]

При наличии радиальной стримерной короны средние значения максимальной частоты вейвлетного спектра импульса тока разряда для встречных разрядов на 45 % выше, чем при отсутствии короны. Для нисходящих разрядов наблюдается обратная картина: средние значения максимальной частоты вейвлетного спектра импульса тока разряда на 40—70 % ниже как раз при наличии коронного разряда.

Средние значения частоты $f(C_{max})$, соответствующей максимальной интенсивности вейвлетного спектра импульса тока разряда, в случае формирования главной стадии встречными разрядами на 86 % выше, чем при отсутствии стримерной короны, а в случае главной стадии нисходящего разряда — на 40 % выше при наличии коронного разряда.

Полученные *наибольшие* значения максимальной частоты f_{max} и значения частоты, соответствующей максимальной интенсивности вейвлетного спектра $f(C_{max})$ электромагнитного излучения главной стадии встречных и нисходящих разрядов при наличии и отсутствии радиальной стримерной короны с канала разряда, регистрируемого антеннами А1-А3, приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Спектральные характеристики электромагнитного излучения тока восходящего и встречного нисходящего разрядов

Разряд	Антенна А1		Антенна А2		Антенна А3	
	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц
Без короны	[112,5 ± 85,8]	[9,4 ± 13,9]	[413,7 ± 322,4]	[46,1 ± 29,0]	[17,3 ± 4,6]	[4,5 ± 0,9]
С короной	[115,1 ± 106,0]	[7,7 ± 8,5]	[302,0 ± 119,5]	[53,3 ± 21,6]	[16,3 ± 5,1]	[4,3 ± 0,8]

Таблица 3

Спектральные характеристики электромагнитного излучения тока нисходящего разряда

Разряд	Антенна А1		Антенна А2		Антенна А3	
	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц	f_{max}, МГц	$f(C_{max})$, МГц
Без короны	[208,4 ± 100,7]	[21,2 ± 25,7]	[320,7 ± 135,0]	[48,6 ± 3,5]	[15,6 ± 4,8]	[4,1 ± 0,8]
С короной	[172,5 ± 136,7]	[8,8 ± 9,1]	[318,1 ± 109,9]	[51,5 ± 14,6]	[19,6 ± 10,5]	[4,5 ± 0,7]

Наличие коронного разряда не вносит существенных отличий в значения максимальной частоты f_{max} в вейвлетном спектре электромагнитного излучения, регистрируемого антенной А1, в случае формирования главной стадии встречными разрядами. Для вейвлетных спектров сигналов, регистрируемых антенной А2, средние значения f_{max} оказались на 30 % выше у встречных разрядов без короны и достигали 2,5 ГГц, в то время как для разрядов с короной значения f_{max} не превышали 700 МГц. Для вейвлетных спектров сигналов, регистрируемых антенной А3, наблюдалась схожая картина — средние значения f_{max} оказались выше для разрядов без короны, однако превышение составляло всего лишь 10—20 %.

Частоты соответствующей максимальной интенсивности вейвлетного спектра $f(C_{max})$ электромагнитного излучения в случае формирования главной стадии встречными разрядами без короны, регистрируемого антенной А1, в среднем, на 15 % превышали аналогичные частоты для разрядов с короной. Для сигналов, регистрируемых антенной А2, встречные разряды с короной и без нее имели в вейвлетном спектре близкие значения $f(C_{max})$, с небольшим превышением (5 %) для разрядов с короной. Однако при отсутствии стримерной короны с канала в случае формирования главной стадии встречными разрядами без короны максимальные значения $f(C_{max})$ достигали 300 МГц, а при наличии короны — не более 100 МГц. Сигналы, регистрируемые антенной А3, также имеют близкие значения $f(C_{max})$ для сигналов с короной и без нее.

Существенные различия наблюдаются в интенсивностях вейвлетного спектра сигналов электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами — для разрядов, при которых с канала главной стадии формируется радиальная стримерная корона, в вейвлетном спектре наблюдается наибольшая интенсивность C_{max}. В случае формирования главной стадии встречными разрядами с короной, в вейвлетном спектре сигнала, регистрируемого антенной А1, C_{max} в 1,5–2 раза превышает C_{max} для случая отсутствия радиальной стримерной короны; в вейвлетном спектре сигнала, регистри-

руемого антенной А2 — в 3 раза, антенной А4 — в 3–4 раза. Для нисходящих разрядов с короной в вейвлетном спектре сигнала, регистрируемого антенной А1, C_{max} в 3 раза превышает C_{max} для нисходящих разрядов без короны; в вейвлетном спектре сигнала, регистрируемого антенной А2 — в 1,1–1,5 раза, антенной А4 — в 3,5–4 раза.

Для главной стадии, формируемой встречными разрядами с короной и без нее, были выявлены зависимости интенсивности вейвлетного спектра C_{max} электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1-А3 от амплитуды (I_p) и крутизны ($a_{0.3}$) импульса тока разряда (рис. 2).

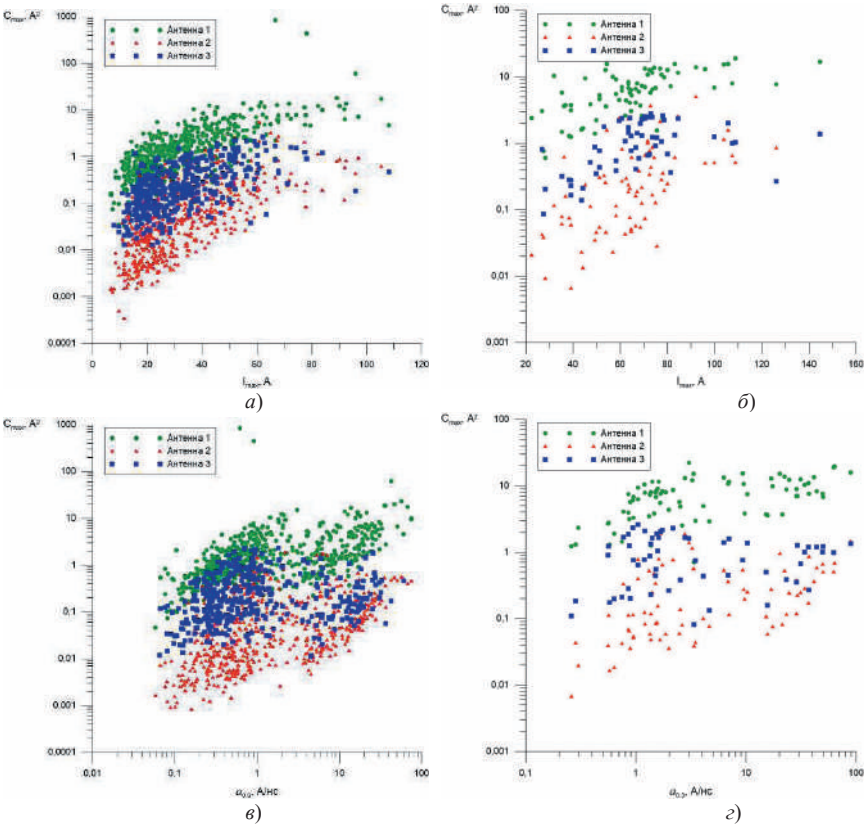


Рис. 2. Зависимость максимальной интенсивности вейвлетного спектра электромагнитного излучения встречного восходящего и нисходящего разряда от амплитуды (*а*, *б*) и крутизны (*в*, *г*) импульса тока главной стадии разряда без короны (*а*, *в*) и при ее наличии (*б*, *г*)

На рисунках 2, *в*, *г* можно выделить две характерные области фактически отдельных зависимостей интенсивности вейвлетного спектра импульсов электромагнитного излучения главной стадии разряда, регистрируемого антеннами, от крутизны импульса тока — первая область с крутизной до 2 А/нс, вторая область с крутизной более 2 А/нс. В каждой из этих областей наблюдается своя близкая к линейной корреляция между максимальной интенсивностью вейвлетного спектра и крутизной импульса тока Аналогичные локальные области зависимостей от крутизны импульса тока главной стадии разряда выделялись и для токовых характеристик в зависимости $I_a(a_{0.3})$ [6].

Выводы. Таким образом, наличие радиальной стримерной короны с канала главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей, оказывает различное влияние на спектральный состав импульса тока разряда и индуцируемого им электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами в ближней зоне, в зависимости от варианта формирования главной стадии самого разряда. Скорее всего, это связано с тем, что стримеры, формирующие радиальную корону, развиваются с высокой скоростью (более 10 м/мкс) [4] и могут формировать сверхвысокочастотную составляющую в общем спектре электромагнитного излучения. Этот факт необходимо учитывать при оценке воздействия близких ударов молнии на кибер-физические объекты, в состав которых входят устройства, работающие на аналогичных частотах.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

Литература

1. **Аппаратно-программный** комплекс удаленного мониторинга линейных ОПН под рабочим напряжением / Р.К. Борисов, С.С. Жуликов, П.С. Глазунов и др. // Электротехника. 2019. № 2. С. 42—47.
2. **Система** мониторинга электромагнитной обстановки на подстанциях / Р.К. Борисов, О.М. Кочуров, Е.В. Коломиец, А.Я. Чернокоз // Энергоэксперт. 2019. № 1 (69). С. 38—40.
3. **Experience** of Numerical Protective Relays Operating in an Environment with High-Frequency Switching Surge in Japan / T. Matsumoto, Y. Kurosawa, M. Usui et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. No. 1.
4. **Cooray V.** Lightning Electromagnetics. IET Publishing, London: United Kingdom, 2012.
5. **Rakov V.A., Uman M.A.** Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003.

6. **Белова О.С., Темников А.Г., Черненский Л.Л. И**сследование радиальной стримерной короны разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей. Электрические характеристики. // Федоровские чтения — 2020: Тр. 50-й Межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.
7. **Esa M.R.M., Ahmad M.R., Cooray V.** Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden // Journal of Atmospheric Research. 2014. No 138. P. 253—267.

А.Е. Немировский, a.e.nemirovsky@mail.ru, Г.А. Кичигина, anedaw@mail.ru, И.Ю. Сергиевская, tanak04@mail.ru, Д.Н. Мищенко, mishchenkodn@vogu35.ru, Вологодский государственный универтитет

УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 0,4 кВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На кафедре электрооборудования Вологодского государственного университета разработаны новые способы сушки и влагозащиты электрооборудования (ЭО), основанные на электрокинетическом явлении электроосмоса [1—5, 9]. Разработанные способы сушки заложены в конструкции устройств сушки и влагозащиты УЭСИ-0,4 кВ, УЭСИ-6-10 кВ, ВУЭОС-6-10 кВ, ВУЭОС-35 кВ, УЭВ, УВНЭД-1, УВНЭД-1М, с помощью которых можно высушить и защитить от влаги обмотки электродвигателей, силовых и измерительных трансформаторов, реакторов, генераторов различных классов, напряжений, конструкций и мощностей [6−8].

Удаление влаги из системы изоляции ЭО реализуется за счет сил электрического поля. Электроосмотическая сушка (ЭОС) происходит без нагрева ЭО при температуре окружающей среды. Под действием сил электрического поля возникает эффект электроосмотического переноса жидкости, и вода вытесняется из капилляров изоляции. Поскольку этот процесс является холодным, нетепловым, исключаются коробление, тепловое старение, термическая деструкция и локальные перегревы изоляции. Это повышает ресурс ЭО, снижает расход электроэнергии на 3 порядка, повышает производительность труда в 5—8 раз. Последнее связано с реализацией сушки на месте эксплуатации без разборки и демонтажа ЭО.

Электрические двигатели (ЭД) участвуют во многих сложных и ответственных технологических процессах и операциях. Отказ их в работе может повлечь за собой огромные убытки предприятия из-за простоя технологического оборудования, а также несет угрозу безопасности жизни людей. Такие убытки могут во много раз превышать стоимость самого электродвигателя, вышедшего из строя.

Специфические и тяжелые условия эксплуатации приводят к снижению надежности и долговечности ЭД.

Окружающая среда промышленно-производственных помещений может значительно отличаться от нормированной для нормальной работы ЭД. Присутствие в вентилируемом электродвигателем воздухе влаги, агрессивных сред, паров кислот и щелочей, токопроводящей и нетокопроводящей пыли, а также других механических включений ведут к преждевременному износу, а то и к выходу из строя как витковой, так и корпусной изоляции, что приводит ЭД в негодность [10]. При этом следует отметить, что влага усиливает негативное воздействие агрессивных сред на систему изоляции ЭД.

Для поисковых и оптимизационных экспериментальных исследований процесса ЭОС ЭД разработано специальное устройство сушки УЭОС.

Параметры и форму импульсов на выходе УЭОС можно регулировать в широких пределах. На рисунке 1 показана структурная схема УЭОС.

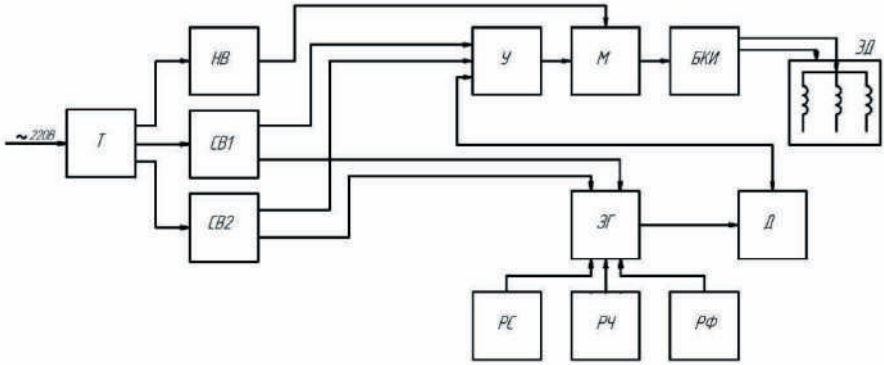


Рис. 1. Структурная схема УЭОС

УЭОС содержит трансформатор Т, нестабилизированный НВ и стабилизированные выпрямители СВ1, СВ2, усилитель напряжения У, модулятор М, задающий генератор ЗГ, блок контроля изоляции БКИ, делитель Д. ЗГ включает блоки регулирования скважности РС, частоты РЧ и формы импульса РФ [1]. На рисунке 2 представлена принципиальная схема устройства.

Трансформатор Т имеет первичную и четыре вторичные обмотки (рис. 2). К обмоткам подключаются выпрямители на 700 В (нестабилизированный НВ), +15 В (стабилизированный СВ1), −15 В (стабилизированный СВ2). НВ выполнен секционным по мостовой схеме. Для повышения надежности секции включены последовательно по постоянному току. Выпрямленными элементами служат диоды VD1−VD4, VD5−VD8. Резисторы R1, R2 выравнивают заряды на емкостях С1, С2, которые используются как сглаживающие фильтры. Выпрямители СВ1, СВ2 выполнены по мостовой

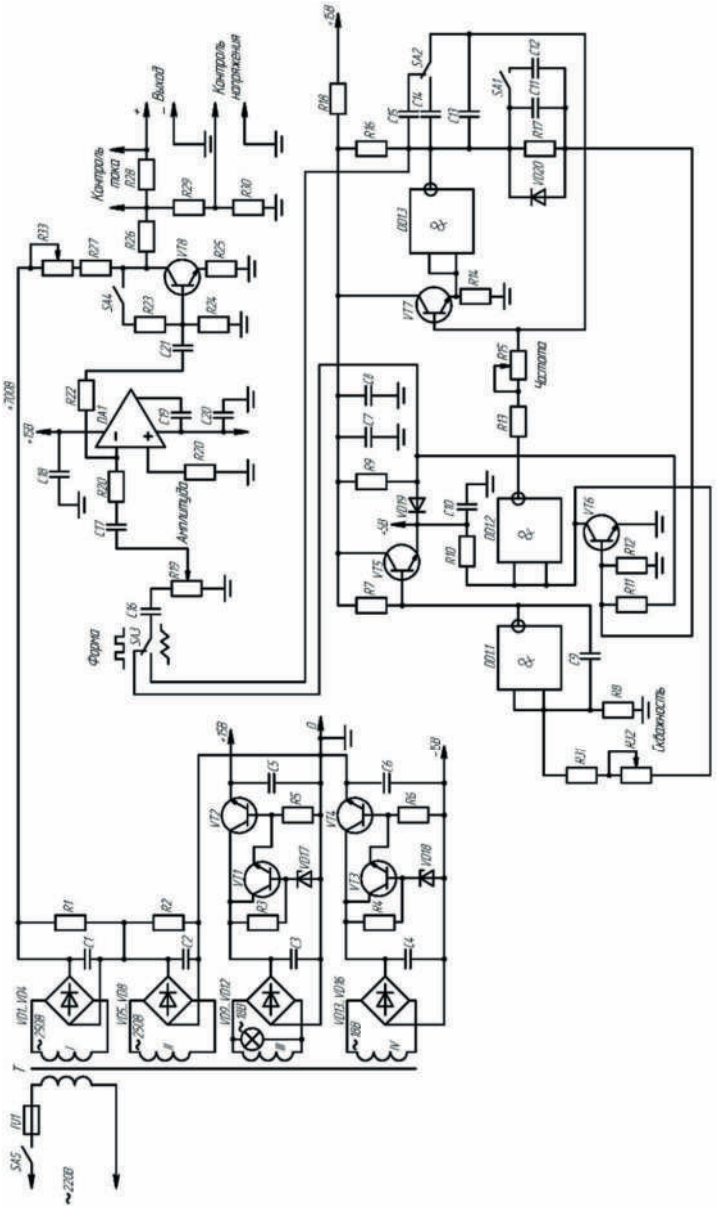


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема УЭОС

схеме на диодах VD9-VD12, VD13−VD16 с параметрическими стабилизаторами напряжения на стабилитронах VD17, VD18. Конденсаторы C3, C4 образуют сглаживающие фильтры, а C5, C6 сглаживают пульсации напряжения, вызванные изменениями нагрузки. Усилители тока собраны на транзисторах VT1, VT2 и VT3, VT4, включенных по схеме с общим коллектором. Резисторы R3, R4 служат балластными сопротивлениями для стабилитронов, а R5, R6 согласуют каскады усилителей по постоянному току.

Задающий генератор ЗГ собран на трех интегральных логических элементах DD1.1−DD1.3 серии ТТЛ, служащих компараторами напряжения. Для повышения входного и выходного сопротивлений, расширения устойчивости генерации в широком диапазоне частот использованы транзисторы VT5−VT7. Компараторы соединены последовательно между собой и дополнительно по двум цепям обратной связи, что позволило менять глубину связи и соответственно форму выходного напряжения генератора в широких пределах. Резисторы R7−R12, R14, R16 предназначены для задания режимов транзисторов и компараторов по постоянному току и получения нужной термостабильности. Резистор R18 совместно с конденсаторами C7, C8 образуют сглаживающий фильтр в цепи питания ЗГ и повышает независимость его работы от других блоков. Резисторы R13, R15 с конденсаторами C13−C15 образуют зарядно-разрядную частотозадающую цепь РЧ, включенную в одну из петель обратной связи. Переменный резистор R15 дает возможность плавно менять частоту внутри диапазона, а переключатель SA2 коммутирует конденсаторы C14, C15 с изменением диапазона генерируемых частот. Цепочка R11, R12, R17 образует другую петлю обратной связи и совместно с VT6 формирует интегрирующую цепь для задания формы сигнала «треугольник», «синусоида». Режим «синусоида» коммутируется тумблером SA1, в результате чего увеличивается постоянная времени интегрирующей цепи. В эмиттерной цепи VT5 и на выходе DD1.2 формируется сигнал прямоугольной формы (меандр) с крутизной переднего фронта не более 1 мкс.

Конденсаторы C9, C10 осуществляют частотную коррекцию усилителей. VD19 служит отсекающим диодом для повышения крутизны фронтов выходного напряжения. Диод VD20 шунтирует R17, C11 и термостабилизирует цепь обратной связи. С эмиттера VT5 снимается напряжение 5 В для питания DD1.1−DD1.3. Скважность импульса регулируется переменным резистором R32, включенным последовательно с R31 в цепь обратной связи DD1.1 и DD 1.2 (блок РС). Так как в зависимости от частоты ЗГ меняются коэффициенты передачи отдельных звеньев в силу паразитных обратных связей, а все каскады ЗГ имеют гальваническую связь, то форма выходных импульсов параметрически зависит от частоты. Для коррекции формы служат элементы R31, R32, SA1-SA3 (блок РФ). Делитель Д состоит из

конденсатора С16, переменного резистора R19 и в широких пределах изменяет амплитуду переменной составляющей. Соответственно меняется глубина модуляции выходного напряжения. После делителя сигнал поступает на вход усилителя напряжения У, выполненного на интегральном операционном усилителе DA1.Элементы С17, R20 образуют входной фильтр и совместно с С19, С21 осуществляют частотную коррекцию с целью устойчивого усиления во всем диапазоне генерируемых частот. Резистор R22 в обратной связи устанавливает нужный коэффициент усиления. С19, С20 — конденсаторы фильтров в цепи питания, а С17, С21 — конденсаторы связи на входе и выходе усилителя для разделения постоянной и переменной составляющей сигналов.

С усилителя сигнал поступает на вход модулятора М, выполненного на транзисторе VT8, который включен по схеме с общим эмиттером. В цепь коллектора VT8 подается напряжение до 700 В через коллекторную нагрузку R27. Резистором R23 это напряжение можно изменять в широких пределах. Рабочую точку VT17 устанавливает делитель из резисторов R23, R24, включенных в цепь базы VT8. Резистор R23 через тумблер SA4 коммутируется с коллектором, обеспечивая нужное смещение по постоянному току и величине постоянной составляющей сигнала на выходе устройства. Резистор R25 в цепи эмиттера VT8 устанавливает отрицательную обратную связь, которая повышает термостабильность и расширяет частотный диапазон модулятора. Токоограничивающий резистор R26 защищает VT8 от перегрузки в случае короткого замыкания в изоляции ЭД в процессе сушки. С шунта R28 снимается сигнал, пропорциональный току электроосмоса. R29, R30 являются делителями для измерения напряжения ЭОС. Резисторы R28−R30 образуют блок контроля изоляции БКИ. К контрольным точкам подключают измерительные приборы для контроля режима ЭОС.

УЭОС для экспериментальных исследований позволяет получить: переменную составляющую напряжения 50—350 В; постоянную составляющую напряжения 100−700 В; частоту импульсов 10−100 Гц; скважность импульсов 0,5—10; форму сигнала «меандр», «треугольник», «синусоида».

Разработанное УЭОС позволило провести широкий круг исследований в области ЭОС ЭД. В итоге были установлены оптимальные параметры выходного напряжения: частота, скважность, амплитуда, форма импульса. Эти параметры послужили основой для разработки конструкций и принципиальных электрических схем серийных УЭОС ЭД-0,4 кВ, которые в настоящее время успешно эксплуатируются на многих промышленных и сельскохозяйственных предприятиях Российской Федерации. Разработанное УЭОС оказалось также весьма полезным в создании новых способов ЭОС не только для ЭД 0,4 кВ, но и для другого ЭО. Новые способы ЭОС защищены 17 патентами и авторскими свидетельствами.

Литература

1. **Немировский А.Е., Мороз Н.К., Симаков К.П.** Патент на изобретение №2174280. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин. Опубл. 27.09.2001. Бюл. № 27.
2. **Патент** на изобретение № 2174281 / А.Е. Немировский, Н.К. Мороз, К.П. Симаков, Т.А. Немировская. Способ сушки твердой изоляции обмоток трансформаторов в герметичном баке. Опубл. 27.09.2001. Бюл. № 27.
3. **Немировский А.Е., Мороз Н.К., Симаков К.П.** Патент на изобретение № 2254631. Способ электроосмотической сушки бумажной изоляции кабеля. Опубл. 20.06.2005. Бюл. № 17.
4. **Немировский А.Е., Мороз Н.К., Симаков К.П.** Патент на изобретение № 2250550. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин. Опубл. 20.04.2005. Бюл. № 11.
5. **А.с. № 1705972 СССР**, МКИ Н 02 К 15-12 / А.Е. Немировский, Н.К. Мороз, В.Г. Бугаков, А.В. Бусырев. Способ сушки изоляции обмоток электрической машины. Опубл. 15.01.1992. Бюл. № 2.
6. **Кириллов С.В.** Электроосмотическая сушка трансформаторов // Локомотив. 2014. № 1.
7. **Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю.** Опыт эксплуатации устройств влагозащиты изоляции обмоток электрооборудования на предприятиях нефтегазового комплекса // Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России: 7-я Всероссийская НТК. М.: Издательство РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007.
8. **Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю.** Опыт эксплуатации устройств электросмотической сушки изоляции обмоток электрооборудования на предприятиях нефтегазового комплекса // Актуальные проблемы состояния развития нефтегазового комплекса России: 7-я Всероссийская НТК. М.: Издательство РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007.
9. **Немировский А.Е., Кичигина Г.А., Сергиевская И.Ю.** Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Федоровские чтения − 2017: материалы XLVII Международной научно-практической конференции с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.
10. **Хомутов С.О., Кобозев Е.В., Семичевский П.И.** Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов // Ползуновский вестник. 2009. № 1—2.

А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru,
А.Р. Фархутдинов, afarhutdinov@mail.ru, КГЭУ, г. Казань

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ АСКУЭ НА ПОДСТАНЦИЯХ ПАО «ТАТНЕФТЬ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА i-TOR

В результате реформирования электроэнергетики России произошла приватизация энергосистем, которая качественно изменила отношение к электроэнергии. Теперь электроэнергия — это товар, который продается и

покупается, а значит, приносит прибыль. Стоимость его непрерывно растет в связи с повышением цен на топливо. Отношения между заинтересованными в процессе реализации электроэнергии сторонами (производителями, поставщиками и потребителями) кардинально изменились, в них появились определенные договорные, технические, экономические и финансовые нюансы. Совокупность указанных моментов обуславливает повышение требований не только к учету электроэнергии, но и к достоверности, точности передачи данных о ее потреблении на диспетчерский пункт. Каждая сторона имеет свой интерес в наличии сведений о величине учтенной электроэнергии. Производители могут принимать меры по снижению себестоимости, снижению технических (технологических) потерь и экономии топлива. Электросбытовые организации получают сведения о величине обоих видов потерь (технических и коммерческих). Снижение коммерческих потерь является важнейшим показателем работы энергосбытовой организации. Учитывая достаточно четкую тенденцию роста объемов хищений, предприятия ЭС, а также другие заинтересованные организации ясно представляют серьезность данной проблемы. Недоучет и хищения электрической энергии являются существенными составляющими коммерческих потерь.

При выборе технического решения для АСКУЭ стоит сосредоточиться в первую очередь на ее стоимости. Поскольку цена на зарубежные аналоги значительно высока, выбор ПАО «Татнефть» пал на отечественного производителя измерительных электронных трансформаторов i-TOR, который намного дешевле на отечественном рынке.

Устройства i-TOR-110S предназначены для измерения и масштабного преобразования тока и напряжения в сетях переменного тока промышленной частоты с номинальным напряжением 110 кВ до электрических величин, пригодных для измерения стандартными электроизмерительными приборами, а также для создания развязки между высоковольтной сетью и приборами измерения.

Устройства i-TOR рассчитаны на номинальные токи сети от 100 до 1000 А включительно. На базе устройств i-TOR могут быть выполнены пункты коммерческого учета электроэнергии, предназначенные для коммерческого (расчетного) учета энергии, передаваемой по воздушным распределительным сетям напряжением 110 кВ.

Согласно правилам функционирования розничного рынка электроэнергии в случае, если счетчики коммерческого учета электроэнергии установлены не на границе балансовой принадлежности, дополнительно, помимо фактических показаний счетчиков, оплачиваются потери в трансформаторах и воздушных линиях электропередач, установленных после счетчиков коммерческого учета электроэнергии.

Для того чтобы убедиться в коммерческой эффективности установки i-TOR, нами был проведен расчет потерь на примере подстанций 110/35/10 кВ ПАО «Татнефть», на которых были установлены 12 счетчиков коммерческого учета. Потери рассчитываются по согласованной методике. Потери в трансформаторе рассчитываются по известным формулам

$$\Delta Wp = \Delta Wp_{XX} + \Delta Wp_H ;$$

$$\Delta Wp_{XX} = \Delta P_{XX} T_n ;$$

$$\Delta Wp_H = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_H^2 T_P}\left(W_A^2 + W_P^2\right), \text{ кВт·ч,}$$

где ΔWp — потери в трансформторе, кВт·ч; ΔWp_{XX} — потери холостого хода, кВт·ч; ΔWp_H — потери короткого замыкания, кВт·ч; T_n — число часов работы трансформатора; S_H — номинальная мощность трансформатора; T_P — число часов работы объекта; $W_{\text{А}}$ — месячный расход активной энергии, кВт·ч; $W_{\text{Р}}$ — месячный расход реактивной энергии, квар·ч.

Потери в линии рассчитываются по формуле

$$\Delta W_p = k_1 \frac{W_A^2 + W_P^2}{U^2 T_P} R_{\text{эк}} \cdot 10^{-3} .$$

i-TOR-110 установлен на ЛЭП 110 кВ. Коммерческий учет электроэнергии был перенесен на границу балансовой принадлежности — в точку установки i-TOR -110, заменив 12 счетчиков коммерческого учета, находящихся на подстанциях. Соответственно будут снижены расходы на обслуживание, эксплуатацию, замену и поверку счетчиков.

Рассмотрим, какой расход электроэнергии с учетом потерь был бы получен при прежней системе коммерческого учета электроэнергии (12 счетчиков на подстанциях), с учетом расчетных потерь в линиях и трансформаторах. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Общий объем потерь в трансформаторах составил 58 380 кВт·ч в месяц, в линиях — 7105 кВт·ч в месяц. Общий объем электроэнергии по 12 счетчикам с учетом потерь в трансформаторах и линиях составил 7 298 042 кВт·ч.

Расход электроэнергии за расчетный период (месяц) согласно счетчику коммерческого учета электроэнергии i-TOR-110, расположенного на границе балансовой принадлежности, составил 7 285 605 кВт·ч.

Разница объема потребления электроэнергии при использовании расчетного способа и при использовании счетчика i-TOR составил 12 437 кВт·ч.

При тарифе 3,24 руб/(кВт·ч)экономический эффект составит 40 296 руб. Общий экономический эффект за год с учетом обслуживания 12 счетчиков в год составит 700 150 руб.

Стоимость установки i-TOR составляет 4 140 000 руб. (табл. 2).

Таблица 1

Расчет потерь

№ счетчика	Расход счетчиков, кВт·ч	Потери в трансформаторе, кВт·ч	Потери в линии, кВт·ч	Общий расход, кВт·ч
W1	579 195	5427	552	585 174
W2	518 477	4507	387	523 371
W3	513 198	4294	348	517 840
W4	629 762	4764	666	635 192
W5	659 402	5971	847	666 220
W6	529 311	5078	431	534 820
W7	573 134	5174	506	578 814
W8	611 573	4525	625	616 723
W9	557 633	4435	431	562 499
W10	673 287	4653	651	678 591
W11	703 458	4821	870	709 149
W12	684 127	4731	791	689 649
Итого	7 232 557	58 380	7 105	7 298 042

Таблица 2

Расчет стоимости организации автономного подвесного пункта коммерческого учета для двухцепной ЛЭП

Статья расходов	Стоимость без НДС, руб.
Инженерные изыскания и разработка проектно-сметной документации	450 000
Стоимость оборудования и материалов	2 300 00
Стоимость строительно-монтажных работ	380 000
Стоимость пусконаладочных работ	320 000
Итого	3 450 000
+ НДС 20 %	690 000
ВСЕГО	4 140 000

Срок окупаемости рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ок}} = \frac{\text{К}}{\text{П}},$$

где К — капиталовложения; П — прибыль в год. Срок окупаемости составил около 6 лет.

На примере расчетов можно видеть, что установка системы i-TOR на подстанциях ПАО «Татнефть» является современным, высокотехнологичным решением организации коммерческого учета электроэнергии на уровне напряжения 110 кВ для крупных потребителей электроэнергии, позволяющий снизить затраты за счет снижения эксплуатационных затрат на обслуживание средств учета электроэнергии, а также снижения затрат за счет корректного учета фактических потерь в электроустановках.

Литература

1. **Денисова А.Р., Фархутдинов А.Р**. Внедрение систем интеллектуального учета электроэнергии и повышение наблюдаемости в высоковольтных сетях ПАО «Татнефть» // В сб.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019). 2019. С. 53—58.
2. **Денисова А.Р., Фархутдинов А.Р.** Применение устройства i-TOR на подстанциях Татнефти // Тинчуринские чтения−2020 «Энергетика и цифровая трансформация». XV международная молодежная научная конференция.
3. **Денисова А.Р., Гайфуллин А.Р.** Модернизация системы электроснабжения на предприятии нефтеперерабатывающей отрасли с использованием альтернативных источников энергии / XLVIII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы «Федоровские чтения — 2018». М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 396.
4. **Роженцова Н.В., Шигапов А.И.** Автоматизация энергоучета как основа энергосбережния // Инновации в науке и практике: Сборник статей по материалам IX Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. 2018. С. 172—176.
5. **i-TOR** [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.i-tor.ru/ [Дата обращения 27.05.2020].

А.А. Татевосян, karo1@mail.ru, ФГБОУ ВО ОмГТУ, г. Омск

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ПРИВОДА ДЛИННОХОДОВОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Прогресс в области создания постоянных магнитов с высокими энергетическими характеристиками обусловил научно-практический интерес к разработке и проектированию электромеханических преобразователей магнитоэлектрической системы, работающих как в двигательном, так и в генераторном режимах. Отсутствие затрат на возбуждение рабочего магнитного потока делает данный тип системы предпочтительным. К примерам применения синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами (СМПМ) в составе электротехнических комплексов можно отнести

ветроэнергетические установки [1, 3, 5, 6], генераторные системы, применяемые в авиационной технике [2], линейный магнитоэлектрический привод [10].

Одним из перспективных направлений применения СМПМ является тихоходный линейный автоматизированный привод поршневого компрессора, обеспечивающий средние и высокие значения давления одной компрессорной ступенью [12—14].

Решение задачи оптимального проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) для привода тихоходной поршневой компрессорной ступени возможно на пути преобразования математической модели линейного магнитоэлектрического привода (ЛМЭП) с использованием итерационного метода Шварца, суть которого заключается в разделении уравнений движения подвижной части и электрического состояния обмотки якоря СДПМ. В этом случае задание закона движения якоря в качестве начального приближения позволяет получить аналитические выражения, связывающие внутренние параметры машины с выходными характеристиками ЛМЭП.

Обязательным условием решения задачи оптимизации по обеспечению минимума удельных потерь является уравнение

$$i = K\frac{dx}{dt}, \tag{1}$$

где K — коэффициент пропорциональности, определяемый конструктивными особенностями СДПМ; x — перемещение индуктора, м.

Это условие вытекает из уравнения баланса мощности за период времени T:

$$\frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,i\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T i^2 R\,dt + \frac{1}{T}\int_0^T \frac{d}{dt}\left[\frac{Li^2}{2}\right]dt + \frac{1}{T}\int_0^T C\frac{dx(t)}{dt}\,i\,dt\,. \tag{2}$$

При этом, если ввести в уравнение (2) величину удельных электромагнитных потерь P_r^*, то

$$\eta = \left(1 + P_r^*\right)^{-1}, \tag{3}$$

где $P_r^* = \dfrac{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T i^2 R\,dt}{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T C\frac{dx(t)}{dt}\,i(t)\,dt}$ — удельные электромагнитные потери.

Условие максимума функционала (3) можно найти из условия минимума P_r^*. При этом ток в обмотке якоря будет равен

$$i(t) = \frac{P_{r\min}^* C \dfrac{dx(t)}{dt}}{R}. \qquad (4)$$

Предложенная в работах [4, 7] задача оптимизации параметров электромагнитного двигателя возвратно-поступательного движения по максимуму КПД (область применения — силовые преобразователи) была заменена вариационной. Исследование построенного функционала на экстремум позволило авторам в первом приближении записать выражения взаимосвязи конструктивных параметров электромагнитного двигателя с его энергетическими показателями и разработать методику оптимизации электромагнитных параметров привода возвратно-поступательного движения на заданный закон движения индуктора во времени. Задание закона движения индуктора во времени $q = q_0(t)$ в качестве начального приближения ведет к упрощению анализа электромагнитных и механических процессов и решению уравнений динамики электрической части привода независимо от процессов в механической части. Определение начального приближения электромагнитной силы $F_{\text{эм}} = F_0(t)$ на этой стадии расчета позволяет из уравнений движения механической части найти первое, отличающееся от начального, приближение закона движения индуктора $q = q_1(t)$.

Оценка расчета по среднеквадратичному отклонению составит:

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (q_1 - q_0)^2 \, dt} \qquad (5)$$

и позволяет сделать заключение о близости принятого приближения $q_0(t)$ к полученному на первом шаге итерационного процесса $q_1(t)$.

При использовании тихоходного СДПМ, например, для целей электропривода поршневого компрессора, синусоидальный закон движения поршня является наиболее совершенным, так как теоретически исключает удары поршня о стенки цилиндра, т.е. при

$$x(t) = x_m\left[1 - \cos(\omega t)\right] \qquad (6)$$

амплитуда тока

$$I_m = \frac{P^*_{r\min} C x_m \omega}{R}. \qquad (7)$$

При этом постоянная машины C может быть определена как

$$C = B_\delta \ell_{\text{ср}} W_{\text{a}} k\,, \qquad (8)$$

где B_δ — максимальное значение индукции в межполюсном зазоре, в котором расположены секции обмотки якоря; $\ell_{\text{ср}}$ — средняя длина витка обмотки якоря; k — коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; W_{a} — суммарное число активных витков обмотки якоря, сцепляющихся магнитным потоком постоянных магнитов.

С учетом (8) выражение для амплитуды тока в обмотке якоря (7) можно преобразовать к виду

$$I_m = P^*_{r\min} B_\delta k \gamma_{\text{пр}} q_{\text{пр}} x_m \omega\,. \qquad (9)$$

Задавшись значением допустимой плотности тока в проводниках обмотки якоря из условия, что

$$J_{\text{обм}} = \frac{I_m}{\sqrt{2} q_{\text{пр}}} \le J_{\text{доп}}\,, \qquad (10)$$

и подставив его в выражение (9), получим формулу для расчета минимально возможных относительных потерь в СДПМ:

$$P^*_r = \gamma^{-1}_{\text{пр}} \frac{\sqrt{2} J_{\text{доп}}}{B_\delta k x_m \omega}\,. \qquad (11)$$

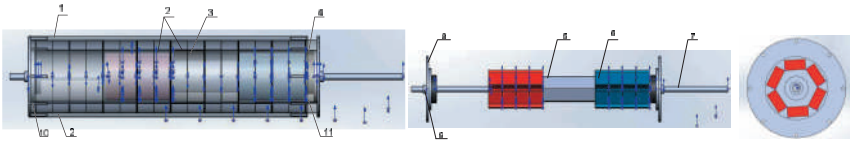
Выражения, полученные из решения задачи оптимизации, положены в основу методики проектирования тихоходного СДПМ [8, 9]. Исходные данные для проектирования СМПМ представлены в табл. 1.

Конструкция магнитной системы СДПМ одноступенчатого поршневого компрессора представлена на рис. 1, *а*, конструкция подвижного индуктора представлена на рис. 1, *б*.

Таблица 1

Исходные данные к расчету магнитной системы СМПМ

Параметр	Значение
Диаметр поршня, мм	20
Проектное создаваемое давлении, МПа	10
Линейная токовая нагрузка, А/м^2	$4 \cdot 10^4$
Среднее значение индукции, Тл	0,5
Частота питающего напряжения, Гц	0,5
Форма постоянного магнита	50x50x25
Половина хода якоря, мм	100
Число катушек обмотки якоря на пару полюсов	8



а) *б*)

Рис. 1. Конструкция магнитной системы ЛМЭД: *1* — статор; *2* — обмотки; *3* — восемь катушек (секционированная обмотка); *4* — ограничительные упорные кольца; *5* — подвижный индуктор; *6* — постоянные магниты; *7* — шток; *8* — крышки; *9* — подшипник качения (линейного перемещения); *10* — крепежные элементы; *11* — неферромагнитный цилиндр с закрепленными обмотками

Предварительные расчеты показали, что закон перемещения поршня может существенно влиять и на эффективность рабочего процесса поршневых тихоходных длинноходовых ступеней [11, 15]. Однако вопросы синтеза энергосберегающих законов движения и снижения при этом неравномерности изменения мгновенной мощности применительно к компрессорным агрегатам с линейным приводом в доступных источниках информации не рассматривались. Неоднозначная функциональная взаимосвязь между эффективностью рабочего процесса компрессорной ступени, интегральными характеристиками и законом движения штока компрессора делает актуальным исследование их взаимосвязи и возможности улучшения энергетических и динамических характеристик одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным магнитоэлектрическим двигателем.

Обмотки двигателя получают питание от выпрямителя, подключенного к линейному автотрансформатору мощностью 4 кВ·А. В качестве системы управления предложено использовать микроконтроллер Arduino Uno, драйвером является 8-канальный релейный модуль ПЛК 5В, силовыми ключами являются твердотельные реле Berme 5-200 VDC. Система управления осуществляет переключение катушек СДПМ таким образом, чтобы

одновременно были включены две пары катушек, причем направление тока в каждой паре различное. Таким образом, по мере движения индуктора отключаются катушки, расположенные вне зоны действия постоянных магнитов. Такой режим работы позволяет не только уменьшить потери на нагрев обмоток, но и уменьшить влияние обратного тягового усилия, возникающее вследствие изменения направления магнитного потока от постоянных магнитов, оказавшихся вне области, занятой катушкой.

На рисунке 2 представлена структурная схема системы управления.

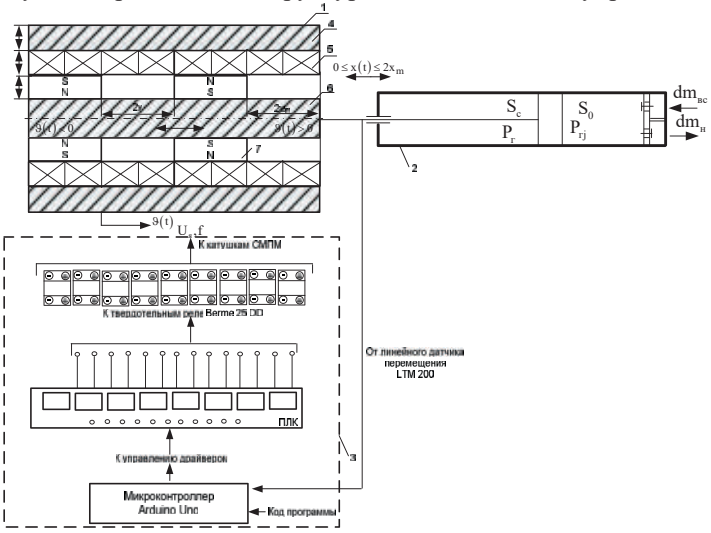
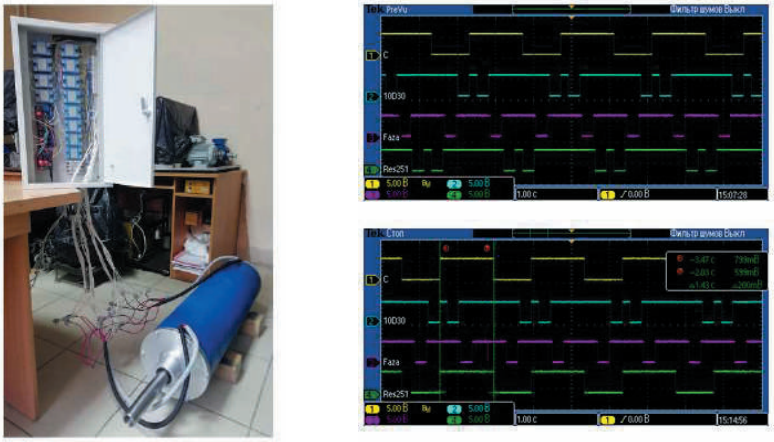


Рис. 2. Магнитная система ЛМЭП с магнитами, намагниченными в осевом направлении: *1* — ЛМЭД; *2* — поршневая ступень; *3* — система управления, *4* — ярмо; *5* — обмотка; *6* — индуктор; *7* — постоянные магниты

На рисунке 3 представлен разработанный макетный образец тихоходного СДПМ и осциллограмма включения твердотельных реле.

Представленный на рис. 2 макетный образец с системой управления позволяет реализовать заданный закон движения индуктора, механическим образом связанного со штоком поршневой компрессорной ступени. Экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о возможности достижения тягового усилия 2000 Н при потребляемой мощности 1.6 кВт при статических испытаниях.



а) *б*)

Рис. 3. Макетный образец тихоходного СДПМ для поршневой компрессорной ступени с системой управления (*а*) и осциллограмма управляющих импульсов, подаваемых на твердотельные реле (*б*)

Вывод. Разработана методика оптимального проектирования тихоходного магнитоэлектрического двигателя для поршневой компрессорной ступени по критерию максимального развиваемого электромагнитного усилия и минимума используемой массы активных материалов. Положения в основе методики могут быть использованы на предварительном этапе проектирования для получения конструкции магнитной системы в соответствии с заданным техническим заданием. На стадии поверочных расчетов геометрические размеры и обмоточные данные уточняются при снятии допущений математической модели, а ее решение может быть получено с применением уравнений метода конечных элементов.

Литература

1. **Антипов В.Н., Данилевич Я.Б.** Анализ и исследование соразмерного ряда синхронных машин как ветрогенераторов в диапазоне частот вращения 75–300 мин$^{-1}$ // Электротехника. 2009. № 1. С. 27—33.
2. **Электромеханические** системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
3. **Методика** расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев и др. // Вестник АГУ. Вып. 1(196). 2017. С. 95—106.

4. **Ковалев Ю.З. Татевосян А.С., Мягков А.Д.** Оптимизация параметров электромагнитных двигателей по максимуму КПД // Изв. вузов. Электромеханика. 1987. № 7. С. 25—31.
5. **Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.** Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы. Харьков: ХАИ, 2003. 400 с.
6. **Кулешов Е.В.** Магнитоэлектрический синхронный ветрогенератор с емкостным компенсатором // Труды дальневосточного гос. техн. ун-та. 2003. С. 17—19.
7. **Ряшенцев Н.П., Ковалев Ю.З.** Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 186 с.
8. **Татевосян А.А.** Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения. № 2019661236 / Св-во о регистрации программного продукта. 2019.
9. **Татевосян А.А.** Расчет и моделирование тихоходного линейного магнитоэлектрического привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Федоровские чтения — 2019. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 227—233.
10. **Татевосян А.А., Соколов А.Н.** Исследование динамических характеристик магнитоэлектрического привода колебательного движения в электротехническом комплексе для испытания эластомеров // Новые информационные технологии /XI междунар. студ. школа — семинар: Тез. докл. Крым, 2003. С. 146—148.
11. **Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В.** Оценка взаимосвязи между законом перемещения поршня тихоходной длинноходовой ступени и характеристиками привода компрессорного агрегата // Компрессорная техника и пневматика. 2018. № 2. С. 11—15.
12. **Юша В.Л., Бусаров С.С.** Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней / Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.
13. **Luszczycki M., Cyklis P., Zelasko J.** Developed Mathematical Model of the Self-Acting Valves of the Reciprocating Compressor and Its Application for Tongue Valves, Interna tional Compressor Engineering Conference, 1992. Paper 918. Available at: http://docs.lib.purdue.edu/icec /918 (Accessed 10 March 2016).
14. **Юша В.Л., Карагузов В.И., Бусаров С.С.** Моделирование рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 3. С. 21–24. (in Russian).
15. **Yusha V.L.**, **Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V.** Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under thechanging ratio of the piston forward and backward stroke time // AIP Conference Proceedings 2007, 030057 (2018). P. 030057-1 — 030057-6.

Т.К. Жабборов, tulkin_jabborov@mail.ru,
И.К. Исмоилов ismoilovi2774@mail.ru,
ФерПИ, г. Фергана, Узбекистан,

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА В СРЕДЕ SIMULINK

Проектирование на основе теории робастного управления и исследование обеспечиваемых им демпферных свойств выполнено на основе численного моделирования уравнений переходных процессов нескольких схем электроэнергетических систем различной сложности — от простейшей электропередачи «машина–линия–шины бесконечной мощности (ШБМ)» до более сложный модели ЭЭС. Разработка основных положений теории робастного управления в создании регулятора возбуждения проводилась на простейшей модели ЭЭС «машина—линия—ШБМ». Очевидно, что в такой модели четко прослеживаются основные закономерности, связанные с изменением структуры регулирования, и в то же время в ней проще выработать основные принципы и методы разработки новых систем управления. После получения удовлетворительных результатов на подобной схеме ЭЭС возможность распространения разработанной методики на энергосистему сложной структуры проиллюстрирована на примере двухмашинной системы, включающей синхронный компенсатор [1—5].

Весь комплекс расчетов, выполненных в рамках данной работы, основан на применении системы математического моделирования MatLab и программы имитации динамических систем Simulink. Функции расчета установившихся режимов ЭЭС и синтез регулятора возбуждения на основе тулбокса «робастное управление» по заданному набору входных-выходных данных написаны на языке MatLab с использованием графического пользовательского интерфейса ОС Windows.

Моделирование уравнений переходных процессов выполнено путем построения блок-схем в среде Simulink, имитирующих систему дифференциальных уравнений (ДУ) в форме Коши. Необходимо отметить, что язык MatLab содержит в своем составе несколько различных функций численного интегрирования систем ДУ, однако скорость выполнения таких функций существенно ниже, чем построение кривых переходных процессов в системе Simulink. Подобное явление связано, видимо, с наличием готовых компилированных библиотек для всех блоков Simulink, в то время как программы на языке MatLab компилируются непосредственно при запуске их в системе. Однако основным преимуществом построения блок-схем Simulink является возможность получения линеаризованной модели исходной

нелинейной системы ДУ, описанной данной блок-схемой. Наличие внутренней функции оболочки Simulink, с помощью которой вычисляются частные производные функций в окрестности заранее заданного установившегося режима, позволяет получить линеаризованную модель системы в форме матриц переменных состояния. Подобные матрицы описывают линейную связь между входными и выходными переменными в следующем виде:

$$\begin{cases} dx/dt = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du, \end{cases}$$

где x, u и y являются векторами переменных состояния, а также входных и выходных переменных соответственно. Очевидно, что приведение нелинейной системы ДУ любой сложности (в том числе, содержащей блоки робастного регулятора) к описанному выше виду открывает широкие перспективы применения хорошо известных методов анализа линейных систем, поставляемых для системы MatLab в виде набора функций тулбокса «Системы управления». Следует отметить, что процесс линеаризации уравнений, соответствующих блок-схеме Simulink, состоит из двух команд языка MatLab и занимает в среднем не более 5 с, в зависимости от сложности системы ДУ. Линеаризация исходной нелинейной системы ДУ переходных процессов ЭЭС позволяет использовать традиционные методы анализа линейных систем управления как для оптимизации тестовых регуляторов в конкретных схемно-режимных условиях, так и при проектировании блоков робастного регулятора.

В процессе оптимизации тестовых линейных регуляторов возможно использование различных, хорошо известных методов, таких, в частности, как D-разбиение и минимизация функционала вещественных частей доминирующих собственных значений матрицы переменных состояния линеаризованной системы (функции качества).

И.З. Гараев, insaf190396@mail.ru,
В.Р. Иванова, vr-10@mail.ru, КГЭУ, г. Казань

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Асинхронный электродвигатель является основным элементом в большей части электроприводов. Все чаще и чаще в качестве узла управления им используется частотный преобразователь, который представляет из себя инвертор с ШИМ регулированием. Такой способ управления имеет массу

преимуществ, однако есть проблемы выбора того или иного технического решения. Рассмотрим частотные преобразователи подробнее.

Разработка и производство широкого спектра мощных и высоковольтных транзисторных IGBT модулей дали возможность использования многофазных силовых переключателей, которые управляются непосредственно с использованием цифровых сигналов. Программируемые вычислительные инструменты позволили сформировать на входах коммутаторов числовые последовательности, которые обеспечивают частотные сигналы управления асинхронными электродвигателями. Разработка и массовое внедрение однокристальных микроконтроллеров, которые обладают достаточным вычислительным ресурсом, обозначили возможность применения их в следящих электроприводах с использованием цифрового регулирования.

Силовые преобразователи частоты главным образом реализуют по схеме, которая содержит в себе выпрямитель на силовых диодах или транзисторах и управляемый коммутатор, реализованный на IGBT транзисторах, шунтированных диодами [1].

В такой схеме входной каскад выпрямляет подаваемое синусоидальное напряжение сети, сглаженное с использованием индуктивно-емкостного фильтра, служит источником электропитания управляемого инвертора, который вырабатывает сигнал с импульсной модуляцией, формирующий в обмотках статора токи синусоидального характера с параметрами, которые обеспечивают необходимый режим работы электродвигателя.

Цифровое управление силовым преобразователем выполняется с помощью микропроцессоров и соответствующего программного обеспечения, при этом вычислительное устройство в режиме реального времени синтезирует сигналы управления модулями, а также проводит обработку сигналов измерительной системы, которая контролирует работу привода.

Таким образом, силовые устройства и управляющие вычислительные элементы объединены в виде конструктивно законченного промышленного изделия, которое называется частотным преобразователем.

В промышленности применяются в основном два вида частотных преобразователей [2]:

- фирменные преобразователи, предназначенные для конкретных типов оборудования;

- универсальные преобразователи частоты, которые предназначены для многоцелевого управления работой асинхронных двигателей в заданных режимах.

Установку режима и контроль работы частотного преобразователя выполняют с помощью пульта управления, который оснащен экраном для индикации информации. В упрощенном варианте скалярного регулирования частоты имеется возможность использовать набор простых логических

функций, которые имеются в установках контроллера, и встроенный ПИД-регулятор.

Для реализации более сложных схем управления с применением сигналов с датчиков обратной связи необходимо использовать структуру САУ и программируемый алгоритм.

Производители выпускают ряд преобразователей частоты, которые отличаются входными и выходными характеристиками, мощностью, исполнением, конструктивом и другими параметрами. Для подключения к оборудованию используются дополнительные внешние элементы, такие как магнитные пускатели, трансформаторы и дроссели.

Необходимо разделять сигналы различных типов и использовать для каждого отдельный кабель, так как различные типы сигналов оказывают взаимное влияние. На практике довольно часто встречается такое разделение.

Можно выделить следующие виды сигналов [3]:

- аналоговые — это сигналы напряжения или тока (0—10 В, 0/4—20 мА), с медленным или редким изменением значения, которые используются для управления или измерения;

- дискретные — это сигналы напряжения или тока (0—10 В, 0/4—20 мА), принимающие лишь два редко изменяющихся значения — высокое или низкое;

- цифровые (данные) — это сигналы напряжения (0—5 В, 0—10 В), изменяющиеся быстро, с высокой частотой, которые применяются в портах RS232, RS485 и т.п.;

- релейные — это контакты реле (0—220 В переменного тока), которые могут включать индуктивные токи в зависимости от подключенной нагрузки.

В процессе выбора мощности частотного преобразователя важно опираться не только на мощностные характеристики электродвигателя, но и на номинальные токи и напряжения преобразователя. Это связано с тем, что указанная мощность частотного преобразователя применима только к обычным четырехполюсным асинхронным электродвигателем.

Применение частотного привода дает возможность снизить токовые и механические нагрузки путем реализации плавного пуска, таким образом можно снизить пусковой ток в 6 раз от номинального значения [4].

Несмотря на то что частотный преобразователь обеспечивает регулирование по скорости, он не обеспечивает достаточную мощность собственного вентилятора при работе двигателя на пониженных оборотах, поэтому необходимо тщательно следить за температурой двигателя и предусмотреть принудительную вентиляцию.

Кроме того, поскольку частотный преобразователь является мощным источником высокочастотных гармоник, то необходимо использовать экрани-

рованную проводку с минимальной длиной, при этом прокладку кабеля следует вести на расстоянии более 100 мм от других, таким образом можно минимизировать наводки. Если все-таки не удалось избежать пересечения кабелей, то оно осуществляется строго под прямым углом [5].

Плавный пуск, обеспечиваемый частотным преобразователем, дает возможность снизить мощность генератора до необходимой. При этом мощность можно снизить в 4–6 раз пропорционально снижению тока. Однако между генератором и приводом в обязательном порядке должен быть установлен контактор, который управляется от релейного выхода частотного привода, тем самым защищая преобразователь от нежелательных перенапряжений.

Трехфазные частотные преобразователи, в свою очередь, могут быть запитаны от однофазной сети, однако при этом их выходной ток не должен превышать половину номинального значения.

Экономический эффект определяется несколькими аспектами [6].

Во-первых, путем увеличения cos φ до значения 0,98, т.е. используется максимальная мощность для совершения полезной работы, и потери составляют минимальное значение.

Во-вторых, данное значение коэффициента поддерживается на всех режимах работы двигателя, при этом без частотного преобразователя асинхронные двигатели на малых нагрузках имеют значение cos φ в пределах 0,3—0,4.

В-третьих, отсутствует необходимость дополнительных механических регулировок, таких как тормоза, заслонки, вентили, дроссели; все манипуляции осуществляются с помощью электроники, причем при таком способе регулирования экономия составит до 50 %.

Ввиду наличия дополнительных входов управления частотного привода имеется возможность синхронизировать процессы или задавать соотношения одних величин относительно других. Для обеспечения дополнительной защиты, кроме экранирования проводки, используются сетевые дроссели и шунтирующие конденсаторы, причем дроссель, кроме всего прочего, ограничивает бросок тока при включении.

Для безотказности работы узла частотного привода необходимо обеспечить надежный отвод тепловой энергии, и если при этом использовать высокие классы защиты, такие как IP 54 и выше, то весьма затруднительно или достаточно дорого добиться необходимого теплоотвода. Поэтому зачастую используются отдельные специальные шкафы, имеющие высокий класс защиты, где размещаются модули с меньшим классом и организуется общая система вентиляции и охлаждения.

С целью снижения затрат часто используют один преобразователь частоты для управления несколькими электродвигателями, однако в таком

случае необходимо выбирать его мощность с запасом в 10−15 % общей мощности всех электродвигателей. Также при этом необходимо минимизировать длину моторной проводки и желательно установить моторный дроссель.

Большая часть частотных преобразователей не имеют возможности подключения или отключения двигателей с использованием контакторов во время его работы, такие манипуляции осуществляются лишь через команду остановки привода.

Правильный выбор соотношения изменения рабочей частоты и напряжения на выходе преобразователя частоты позволит получить оптимальные значения показателей работы электропривода, в числе которых [7]:

- коэффициент мощности;
- коэффициент полезного действия;
- перегрузочная способность;
- плавность регулирования;
- долговечность.

Функция контроля напряжения зависит от характеристики момента нагрузки: при постоянном моменте значение напряжение на статоре должно быть пропорционально частоте, однако есть приводы, имеющие более сложные функциональные зависимости регулирования.

Таким образом, преимущества использования регулируемого электропривода с частотным преобразователем выражаются в множестве аспектов, в том числе увеличения КПД и энергосбережения.

Литература

1. **Мещеряков В.Н., Данилов В.В.** Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3.
2. **Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С.** Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1 (38).
3. **Татаринов Д.Е., Григорян А.С., Пименова И.А.** Обеспечение электромеханической совместимости в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах при регулировании частоты ШИМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 1.
4. **Назипова Л.Р.** Недостатки применения частотного управления на типовых асинхронных электродвигателях // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. 2017. С. 326–329.
5. **Сошников М.И., Струков Д.С**. Применение насосов с частотным приводом в системах водоснабжения //Научный альманах. 2016. № 4–3. С. 190–193.
6. **Наумов А.В., Газизова О.В.** Анализ экономической эффективности и работы приводов дутьевых вентиляторов при использовании частотных регуляторов //

Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9. № 1. С. 53—55.
7. **Кузнецов С.М., Сердцева А.В**. Частотное управление электроприводом //Энергетика, экология, химия: сборник студенческих научных работ. Ульяновск: УлГТУ, 2017. С. 185.
8. **Development** of a stand construction concept for safe and efficient after-repair tests of induction motors up to 1 kV / N.V. Rozhentcova, V.R. Ivanova, L.V. Fetisov, I.Y. Yarmuhametov // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). P. 146—150.
9. **Иванова В.Р., Фетисов Л.В.** Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Проблемы энергетики. 2018. № 9–10. С. 120—129.
10. **Иванова В.Р., Киселев И.Н.** Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 21(5). С. 59–70. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.

Д.И. Абубякярова, abubyakyarova33@gmail.com,
В.Д. Сандаков, vitalysandakov@gmail.com, КГЭУ, г. Казань

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

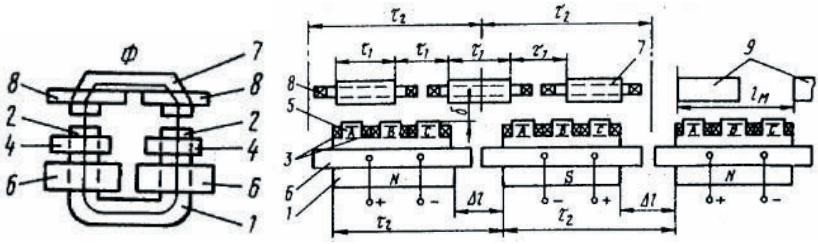
С целью автоматизации отдельных производственных процессов на предприятии возникает необходимость перемещения объектов в плоскости. Это можно осуществить с помощью линейных шаговых двигателей (ЛШД), которые преобразуют импульсную команду в линейное перемещение. Линейное перемещение может быть горизонтальным и вертикальным. Большинство видов двигателей используются для горизонтального перемещения.

Целью данного исследования является изучение и выбор наиболее подходящего линейного шагового двигателя для применения в высокоточных системах автоматического управления в станках с вертикальным перемещением объектов. Поэтому от ЛШД требуются высокая надежность, вертикальное ступенчатое перемещение с высокой точностью шага, независимое от нагрузки на механизм, с высоким КПД.

В настоящее время создано множество различных типов линейных шаговых двигателей. Самые распространенные среди них — синхронные и асинхронные силовые установки. Значительно реже используются следующие типы линейных шаговых двигателей: постоянного тока; электромагнитные; магнитоэлектрические; магнитострикционные; пьезоэлектрические [1]. Рассмотрим более подробно каждый из типов.

Линейный синхронный двигатель (рис. 1) содержит ферромагнитные пакеты, уложенные дискретно с постоянным шагом в протяженной путевой

структуре, и индуктор, расположенный с зазором под ферромагнитными пакетами, состоящий из U-образного магнитопровода с охватывающей его обмоткой возбуждения и трехфазными обмотками якоря, уложенными в пазах стержней магнитопровода.



а) *б*)

Рис. 1. Вид сверху (*а*) и вид сбоку (*б*) линейного синхронного двигателя: *1* — магнитопровод; *2* — стержни; *3* — пазы; *4*, *8* — обмотка якоря; *5* — зубцы; *6* — обмотки возбуждения; *7*, *9* — ферромагнитные пакеты

Обмотка возбуждения создает магнитный поток, обеспечивающий необходимую для электромагнитного подвеса индукцию в зазоре между торцами стержней магнитопровода индуктора и ферромагнитными пакетами путевой структуры. Взаимодействие токов трехфазной обмотки якоря с периодической переменной составляющей основного поля (созданного обмоткой возбуждения) создает тяговое усилие [2].

Как известно, для увеличения средней скорости движения на перегоне транспортного средства нужно сокращать время разгона и торможения. Максимальное тяговое усилие, необходимое при разгоне или торможении экипажа у двигателя известной конструкции создается за счет увеличения напряжения и тока якоря. При этом увеличение напряжения якоря относительно ЭДС возбуждения резко снижает коэффициент мощности, увеличивает полную потребляемую мощность. Таким образом, для обеспечения форсированных режимов работы двигателя необходимо иметь запас мощности и увеличенную массу электрооборудования, установленного на экипаже.

Следовательно, недостатками известной конструкции являются низкие энергетические показатели двигателя в режимах с повышенной тягой и большая масса электрооборудования, установленного на экипаже. Несмотря на недостатки, основным преимуществом синхронного ЛД является наличие зазора между статором и ротором. Также он обладает высоким КПД, значение которого достигает 96 %. Наиболее эффективно использовать синхронные ЛД в тяговых приводах наземного транспорта на магнитном подвесе.

Конструкция **линейного асинхронного двигателя** (рис. 2) имеет некоторые отличия от синхронного. Он содержит индуктор и вторичный

элемент из электропроводящего материала, причем индуктор состоит из сердечника и трехфазной обмотки, при этом катушки обмотки образуют ряды в продольном и поперечном направлениях, продольные ряды катушек обмотки образуют одинаковые порядки следования фаз, а поперечные ряды катушек имеют до середины один, а после середины — противоположный порядок следования фаз.

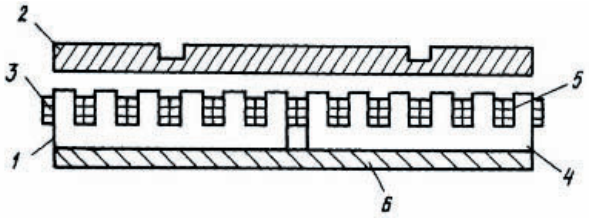


Рис. 2. Конструкция линейного асинхронного двигателя (вид спереди, поперечное сечение): *1* — индуктор; *2* — вторичный элемент; *3* — катушки; *4* — дополнительный индуктор; *5* — катушки дополнительного индуктора; *6* — ферромагнитное основание

Этот двигатель предназначен для электроприводов с прямолинейным или возвратно-поступательным движением рабочих органов и для высокоскоростного наземного транспорта [3].

Недостатком данного двигателя является недостаточно большое усилие поперечной стабилизации. Решение этой технической задачи достигается тем, что устанавливается дополнительный индуктор, расположенный параллельно основному, причем катушки его трехфазной обмотки имеют тот же порядок следования фаз, а вторичный элемент образован сочетанием пяти электропроводящих полос, примыкающих друг к другу, при этом средняя и крайние полосы выполнены с меньшим активным сопротивлением, чем полосы, расположенные между ними. Основной и дополнительный индукторы расположены на общем ферромагнитном основании. Эти технические признаки определяют новизну изобретения.

Линейный двигатель постоянного тока (рис. 3) содержит магнитопровод и два пакета статора с обмоткой, разделенной на секции, сдвинутые на половину полюсного деления и подключенные к одновременно коммутируемым элементам коммутатора, управляемого датчиком положения. В каждый момент времени секции, расположенные между полюсами, выполняют функции обмотки возбуждения, а секции, расположенные над полюсами, выполняют роль якорной обмотки. Однако в таком двигателе неэффективно используется обмотка, что приводит к ухудшению КПД двигателя. С целью повышения КПД магнитопровод выполнен Ш-образной формы, а между его стержнями расположены пакеты статора с обмоткой. Изобретение может найти применение в приводах конвейерных поездов, особенно на участках

с крутыми подъемами, например для электроподвижного состава открытых горных разработок [4].

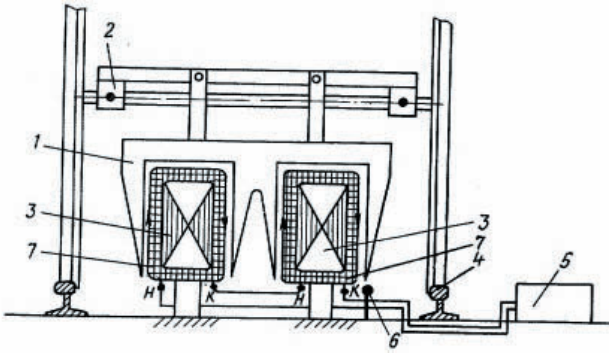


Рис. 3. Линейный двигатель постоянного тока (поперечный разрез): *1* — магнитопровод; *2* — подвеска; *3* — статор; *4* — направляющий путь; *5* — коммутатор; *6* — датчик положения; *7* — кольцевые обмотки

Линейный электромагнитный двигатель содержит корпус с тяговыми электромагнитами и два подвижных фиксатора с фиксирующими элект-ромагнитами, примыкающими к металлической рейке (рис. 4).

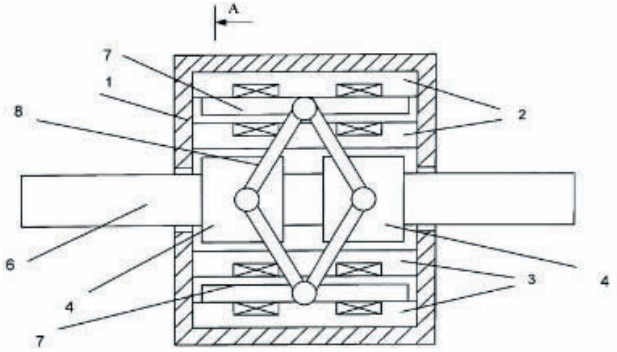


Рис. 4. Линейный электромагнитный двигатель (разрез, общий вид): *1* — корпус; *2,3* — электромагниты; *4* — фиксаторы; *5* — фиксирующие электромагниты; *6* — рейка; *7* — якорь; *8* — пантограф

Недостатками этого двигателя являются: прерывистое движение подвижного элемента, невысокое тяговое усилие и невысокая надежность. Технической задачей является повышение надежности устройства, которое достигается тем, что в корпус электродвигателя размещается дополнительная пара тяговых электромагнитов, которые ориентированы вдоль

направления перемещения подвижного элемента. Якори тяговых электромагнитов и фиксаторы объединены пантографом, а между металлической рейкой и фиксирующими электромагнитами расположены фрикционные колодки с ферромагнитной накладкой. Пантограф обеспечивает сложение усилий тяговых электромагнитов, что приводит к увеличению тягового усилия двигателя. Применение фрикционных колодок обеспечивает надежную фиксацию металлической рейки фиксаторами [5].

Этот двигатель может быть использован для линейного перемещения подвижных объектов, например линейных манипуляторов технологического или производственного оборудования.

Линейный магнитоэлектрический двигатель содержит подвижный индуктор с постоянными магнитами, закрепленными на магнитопроводе, якорь в виде катушки, намотанный на сердечник, и направляющие в виде корпуса со съемной крышкой. Причем постоянные магниты закреплены на магнитопроводе через вкладыши вместе с сепаратором, в ячейках которого удерживаются шарики (рис. 5).

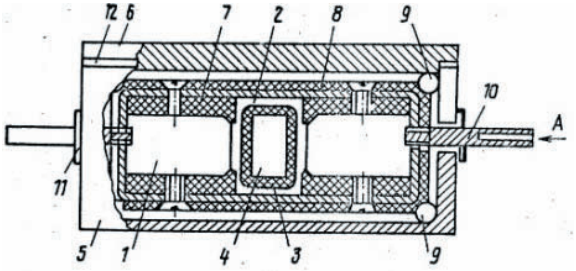
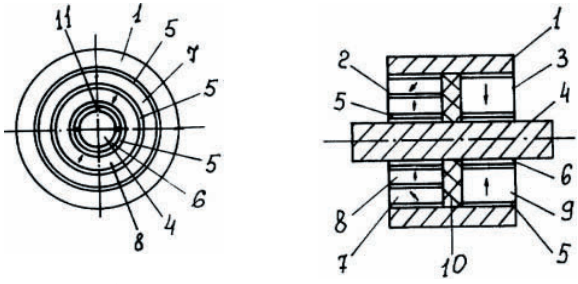


Рис. 5. Линейный магнитоэлектрический двигатель (вид с торца): *1* — индуктор; *2* — магнитопровод; *3* — якорь; *4* — сердечник; *5* — корпус; *6* — крышка; *7* — вкладыши; *8* — сепаратор; *9* — шарики; *10* — втулки; *11* — натяжные шторки; *12* — прокладка

Для уменьшения рабочего габарита передача механического движения может осуществляться через пазы в боковых стенках корпуса, для чего магнитопровод снабжен втулками. При этом для защиты от пыли пазы могут быть закрыты нитяными шторками, закрепленными на пазах с наружной стороны. Также использование закрытого корпуса повышает надежность работы в условиях запыления, загрязнения, жесткость конструкции в условиях вибраций и ударов. Данный двигатель позволяет повысить надежность работы двигателя в условиях внешних ударных механических воздействий [6].

Пьезоэлектрический линейный шаговый двигатель содержит цилиндрический корпус (рис. 6), в котором расположены в продольной плоскости друг за другом два пьезоблока, и подвижную часть в виде цилиндрического стержня. Каждый пьезоблок жестко прикреплен к внутренней поверхности цилиндрического корпуса.



а) *б*)

Рис. 6. Вид спереди (*а*) и продольный разрез (*б*) пьезоэлектрического линейного шагового двигателя: *1* — корпус; *2*, *3* — пьезоблоки; *4* — стержень; *5* — изолятор; *6* — фрикционный элемент; *7*, *8* — пьезоэлементы; *9* — фиксирующий пьезоэлемент; *10* — изоляционный материал; *11* — направляющая

Пьезоблоки по функциональному предназначению делятся на сдвигающе-фиксирующий и фиксирующий. Сдвигающе-фиксирующий пьезоблок состоит из соединенных между собой пьезоэлементов, изоляторов и разрезного фрикционного элемента. Пьезоэлемент является сдвигающим, если вектор его начальной поляризации направлен под углом к продольной оси двигателя. Пьезоэлемент является фиксирующим, если вектор его начальной поляризации направлен перпендикулярно продольной оси двигателя. Фиксирующий пьезоблок состоит из фиксирующего пьезоэлемента, изоляторов и разрезного фрикционного элемента.

Каждый пьезоэлемент имеет электроды, к которым подключены провода. Промежутки между пьезоблоками заполнены эластичным изоляционным материалом. На поверхности подвижной части выполнена направляющая, которая входит в соответствующую направляющую на фрикционных элементах. Применение разрезных фрикционных элементов обеспечивает более плотное обжатие подвижной части пьезоблоками. Возможны и другие варианты исполнения пьезоэлектрического линейного шагового двигателя [7].

Основными недостатками являются наличие большого количества деталей, сложность конструкции, сложность изготовления фиксирующих узлов и возможность поворота подвижной части в процессе линейного перемещения. Но многие эти проблемы решаются за счет выполнения фиксирующих узлов в виде двух или более пьезоблоков. Также наличие направляющей исключает возможность поворота цилиндрического стержня.

Магнитострикционный шаговый двигатель линейных перемещений (рис. 7) содержит рабочий орган в виде трубки с ребрами, зажимы, замыкающий кожух. Зажимы размещены между ребрами рабочего органа и закреплены на кожухе. Рабочий орган, ребра и зажимы имеют обмотки намагничивания, выполнены из материала с одинаковым коэффициентом

магнитострикции. В исходном состоянии рабочий орган не намагничен, а зажимы намагничены. Для отработки шага обесточивается один из зажимов. Затем питание подается на рабочий орган, и он удлиняется. Новое его положение фиксируется первым зажимом, а второй зажим обесточивается. После обесточивания катушки рабочего органа питание подается на оба зажима. Наличие ребер исключает нежелательные деформации рабочего органа. Его зажим за боковые поверхности ребер усиливает фиксацию. Все это ведет к большей точности отработки шага перемещения. Этот двигатель находит применение в высокоточных системах автоматического управления в станкостроении, оптико-механических устройствах [8].

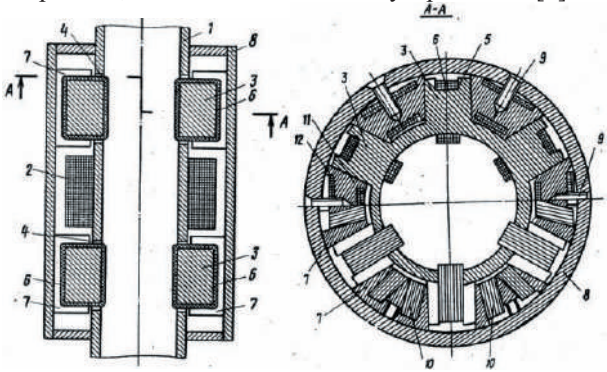


Рис. 7. Магнитострикционный двигатель линейных перемещений (разрез): *1* — магнитострикционный орган; *2* — намагничивающая катушка; *3* — ребра; *4* — отверстия; *5* — пазы; *6*, *10* — обмотки намагничивания; *7* — зажимы; *8* — кожух; *9* — винты; *11*, *12* — продольные пазы

Изучив все основные типы линейных шаговых двигателей можно сделать вывод, что данные силовые установки нашли широкое применение в промышленности. Различие типов позволяет использовать их в разных сферах деятельности. Для применения же в высокоточных системах автоматического управления в станках с вертикальным перемещением объектов наиболее подойдет магнитострикционный двигатель линейных перемещений. С помощью данного типа ЛШД можно обеспечить высокие надежность и точность шага вертикального перемещения, не зависимых от нагрузок на механизм. Однако фиксация рабочего тела после выполнения шага у магнитострикционного двигателя выполняется за счет постоянной подачи электроэнергии, что понижает КПД установки. Целью следующих исследований будет разработка механизма фиксации ступеней без применения электроэнергии для снижения энергозатрат на эксплуатацию линейного шагового двигателя.

Литература

1. **Рахимов А.В.** Примеры использования линейных двигателей. Международный научно-инновационный центр (Москва), 2015.
2. **Патент** на изобретение № 5027612107 RU, МПК: H02K41/03/ Линейный синхронный двигатель / В.Б. Диалектов, Л.Ф. Коломейцев, О.Е. Лозицкий, В.М. Павлюков, Ю.Д. Соколов; заявл. 22.07.91; опубл. 15.10.93, Бюл. № 37−38.
3. **Патент** на изобретение № 2268543 RU, МПК: H02K41/025. Линейный асинхронный двигатель / Соломин А.В. Ростов-на-Дону, РГУПС. № 2004120797/09; заявл. 7.07.04; опубл. 20.01.06, Бюл. № 2.
4. **Марченко В.Д, Давыдов С.К**. Линейные двигатели постоянного тока // Актуальные проблемы научного и производственно-технического развития российского общества: XXIV Внутривузовская студенческая конференция, Армавир, 2018.
5. **Патент** на изобретение № 2541518 RU, МПК: H02K41/02/ Линейный электромагнитный двигатель / З.В. Абусеридзе, В.Б. Баль, В.Я. Геча; ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». № 2014110688/07; заявл. 20.03.14; опубл. 20.02.15.
6. **Патент** на изобретение № SU 1686641 A1, МПК7: H02K41/025. Линейный магнитоэлектрический двигатель / И.П. Егоров, М.З. Вагнер, Ю.А. Утехин; заявл.30.08.88; опубл. 23.10.91
7. **Патент** на изобретение № 2156535 RU, МПК: H02N2/04. Пьезоэлектрический линейный шаговый двигатель / Окатов Ю.В, Буров С.В.; заявл. 5.06.96; опубл. 20.09.00.
8. **Патент** на изобретение № SU 1369619 A1, МПК: H01L41/12. Магнитострикционный шаговый двигатель линейных перемещений / С.Т. Кусимов, П.А. Грахов, А.З. Тлявлин, В.А. Лебедев, Ю.В. Боголюбова. Уфимский авиационный институт; заявл. 16.05.86; опубл. 07.07.1993, Бюл. № 25.

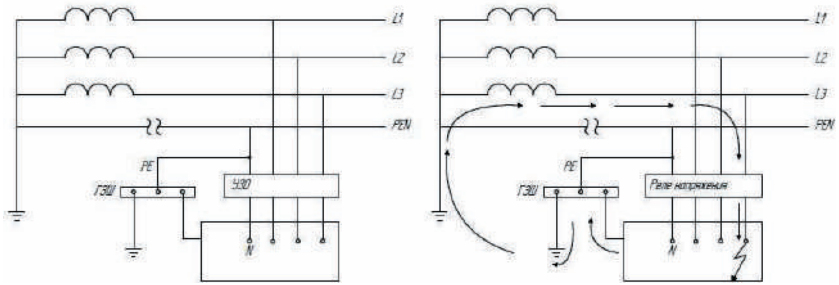
А.С. Тимонин, a.s.timonin@mail.ru, НИУ «МЭИ», Москва

СПОСОБ ЗАЩИТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ TN—C—S ПУТЕМ ТРАНСФОРМАЦИИ В СИСТЕМУ TT С ПОМОЩЬЮ ЗАЩИТНОГО ВВОДНОГО РАЗНОНОМИНАЛЬНОГО КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА

В настоящее время в сетях 0,4 кВ для защиты потребителей электрической энергии от перенапряжений при обрыве PEN-проводника в системе электроснабжения TN—C—S или N-проводника в системе TT, а также ошибочным или самопроизвольным подключением в цепь линейного проводника L, PEN-, N- или PE-проводника используются реле минимального и максимального напряжения, устройства защиты от импульсных напряжений (УЗИП), устройства защитного отключения (УЗО) и дифференциальные автоматы.

Для обеспечения безопасной работы оборудования и эффективной защиты от ряда опасных факторов необходима установка нескольких устройств защиты, что усложняет и удорожает схему. Например, использование системы заземления TN—C—S ПУЭ [1] обязывает подключение в схему УЗО в качестве защиты от косвенного прикосновения. Но в случае обрыва PEN-проводника УЗО не сможет обеспечить безопасность работы оборудования в связи с возникновением опасных перенапряжений (рис. 1, *а*). Поэтому необходимо применение реле напряжения, которое, в свою очередь, не в состоянии защитить человека при однофазном замыкании на землю (рис. 1, *б*). Следовательно, необходимо применение обоих защитных устройств.

В связи с этим был разработан защитный вводной разноминальный коммутационный аппарат (ВРКА), который позволяет трансформировать систему TN—C—S в систему TT и обратно, осуществляя полное отделение электроустановки от распределительной сети с разрывом электрической связи между PEN проводником и заземляющим устройством электроустановки.



а) *б*)

Рис. 1. Система заземления TN—C—S (*а*) с УЗО и с реле напряжения (*б*)

Данное устройство выполнено на базе защитных аппаратов модульного или силового оборудования и содержит автономный модуль малономинального автоматического выключателя с номиналом не более 6 А и номинальной группы. При этом все полюса ВРКА отключаются одновременно [2] (рис. 2).

Рассмотрим сеть с системой заземления TN—C—S (рис. 3). Как видно, при однофазном замыкании на корпус электроприемника имеются две цепи протекания тока (I и II). В данном случае отключится коммутационный аппарат (КА) и разъединит лишь линейный L и нулевой рабочий N-проводники.

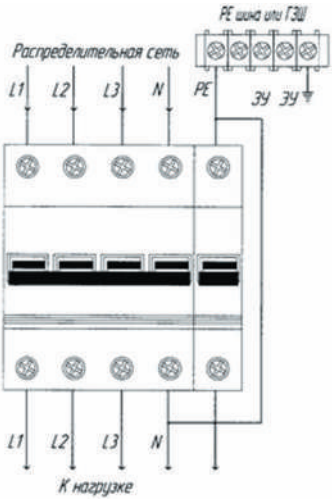


Рис. 2. Вводной разноминальный коммутационный аппарат

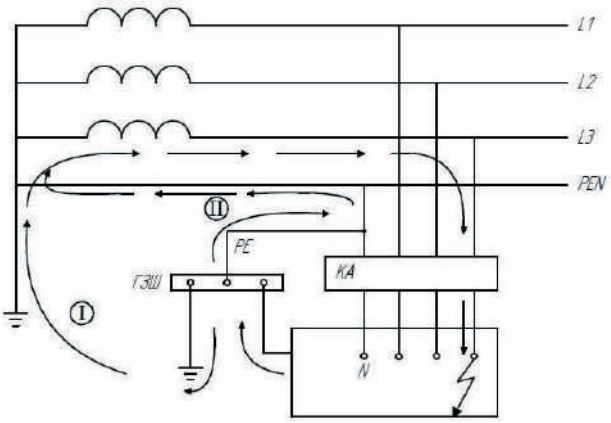


Рис. 3. Однофазное замыкание на землю в системе TN—C—S

Но так как данная схема имеет два пути протекания тока однофазного замыкания на землю, то разрыв одной из них не приведет к нарушению запрета [1] на разрыв PE- или PEN-проводника.

Таким образом, в данной схеме возможна установка вводного разноминального коммутационного аппарата (рис. 4), который полностью отделит электроустановку от распределительной сети с разрывом электрической связи между PEN-проводником и заземляющим устройством электроустановки, что позволит обеспечить достаточный уровень безопасности.

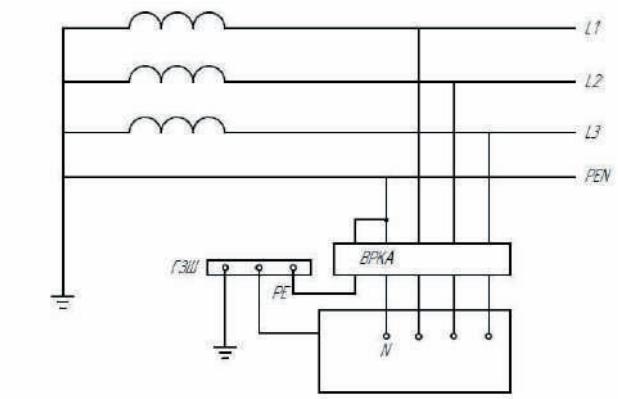


Рис. 4. Система TN—C—S с ВРКА

В случае обрыва магистрального PEN или N проводника трансформация сети из системы TN—C—S в систему TT происходит следующим образом: при пути протекания тока «источник питания — L-проводник — полюс ВРКА L-проводника — нагрузка — нейтральный N-проводник — полюс ВРКА N-проводника — перемычка PE-проводника — полюс ВРКА малономинального автоматического выключателя — PE-проводник — заземляющее устройство электроустановки — заземляющее устройство трансформаторной подстанции — источник питания» срабатывает тепловой расцепитель малономинального автоматического выключателя и отключает весь ВРКА, полностью отделяя тем самым электроустановку от распределительной сети.

Таким образом, использование в качестве защитного аппарата ВРКА значительно упростит и удешевит схему, поддерживая при этом уровень безопасности на требуемом уровне [1, 3].

Литература

1. **Правила** устройства электроустановок. Седьмое издание. Утв. приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204.
2. **Костров В.П.** Способ трансформации систем электроснабжения TN—C—S и TT и система электроснабжения для осуществления способа с защитным вводным разноминальным коммутационным аппаратом (ВРКА) // Патент России № 2695643. 2019.
3. **ГОСТ 12.1.038—82.** Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Межгосударственный стандарт. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

Е.А. Булычева, BulychevaYA@mpei.ru,
С.А. Янченко, yanchenko_sa@mail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ГЕНЕРАТОР ТРОИЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Обеспечение требуемого гармонического состава сетевого напряжения помимо разработки средств снижения уровней высших гармоник подразумевает корректное выявление источников искажений и оценку их фактических вкладов (ФВ) в несинусоидальность напряжения. Основной проблемой при решении данной задачи является достоверное определение частотной характеристики сопротивления сети, которая является важным параметром, определяющим уровни несинусоидальности напряжения сети, и в свою очередь зависит от множества случайных факторов.

В разработанном ранее методе расчета ФВ [1] ключевым моментом является определение частотной характеристики сопротивления в результате анализа реакции электрической сети на искусственное возмущение в виде троичной импульсной последовательности. В данной статье рассматриваются аспекты практической реализации предложенного метода — описывается прототип генератора троичной импульсной последовательности на базе микроконтроллера TMS320F28335.

Описание разработанного метода определения ФВ в несинусоидальность напряжения.

Для определения ФВ согласно [1] в точке передачи электроэнергии (ТПЭ) вводится измерительная помеха — троичная импульсная последовательность с длительностью, соответствующей исследуемому временному интервалу (рис. 1). Затем измеряются сигналы напряжения $u(t)$ и токов $i(t)$, $i_C(t)$ в ТПЭ и раскладываются на гармонические составляющие $U_h(t)$, $I_h(t)$, $I_{ch}(t)$ с помощью оконного преобразования Фурье для представления сигналов в частотно-временной области. Отношение h-й гармоники напряжения в ТПЭ $U_h(t)$ к соответствующей гармонике троичной импульсной последовательности $I_h(t)$ характеризует величину сопротивления сети $Z_{uh}(t)$ в момент времени t. Аналогично сопротивление потребителя на частоте h-й гармоники рассчитывается как отношение напряжения $U_h(t)$ к току потребителя $I_{ch}(t)$. В результате ФВ на частоте h-й гармоники в момент времени t рассчитывается по формулам

$$\underline{U}_{ch} = (\underline{U}_h + \underline{Z}_{ch}\underline{I}_h)\frac{\underline{Z}_{uh}}{\underline{Z}_{uh} + \underline{Z}_{ch}}, \quad (1)$$

$$\underline{U}_{uh} = (\underline{U}_h - \underline{Z}_{uh}\underline{I}_h)\frac{\underline{Z}_{ch}}{\underline{Z}_{uh} + \underline{Z}_{ch}}. \quad (2)$$

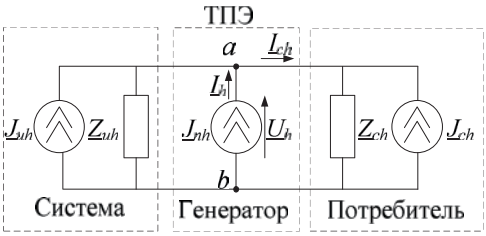


Рис. 1. Эквивалентная схема электрической сети

Экспериментальные результаты, представленные в [1], подтверждают хорошую точность разработанного подхода в условиях меняющихся параметров сети. Основным ограничением метода является необходимость использования генератора импульсной последовательности для создания измерительной помехи.

Структура генератора троичной импульсной последовательности. В MatLab / Simulink была создана модель генератора измерительной помехи на основе однофазного инвертора напряжения с системой управления, позволяющей программировать выходные параметры троичной импульсной последовательности и таким образом точно определять частотную характеристику сопротивления.

Общая структура разработанного генератора импульсной последовательности содержит две основные части:

- силовая часть, включающая источник постоянного тока, конденсатор постоянного тока, инвертор полного моста и входной LCL-фильтр (рис. 2);
- блок управления, содержащий контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), контуры управления напряжением и током, блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (рис. 3).

Генерируемая троичная импульсная последовательность добавляется к опорному току, таким образом, инвертор вводит измерительную помеху в исследуемую электрическую сеть. Результирующая форма выходного тока и ее спектр представлены на рис. 4. Из рисунка следует, что при относительно низком уровне возмущения создается широкий и равномерный гармонический спектр, что позволяет точно определять частотную характеристику сопротивления сети на всем рассматриваемом частотном диапазоне.

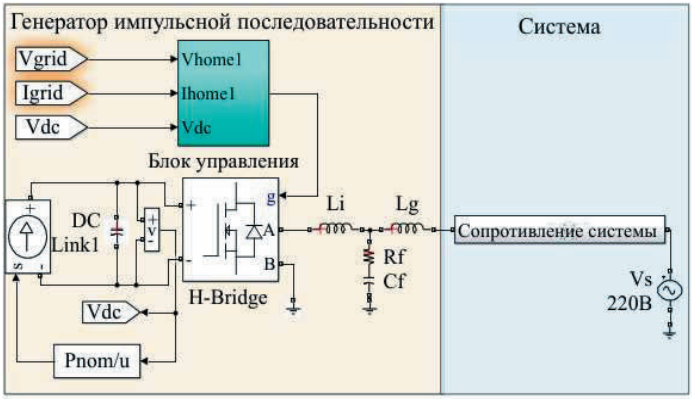


Рис. 2. Модель электрической сети с подключенным генератором

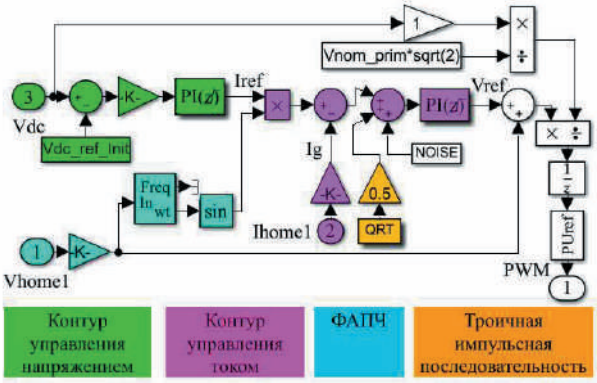
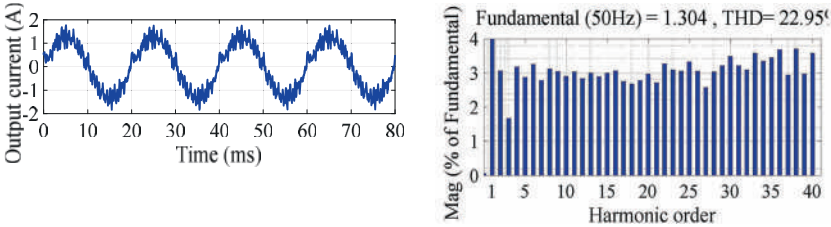


Рис. 3. Модель блока управления генератором



а) *б*)

Рис. 4. Выходной ток (*а*) и спектр выходного тока (*б*) генератора импульсной последовательности

Устройство микроконтроллера TMS320F28335. Функциональная схема микроконтроллера TMS320F28335, используемого для управления работой генератора измерительной помехи, представлена на рис. 5 [3, 4].

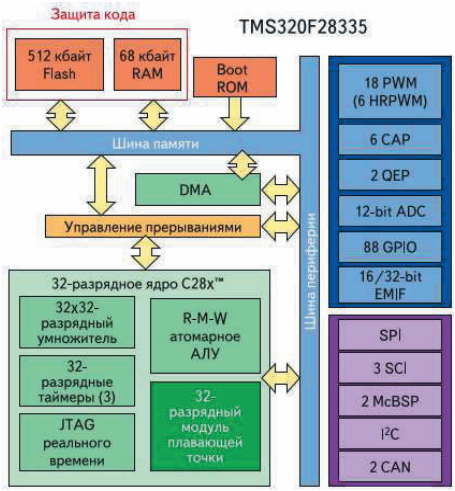


Рис. 5. Функциональная схема микроконтроллера TMS320F28335

TMS320F28335 представляет собой цифровой сигнальный процессор, оснащенный 32-разрядным ядром с тактовой частотой 150 МГц и вычислительным модулем на основе арифметики с плавающей точкой; большим объемом встроенной памяти: 68 Кбайт оперативной и 512 Кбайт постоянной флэш-памяти для хранения кодов программ. Периферийные устройства TMS320F28335 включают 88 портов ввода/вывода, 18 модулей ШИМ, 16 каналов 12-битных АЦП, интерфейсы связи CAN, SPI, I2C. Совместная работа модулей микроконтроллера регулируется модулем управления прерываниями.

Программирование TMS320F28335 осуществляется на языке C++ в интегрированной среде разработки Code Composer Studio или в MatLab/Simulink с помощью пакета C2000 Embedded Coder [2]. Во втором случае обеспечивается значительное упрощение процесса написания кода, который генерируется автоматически на основе Simulink-модели. Благодаря широким аппаратным возможностям данные микроконтроллеры используются для эффективного управления силовыми преобразователями, двигателями, источниками питания, в том числе многоканальными, с фазовой синхронизацией большого числа каналов.

На рисунке 6 представлена модель генератора импульсной последовательности в Simulink, используемая для генерации кода управления

TMS320F28335. Для работы системы управления устройства используются два периферийных модуля: модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП/ADC) и широтно-импульсной модуляции (ШИМ/ePWM), блоки которых представлены в библиотеке Simulink Embedded Coder.

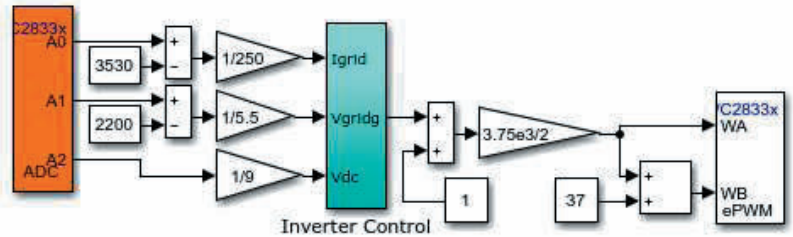


Рис. 6. Модель для программирования TMS320F28335

12-разрядный модуль АЦП преобразует аналоговое значение сигнала с измерительных датчиков в цифровое. При этом поскольку АЦП преобразует только положительные сигналы до 3,3 В, реальные знакопеременные сигналы напряжения и тока масштабируются соответствующим образом и сдвигаются в область положительных значений. На рисунке 6 эти преобразования компенсируются с помощью блоков сложения и усиления на выходе АЦП.

Блок управления (Inverter Control) на рис. 6 реализован в соответствии со схемой рис. 3. После того как нужные опорные сигналы получены, они передаются на двухканальный модуль ШИМ для формирования сигналов переключения силовых ключей. Аналогично АЦП сигнал на входе ШИМ-модуля необходимо сдвинуть в положительную область и масштабировать в соответствии с заданной частотой переключения 20 кГц. Для предотвращения выдачи сигналов на одновременное включение двух ключей одной стойки инвертора и, соответственно, возникновения КЗ, к сигналу на входе второго канала ШИМ-модуля WB добавляется некоторое число, обеспечивающее «мертвую зону» при переключении транзисторов инвертора.

Состав генератора импульсной последовательности. Аппаратная схема генератора троичной импульсной последовательности на базе однофазного инвертора представлена на рис. 7.

В качестве ключей мостового инвертора используются IGBT транзисторы, получающие сигналы управления через плату драйверов. Таким образом обеспечиваются усиление мощности сигналов управления микроконтроллера и гальваническая развязка с его цепями.

Звено постоянного тока инвертора строится на основе источника питания постоянного напряжения 400 В и конденсатора 1000 мкФ для обеспечения стабилизированного напряжения на входе инвертора.

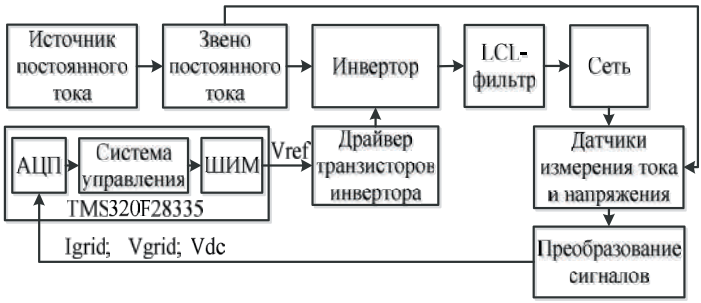


Рис. 7. Схема генератора троичной импульсной последовательности

Сигналы, необходимые для работы системы управления, получаются с помощью датчиков напряжения и тока, после чего преобразуются на плате формирования сигналов в соответствии с требованиями АЦП. Алгоритм системы управления по формированию сигналов переключения транзисторов выполняется микроконтроллером в ходе «прерывания», осуществляемого с частотой ШИМ.

Заключение. Описанный генератор измерительной помехи является необходимым инструментом при исследованиях фактического вклада нелинейных электроприемников в несинусоидальность напряжения в рамках разработанного подхода [1]. Дальнейшие исследования будут посвящены сборке и испытаниям устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90264.

Литература

1. **Булычева Е. А., Кулешова Г. С., Янченко С. А.** Идентификация высших гармоник в реальном времени в электрических сетях с переменным режимом работы // Промышленная энергетика. 2020. № 10.
2. **Elrajoubi A., Ang S.S., Abushaiba A.** TMS320F28335 DSP programming using MATLAB Simulink embedded coder: Techniques and advancements. Proc. IEEE 18th Workshop Control Model. Power Electron. 2017. P. 1—7. DOI: 10.1109/COMPEL.2017.8013418.
3. **TMS320F2833x,** TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs)// Texas Instruments, SPRS439O. June 2007. Revised April 2019 (https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf?ts=1599979531294&ref_url=https%253A%252F%252F.www.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F28335).
4. **Гук И.** Новые цифровые сигнальные контроллеры с плавающей точкой TMS320F28335 // Компоненты и технологии. 2008. № 5. С. 68—71.

И. Мейсам, БГТУ им. Шухова, г. Белгород

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИРИИ

Энергетический сектор в Сирии играет ведущую роль в экономической и социальной жизни, поскольку он представляет собой один из важнейших компонентов инфраструктуры и больше всего подвержен преобразованиям, происходящим в стране. Производство электроэнергии в Сирии зависит от множества источников: топлива, газа и гидроэнергии на Евфрате. На сектор электроэнергетики повлияла война, в которой страна живет почти девять лет, а стоимость прямых убытков составила около 4 миллиардов долларов.

Современные научные исследования показали, что на расстоянии более 600 км передача электрической энергии с использованием постоянного тока становится экономически выгоднее, чем с использованием переменного тока. Поэтому сирийское правительство, по согласованию с министерством электроэнергетики, решило перейти на использование постоянного тока для передачи электрической энергии при реконструкции и восстановлении военных повреждений в электроэнергетическом секторе.

Использование постоянного тока в Сирии столкнулось с рядом проблем. К научным проблемам следует отнести:

- отсутствие научных исследований в Сирии по использованию постоянного тока, что привело к нехватке специалистов в этой области и использованию зарубежного опыта;
- необходимость обеспечения промышленного сектора необходимой научной экспертизой.

Требуется исследовать характеристики и преимущества использования постоянного тока вместо переменного, оценивая плюсы и минусы и пытаясь найти способ обеспечить развитие передачи электрического тока в Сирии.

Экономические проблемы: отсутствие специалистов в области постоянного тока в Сирии привело к истощению сирийской экономики, к высоким ценам и затратам на ремонт существующих сетей после войны. Дефицит электроэнергии в Сирии после войны в результате нарушения электрической инфраструктуры показал высокую долю потерь электроэнергии в результате использования переменного тока. Необходимо использовать альтернативные научные методы, например, в виде смешанной сети, которая сокращает потери электроэнергии и снижает стоимость передачи.

Основные источники электрического тока в Сирии находятся в восточном регионе, заводы находятся в северном регионе (рис. 1), а внутреннее потребление сосредоточено в западном регионе, вдали от основных источников из-за миграции населения в безопасные районы. В результате потребности в электрическом токе в западном регионе были созданы временные источники, работающие на ископаемом топливе, что привело к увеличению стоимости обслуживания сети переменного тока в Сирии.

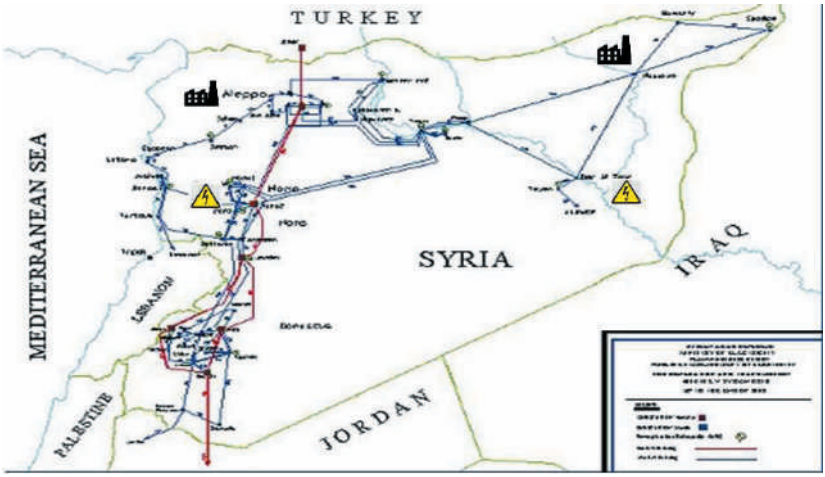


Рис. 1. Карта Сирии, показывающая электростанции, основные заводы и линии электропередач

Выводы.

1. Необходимо изучить постоянный ток и создать в Сирии смешанную сеть, что позволит снизить электрические потери и повысить качество обслуживания.

2. Удовлетворение научных и промышленных потребностей в Сирии гарантирует независимость Сирии от стран, которые экспортируют услуги.

3. Наличие дефицита в соседних странах (Ливан, Иордания и Ирак) позволяет вводить постоянный ток в сирийскую электротранспортную систему и создавать возможности для экспорта электроэнергии в соседние страны с небольшими потери.

А.М. Кузнецова, anastasy.kuznetsova@gmail.com,
М.Е. Вихров, vikhrovme@mail.ru, НИУ «МЭИ», Москва

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ХАРАКТЕРУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В связи с тем, что в последние годы интерес к созданию систем электроснабжения, функционирующих на постоянном токе полностью или частично, стал вновь возрастать [1], стоит уделить внимание данной сфере энергетики и более подробно рассмотреть особенности и закономерности этой области.

Спектр необходимых к решению задач крайне обширен: способно ли оборудование работать необходимым образом при электроснабжении разными родами тока? Имеет ли смысл технологически совершенствовать приемники переменного тока или целесообразнее и выгоднее заменить их на те, что предназначены для работы в сетях постоянного тока?

Чтобы приблизиться к решению этой задачи, необходимо изучить и классифицировать существующие приемники [2] по возможности/характеру функционирования на постоянном токе. Исходя из этого можно выделить три крупных класса:

1. Электроприемники, функционирующие на постоянном токе без специальных мер по усовершенствованию:

1.1. Чисто резистивная нагрузка — электронагреватели, электроплиты, электрочайники, кипятильники, утюги, паяльники работают на постоянном токе так же, как и на переменном.

1.2. Освещение — осветительные приборы функционируют, но исчезает возможность диммирования. Лампы накаливания, люминесцентные лампы с электронной пускорегулирующей аппаратурой (ПРА), а также светодиодные светильники с электронной пускорегулирующей аппаратурой пригодны для питания их постоянным током.

1.3. Приемники, в состав которых входят импульсные блоки питания. К ним относится подавляющее большинство бытовой электроники (компьютеры, мониторы, зарядные устройства и т.д.).

1.4. Двигатели: на постоянном токе могут функционировать вентильные (стиральные машины, пылесосы, холодильники, кондиционеры, иными словами, «инверторная» бытовая техника; компьютерные вентиляторы и т.д.), коллекторные (детские игрушки, фены, электробритвы, приводы стеклоочистителя в автомобиле), бесколлекторные двигатели постоянного тока (стиральные машины, пылесосы, вентиляторы и т.д.), а также универсальные коллекторные двигатели (ручной электроинструмент, некоторые виды бытовой техники — блендеры, миксеры, пылесосы, мясорубки, фены).

2. Электроприемники, которым необходимо технологическое усовершенствование для приемлемой работы на постоянном токе. К этой группе относятся в основном осветительные приборы.

Люминесцентные лампы с электромагнитной пускорегулирующей аппаратурой не работают должным образом из-за дросселя в составе ПРА (на постоянном токе у дросселя не будет необходимого индуктивного сопротивления), но при замене электромагнитной ПРА на электронную исправно функционируют. Светодиодные осветительные приборы на простых схемах управления с гасящим конденсатором также непригодны для использования в цепях постоянного тока ввиду того, что для постоянного тока конденсатор

обладает бесконечным сопротивлением. В этом случае необходима замена схемы управления на электронную ПРА аналогично случаю с люминесцентными лампами.

3. Электроприемники, не способные функционировать на постоянном токе:

3.1. Приемники, в состав которых входит линейный блок питания, не могут работать на постоянном токе из-за наличия трансформатора на входе схемы. Линейные блоки питания постепенно вытесняются импульсными, но пока все еще используются для питания управляющей электроники в стиральных машинах, кухонных плитах, кондиционерах, аудиоаппаратуре, микроволновой печи, дешевых зарядных устройствах.

3.2. Двигатели: синхронные (электромеханические часы и таймеры, привод вращения тарелки в микроволновой печи, двигатель сливного насоса в стиральной машине, насосы и компрессоры) и асинхронные (холодильники, кондиционеры, вентиляторы, лифты, насосы, электроинструменты) непригодны для питания их постоянным током.

Следующим этапом после классифицирования приемников является вопрос оценки целесообразности и экономической эффективности их усовершенствования или замены при переводе сетей с переменного тока на постоянный.

Литература

1. **Кузнецова А.М., Вихров М.Е.** О применении автоматических выключателей в низковольтных распределительных сетях постоянного и переменного тока // XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы «Федоровские чтения — 2019». М.: Издательский дом МЭИ, 2019.
2. **Правила** устройства электроустановок. Седьмое издание. Утв. Приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204.

Е.Д. Записочный, zapisochnyYD@mpei.ru
М.А. Кулага, kulagama@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва,

МЕРОПРИЯТИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ ОБЪЕКТА С ДУГОВЫМИ СТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ

Особенностью электропотребления любого промышленного предприятия, участвующего в осуществлении технологического процесса, считается: большое количество электрооборудования, разнообразие типов и мощностей приемников электроэнергии, влияние объемов производства на количество потребляемой мощности и т.д.

Качество электроэнергии до и после включения электроприемника к сети может быть различно, постоянный рост количества и мощности нагрузки с нелинейными вольт-амперными характеристиками приводит к возникновению высших гармоник, несимметрии и колебаний напряжения. Такие нагрузки при работе создают искажения синусоидальности кривых тока и напряжения в сети или, другими словами, несинусоидальные режимы.

Возникающие экономические ущербы при таком режиме проявляются в ухудшении энергетических показателей, снижении надежности функционирования электрических сетей и сокращении срока службы электрооборудования.

Предприятия, использующие дуговые сталеплавильные печи (ДСП), сталкиваются с проблемой негативного воздействия на питающую сеть, так как при работе печей происходят колебания, несимметрия и провалы напряжения, а также появляются высшие гармоники тока, вызывающие несинусоидальность напряжения.

Основным источником энергии в ДСП являются электрические дуги, которые горят в рабочем пространстве между графитовыми электродами и металлом, в этот момент концентрируется огромная энергетическая мощность. Нелинейность дуги и характеристики печного трансформатора приводят к появлению высших гармоник тока. Уровень гармоник тока сравнительно невелик, но с ними приходится считаться из-за постоянного возрастания мощности ДСП при ее работе.

На рисунке 1 изображены нерегулярные колебания напряжения, которые происходят за счет короткого замыкания электродов с шихтой, обрывами дуг при обвалах шихты и их неустойчивого горения в период расплавления. В этот период наиболее сильно изменяется активная и реактивная мощности печи, а колебания тока достигают 2,5—3,5 кратных значений номинального тока ДСП средней мощности. Регулярные колебания напряжения отмечают из-за действия электромагнитных сил на дуги, вибрации электродов, а также изменения проводимости дуг при испарении различных материалов.

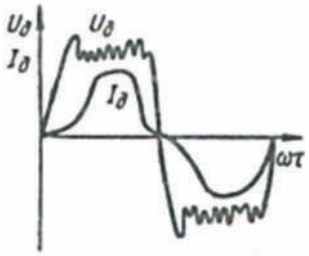


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения дуги сталеплавительной печи в период расплавления [1]

Снижение уровней ВГ в электросетях — одна из общих задач в целях уменьшения влияния нелинейных нагрузок на питающую сеть. Решение данной задачи осуществляется с помощью многофункциональных устройств, в экономичном отношении наиболее целесообразных. Рассмотрим некоторые из них.

Силовые фильтры высших гармоник, или фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), предназначены для снижения искажения кривой питающего напряжения и тока частотой 50 Гц, наряду со снижением уровней ВГ они генерируют в питающую сеть реактивную мощность. Схема ФКУ обычно представляет собой симметричную трехфазную RLC-цепь (рис. 2), содержащую конденсаторные батареи и последовательно соединенные с ними фильтровые реакторы с резисторами или без них, предназначенные для фильтрации высших гармоник тока и одновременно генерации реактивной мощности на основной частоте.

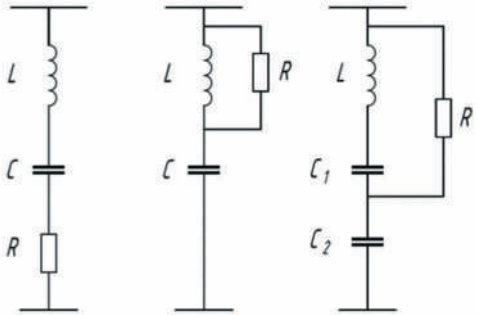


Рис. 2. Упрощенные схемы ФКУ: *а* — узкополосного; *б* — широкополосного; *в* — С-типа

Устройство выпускают в основном двух видов: в шкафном и блочном исполнении. В шкафном исполнении оно более компактно и состоит из ячеек ввода, конденсаторных ячеек, и реакторных ячеек. В блочном виде конструкция более простая. Ее основные элементы: токоограничивающие фильтрующие реакторы, служащие для ограничения тока (по одному на фазу), реакторы установлены на раме конденсаторов с воздушным и естественным охлаждением; высоковольтные конденсаторы, объединенные в блоки; трансформаторы тока.

Внедрение ФКУ позволяет снизить искажение кривой питающего напряжения и тока частотой 50 Гц; повысить коэффициент мощности электроприводов; обеспечить компенсацию реактивной мощности, потребляемую преобразователем; осуществить фильтрацию высших гармоник тока в питающую сеть; повысить устойчивость системы; уменьшить потери в системе; обеспечить защиту электрических сетей.

Статический тиристорный компенсатор (SVC) — устройство, обеспечивающее повышение эффективности работы и энергосбережения систем передачи, и распределения электрической энергии путем быстродействующей управляемой реактивной мощности. Разрабатывают их в основном двух видов: для промышленных установок типа дуговых сталеплавительных печей, а также тиристорных приводов прокатных станов и высоковольтных линий электропередач.

СТК подключается непосредственно на шины потребителя, и вырабатываемая при этом реактивная мощность создается конденсаторами фильтров высших гармоник. Тиристорный вентиль (ТВ), система охлаждения и система автоматического управления СТК размещаются в помещении с автоматической поддержкой микроклимата. Компенсирующие реакторы и БСК (батареи статических конденсаторов) размещаются на открытом воздухе (рис. 3).

Рис. 3. БСК к СТК к п/ст «УГМК-Сталь

Стандартная конфигурация СТК включает набор фильтров высших гармоник — фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), постоянно подключенных к сети или коммутируемых выключателями и включенных параллельно к ним ТВ, образуя тиристорно-реакторную группу (ТРГ) — три фазы управляемых тиристорами реакторов. Основными функциями являются существенное снижение колебаний напряжения (фликера) в питающей сети, возможность подключения мощных печей к энергосистемам с низкой мощностью КЗ, снижение токов высших гармоник, генерируемых нагрузкой, повышение производительности печи, стабилизация напряжения на шинах нагрузки и т.д.

СТАТКОМ (STATCOM) появился с внедрением мощных высоковольтных управляемых приборов типа IGCT(тиристор с интегрированным управлением) и IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором) и

состоит из управляемого источника напряжения (УИН) с внутренним сопротивлением, практически равным нулю (рис. 4).

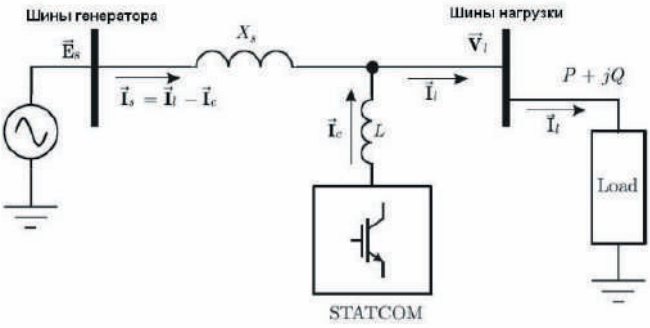


Рис. 4. Принципиальная схема СТАТКОМ

Преимущества у СТАТКОМ: высокая производительность, скорость реакции, стабильность поддержания напряжения, увеличенный диапазон мощности, меньшие габаритные размеры устройства в сравнении с СТК. Время реакции СТАТКОМ составляет менее 5 мс, при этом у СТК минимальное время отклика составляет порядка 30 мс, что обеспечивает плавную динамическую компенсацию реактивной мощности, поэтому сглаживание колебаний напряжений выше, и доза фликера уменьшается [2].

Можно отметить, что статический компенсатор (СТАТКОМ) обладает рядом достоинств по сравнению с СТК: большее быстродействие, удаление гармоник за счет применения широтно-импульсной модуляции, установленная мощность ниже в 2 раза. Впрочем, учитывая высокую стоимость СТАТКОМА, которая в 3 раза больше, чем у СТК, делает его использование малопривлекательным. По этой же причине активные и гибридные фильтры, которые считаются модификациями быстродействующего статического компенсатора, также практически не используются.

Для комплексного улучшения качества электроэнергии и динамической компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения электросталеплавительных печей устанавливают статические тиристорные компенсаторы. В настоящее время доля СТК среди компенсирующих устройств, установленных в системах дуговых печей высокой и средней мощности, составляет 90 % [3].

При работе печи без каких-либо средств компенсации возникают кратковременные дозы фликера, превышающие допустимые нормы. Рассмотрим график электродуговой печи на 50 МВ·А, получающей электроэнергию от слабой сети на 110 кВ. Кривые изменения напряжения на шинах дуговой печи показаны на рис. 5. На графике можно увидеть нестабильное

напряжение без использования СТК, при этом совместная работа компенсатора и печи позволяет сгладить провалы и скачки напряжения, что значительно улучшает качество сети.

Рис. 5. График зависимости напряжения от времени при работе печи

Было экспериментально зарегистрировано [4], что при помощи использования СТК увеличился коэффициент мощности нагрузки с 0,7 до 0,97, снизились колебания напряжения питающей сети в 3 раза, уменьшилось время одной плавки металла со 150 до 130 мин, удельный расход электроэнергии на тонну выплавляемой стали меньше на 4 %, а также сократился расход графитовых материалов.

Подберем мощность СТК, необходимую для печи ДСП-25.

Исходные данные для расчета на основании справочных данных [5] занесем в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Техническая характеристика электропечи ДСП-25

Показатель	Значение
Номинальная емкость печи, т	25
Номинальная мощность, потребляемая от сети, МВ·А	12,6
Максимальный ток, кА	23,5
Удельный расчетный расход электроэнергии на расплавление 1 т твердой завалки и при непрерывном нахождении электропечи под током, (кВт·ч)/т	420
Продолжительность расплавления под током, мин	84

Таблица 2

Трансформатор печи ЭТЦНК-20000/35-76У3

Показатель	Значение
Мощность, МВ·А	9,0
Первичное напряжение, кВ	35
Пределы вторичного напряжения, В	370—128
Напряжение короткого замыкания, %	10

$S_{\text{ДСП ном}} = 12,6\ \text{МВ}\cdot\text{А}$ — номинальная мощность дуговой печи;

$\cos\varphi = 0,7 - 0,8$ — коэффициент мощности дуговой печи;

$U_{\text{ном}} = 35\ \text{кВ}$ — номинальное напряжение питания;

$S_{\text{тр}} = 9\ \text{МВ}\cdot\text{А}$ — номинальная мощность питающего трансформатора;

$U_{\text{кз}} = 10\ \%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора;

$S_{\text{кз}} = 600\ \text{МВ}\cdot\text{А}$ — предполагаемая мощность короткого замыкания сети.

Проведем расчет максимальной потребляемой мощности ДСП с учетом 20 % перегрузки, так как в процессе расплавления происходит наиболее большая нагрузка на трансформатор:

$$P_{\text{ДСП}} = 1,2\ S_{\text{ДСП ном}}\ \cos\varphi = 1,2\cdot 12,6\cdot 0,75 = 11,34\ \text{МВ}\cdot\text{А};$$

$$Q_{\text{ДСП}} = 1,2\ \text{S}_{\text{ДСП ном}}\ \sqrt{1-\cos^2\varphi} = 1,2\cdot 12,6\sqrt{1-0,75^2} = 10,0\ \text{Мвар};$$

$$S_{\text{ДСП}} = 1,2\ S_{\text{ДСП ном}} = 1,2\cdot 12,6 = 15,12\ \text{МВ}\cdot\text{А}.$$

Реактивную мощность, потребляемую трансформатором, находим по формуле

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}}\ U^2_{\text{ном}}}{100\ S_{\text{тр}}} = \frac{10\cdot 35^2}{100\cdot 9} = 13,61\ \text{Ом};$$

$$Q_{\text{тр}} = \left(\frac{P_{\text{ДСП}}}{U_{\text{ном}}}\right)^2\ X_{\text{тр}} = \left(\frac{11,34}{35}\right)^2\cdot 13,61 = 1,43\ \text{Мвар}.$$

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой печью и трансформатором, требуется установка фильтрокомпенсирующих устройств мощностью:

$$Q_{\text{ФКУ}} = Q_{\text{ДСП}} + Q_{\text{тр}} = 10,0 + 1,43 = 11,43\ \text{Мвар}.$$

Исходя из гармонического состава токов печи для установки выбираются ФКЦ 2-, 3- и 5-й гармоник:

$$Q_{\text{ФКЦ2}} = 10 \text{ Мвар},$$
$$Q_{\text{ФКЦ3}} = 10 \text{ Мвар},$$
$$Q_{\text{ФКЦ5}} = 15 \text{ Мвар}.$$

Мощность ФКЦ 5-й гармоники больше остальных, чтобы увеличить ее влияние на токи более высоких частот.

Для того чтобы определить максимальные колебания напряжения и дозу фликера P_{St} в точке присоединения к сети, необходимо выполнить расчет полной мощности, потребляемой ДСП в режиме трехфазного эксплуатационного КЗ (ЭКЗ). Коэффициент кратности тока ЭКЗ для ДСП-25 согласно [6] принимают равным 2,5—2,8.

Найдем мощность ЭКЗ по формуле

$$S_{\text{ЭКЗ ДСП}} = 2,5 \cdot 12,6 = 2,5 \cdot 12,6 = 31,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Рассчитаем кратковременную дозу фликера, генерируемую печью:

$$P_{\text{St95}} = \frac{S_{\text{ЭКЗ ДСП}}}{S_{\text{кз}}} K_{\text{St}},$$

где K_{St} — показатель интенсивности кратковременной дозы фликера с вероятностью 95 %; так как точные данные отсутствуют, принимаем его равным 65 ед.

Следовательно, при предполагаемой мощности КЗ сети при работе печи в точке присоединения ожидается доза фликера, равная

$$P_{\text{St95}} = \frac{S_{\text{ЭКЗ ДСП}}}{S_{\text{кз}}} K_{\text{St}} = \frac{31,5}{600} \cdot 65 = 3,413.$$

Допустимое значение дозы фликера, согласно ГОСТ 30804.3.3—2013, должно составлять не более 1,0. Для современных СТК коэффициент подавления не превышает 2,0 ед [2].

Расчетную номинальную мощность СТК найдем следующим образом:

$$S_{\text{СТК}} = S_{\text{ЭКЗ ДСП}} \cdot 0,75 = 31,5 \cdot 0,75 = 23,63 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для установки выберем мощность СТК, равную 20 МВ·А при мощности кз 600 МВ·А. СТК с коэффициентом подавления 1,7 доведет величину

фликера до $\frac{3,41}{1,7} = 2,00$. Величина превышает допустимую, но выбранные условия позволяют остановиться на этом варианте.

Эффективность применения такого средства компенсации заключается в сокращении производственных расходов, увеличении срока службы оборудования, улучшении производственных показателей, снижении расходов на оплату потерь активной электроэнергии в трансформаторе. Такое мероприятие, как установка тиристорного компенсатора, позволит улучшить показатели выпускаемой продукции, стабильности работы завода и снизить как дозу фликера, так и коэффициенты искажения синусоидальности кривой.

Литература

1. **Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А.** Основы производства и обработки металлов: учебник. М.: МГВМИ, 2005.
2. **Ненахов А.И.** Разработка методик подавления колебаний напряжения и коррекции формы токов резкопеременных промышленных нагрузок с помощью быстродействующих управляемых устройств. Диссертация. Москва, 2017.
3. **Николаев А.А., Анохин В.В., Ивекеев В.С.** Повышение эффективности работы электродуговых печей за счет применения новых алгоритмов управления реакторной мощностью статических тиристорных компенсаторов. Магнитогорск, 2018.
4. **SVC Компенсатор** реактивной мощности СТК — ключ к повышению экономичности дуговых печей. — ABB, 2010. https://library.e.abb.com/public/5011b9802c05e5f2832577d10042f569/SVC%20A02-0102%20RU%20LOW%20RES.pdf
5. **Электротехнический** справочник в 4 т.Т.4. Использование электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. М.: Издательство МЭИ, 2004.
6. **Минеев Р.В., Бадажков О.А., Игнатов И.А.** Опыт эксплуатации дуговых печей малой и средней емкости. М.: Металлургия, 1988.

П.Д. Кутейников, suhanov.pavel@inbox.ru, Г.С. Кулешова, AlexeenkovaGS@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

УТОЧНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ ВЫБОРЕ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ

С увеличением доли коммунально-бытовых потребителей в настоящее время все большее внимание уделяется особенностям проектирования систем электроснабжения административных и жилых зданий, квартир, загородных домов частного сектора (коттеджей).

Выбор оптимального сечения токоведущих жил является важной задачей при проектировании систем электроснабжения. Завышение сечений

приводит к перерасходу материала и, как следствие, к увеличению капиталовложений и стоимости проекта. Занижение сечений влечет за собой увеличение потерь мощности и напряжения в электрической сети, а также перегрев проводников, который в свою очередь может привести к расплавлению изоляции и возникновению аварийных ситуаций, таких как короткие замыкания. Для решения данной проблемы выбор сечения токоведущих жил осуществляется по нескольким условиям.

Сечение токопроводящей жилы проводов и кабелей электропроводок выбирается согласно ПУЭ по условию нагрева длительным расчетным током в нормальном и послеаварийном режимах и проверяется по потерям напряжения. Для проводов и кабелей, прокладываемых внутри помещений, сечение определяется по максимальному расчетному току нагрузки и выбирается из условия [1—4]:

$$I_{\text{д.д}} \geq kI_{\text{р max}}, \tag{1}$$

где $I_{\text{д.д}}$ — длительно допустимый ток проводника при расчетной температуре, А; $I_{\text{р max}}$ — максимальный расчетный ток нагрузки, А; k — поправочный коэффициент.

Целью данной работы является уточнение значения поправочного коэффициента при выборе сечений проводников электропроводок.

В справочной литературе величина поправочного коэффициента задается равной 1,3—1,5 [2]. Однако следует отметить, что при выборе длительно допустимого тока проводника необходимо учитывать такие факторы, как температура окружающей среды, тип изоляции проводника, способ прокладки проводников, взаимное влияние проложенных рядом электрических цепей. Учет каждого из перечисленных факторов осуществляется с помощью соответствующих поправочных коэффициентов [3, 4]. Тогда условие выбора сечения токопроводящей жилы (1) имеет следующий вид:

$$I_{\text{д.д}} \geq \frac{I_{\text{р max}}}{k_{\text{т}}k_{\text{п}}k_{\text{ц}}}, \tag{2}$$

где

$$k = \frac{1}{k_{\text{т}}k_{\text{п}}k_{\text{ц}}}. \tag{3}$$

В выражении (3) $k_{\text{т}}k_{\text{п}}k_{\text{ц}}$ — поправочные коэффициенты, соответственно учитывающие влияние температуры окружающей среды в зависимости от типа изоляции, влияние способа прокладки проводников, взаимное влияние проложенных рядом электрических цепей [3, 4].

Наиболее часто для электропроводок квартир и коттеджей используются кабельные изделия с изоляцией из поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилена и резины [3, 4]. Для каждого типа изоляции в справочных таблицах приводятся значения коэффициента $k_{т}$ в диапазоне температур от 10 до 50 °С. Коэффициент $k_{п}$ при скрытой прокладке проводников, уложенных непосредственно в термоизолирующем материале (штукатурке), равен 0,7, а при том же способе прокладки, но в трубах — 0,77; при открытой прокладке проводников принимают значения 0,9 ÷ 1,0. Коэффициент $k_{ц}$ учитывает расположение и количество проложенных рядом проводников, а также количество слоев прокладки электрических цепей [3, 4].

Стоит отметить, что для электропроводок предпочтительнее применять проводники с ПВХ-изоляцией, так как данный материал обладает высоким диапазоном рабочей температуры, высокой эластичностью, высокой устойчивостью от воздействия влаги и различных кислот, хорошими диэлектрическими свойствами, а также сохраняет свою эластичность даже при сильных низкотемпературных условиях. Резиновая изоляция, хоть и обладает большей гибкостью, довольно быстро теряет свои свойства. Изоляция из полиэтилена хорошо подходит для высоковольтных кабелей, но из-за высокой стоимости использовать ее для прокладки в квартирах экономически невыгодно [5, 6].

Для проведения исследования был рассмотрен случай монтажа электропроводки в квартире при скрытой прокладке проводников. Для данного случая был проведен расчет значений поправочного коэффициента k в соответствии с выражением (3) с учетом изменения коэффициентов $k_{т}, k_{п}, k_{ц}$ в зависимости от количества проложенных рядом в один слой проводников в диапазоне температур окружающей среды 20—35 °С. Графическая интерпретация результатов расчетов для проводников с изоляцией из ПВХ представлена на рис. 1 и 2.

По полученным графикам, а также по проведенным расчетам можно сделать следующие выводы.

1. Значения поправочного коэффициента k в диапазоне 1,3 — 1,5 справедливо принимать в случае прокладки одного проводника и отсутствии проложенных электрических цепей рядом с ним.
2. В остальных случаях значение поправочного коэффициента k нужно определять расчетным путем по выражению (3) или в соответствии с представленными в данной работе графиками.

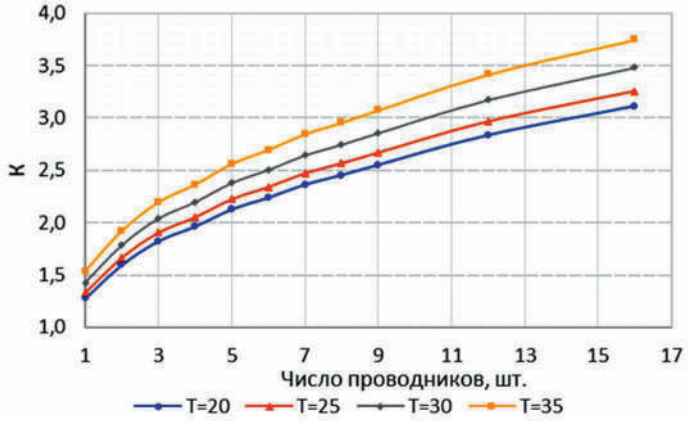


Рис. 1. Зависимости значений поправочного коэффициента *k* от количества проводников, проложенных рядом в один слой в трубах с изоляцией из ПВХ в диапазоне температур окружающей среды 20—35 °С

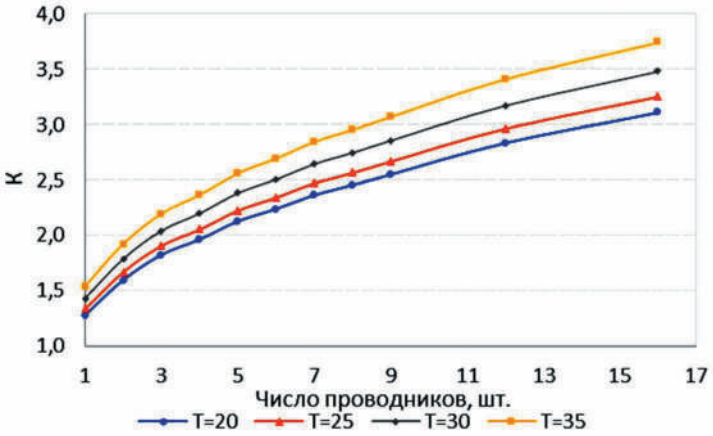


Рис. 2. Зависимости значений поправочного коэффициента *k* от количества проводников, проложенных рядом в один слой с изоляцией из ПВХ в термоизолирующем материале в диапазоне температур окружающей среды 20—35 °С

Литература

1. **Конюхова Е.А.** Электроснабжение объектов: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательство «Мастерство», 2002. 320 с.
2. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ). Шестое и седьмое издания.
3. **ГОСТ Р 50571.5.52—2011.** Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки.
4. **Проектирование** электроустановок квартир и коттеджей (на базе электрооборудования компании Schneider Electric). [Электронный ресурс]. URL: http://www.schneider-electric.ru/
5. **Кабели**, провода, шнуры электрические и вспомогательные материалы / Сборник. Часть 1. Издание официальное.
6. **Кабели**, провода, шнуры электрические и вспомогательные материалы / Сборник. Часть 2. Издание официальное.

СЕКЦИЯ 4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Н.А. Анисимова, ec091@mail.ru,
А.В. Варганова, aleksandra-khlamova@yandex.ru,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОУЗЛОВ С СОБСТВЕННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ И ПОТРЕБЛЕНИЕМ МОЩНОСТИ ИЗ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Промышленные системы электроснабжения, располагая собственной генерацией, сталкиваются с решением оптимизационных задач при проектировании и реконструкции данных объектов [1], определении экономически целесообразных режимов работы источников генерации [2], оценке эффективности внедрения возобновляемых источников энергии [3]. Важной задачей также является определение оптимального соотношения между выработкой электроэнергии собственными электростанциями и приемом мощности из энергосистемы.

В данной работе предлагается подход, позволяющий определять оптимальные загрузки генераторов промышленного энергоузла и прием мощности из энергосистемы.

При сравнении эффективности использования собственной и покупной электроэнергии необходимо решить задачу оптимального распределения активной мощности между генераторами при различных значениях входной активной мощности на границе раздела. Ограничения определяются балансом мощности нагрузки электростанций и связи с энергосистемой. Из рассмотрения следует исключить выдачу активной мощности во внешнюю сеть в связи с невозможностью ее продажи.

В детерминированной постановке задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти минимум целевой функции

$$\min \sum_{i=1}^{n} З\left(P_i\right). \qquad (1)$$

При этом необходимо учесть независимые ограничения

$$\begin{cases} P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max}, \\ \left(\sum P_i + \sum p_i\right) = P_{\text{вх}}, \\ P_{\text{вх},\min} \le P_{\text{вх}} \le P_{\text{вх},\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где P_i — активная мощность генерирующих источников, МВт; $P_{\text{вх}}$ — входные активные мощности связи с энергосистемой, МВт; p_i — активная мощность нагрузки, МВт.

Учитывая разнообразный характер расходных характеристик генераторов, желательно применять алгоритм, позволяющий использовать функции затрат любого вида, которые могут иметь нелинейности, разрывы, точки перегиба и другие свойства, а также могут быть заданы табличными числовыми значениями. В этом случае нахождение оптимального вида функции затрат может быть осуществлено методом полного перебора, что для двух источников не представляет сложности по времени решения задачи.

Исходными данными для оптимизации загрузки генераторов по активной мощности являются расходные характеристики турбоагрегатов (ТГ) [4—6], которые в общем случае представляют собой зависимости расхода топлива от мощности, развиваемой турбиной. Большинство местных электростанций работает по неблочной схеме, поэтому выявление таких зависимостей не представляется возможным, и оптимизацию удобнее всего вести по зависимости мощности турбины от расхода свежего пара.

Для решения задачи оптимального распределения активной мощности между источниками целесообразно использовать метод динамического программирования, что обусловлено разрывностью и нелинейностью целевой функции затрат на выработку электроэнергии. Основная идея метода реализуется в одновременном использовании принципов Беллмана и инвариантного погружения, что означает следующее: на каждом шаге расчета может быть найдено условие оптимального распределения оптимизируемого параметра между двумя источниками.

При решении задачи должны учитываться ограничения в форме равенств, определяющих баланс активной мощности в системе электроснабжения, и ограничения в форме неравенств, отражающие располагаемую мощность агрегатов.

Применение выбранного метода к решению поставленной задачи допустимо по двум причинам:

- функция затрат на производство электроэнергии несколькими турбоагрегатами слагается из затрат отдельных агрегатов, т.е. является аддитивной;

- оптимальное распределение активной мощности между двумя ТГ не зависит от загрузки остальных генераторов и не влияет на нее (соблюдение

этого условия возможно только при отказе от учета потерь в элементах сети).

С использованием метода динамического программирования [7] строится эквивалентная модель энергоузла (табл. 1), которая позволяет для любой возможной нагрузки энергоузла определить загрузку генераторов электростанций рассматриваемой промышленной системы электроснабжения и оптимальный прием мощности из энергосистемы.

При разработке алгоритма также были учтены возможные пропускные способности трансформаторов и линий электропередачи, а также топология электрической схемы.

Таблица 1

Технико-экономическая модель промышленного энергоузла

$\Sigma P_{нагр i}$, МВт	ΣP_{i1}			…	ΣP_{ij}		
P_{it}, МВт	$P_{(i+1)1}$	…	$P_{(i+1)v}$	…	$P_{(i+1)1j}$	…	$P_{(i+1)vj}$
$P_{пр}$, МВт	$P_{пр(i+1)1}$	…	$P_{пр\ (i+1)PS}$		$P_{пр(i+1)1j}$	…	$P_{пр\ (i+1)PSj}$
$З_i$, млн руб.	$З_{i1}$			…	$З_{ij}$		

Разработанный алгоритм реализован в оригинальном программном продукте КАТРАН-OptActivePower [8].

Расчет осуществляется на примере энергоузла, имеющего три точки примыкания к энергосистеме (технико-экономические модели точек примыкания приведены в табл. 2) и две электростанции суммарной мощностью 350 МВт. На ТЭС-1 установлено четыре турбогенератора, на ТЭС-2 шесть турбогенераторов. При этом нагрузки энергоузла могут изменяться в пределах, определяемых в результате анализа электропотребления за последние пять лет.

Таблица 2

Технико-экономические модели узлов связи с энергосистемой

Точка примыкания к энергосистеме 1								
P, МВт	120	125	130	135	140	150	160	–
З, тыс. руб.	338,4	352,5	366,6	380,7	394,8	423	451,2	–
Точка примыкания к энергосистеме 2								
P, МВт	110	120	130	140	150	160	180	200
З, тыс. руб.	310,2	338,4	366,6	394,8	423	451,2	507,6	564
Точка примыкания к энергосистеме 3								
P, МВт	110	120	130	140	150	160	180	–
З, тыс. руб.	310,2	338,4	366,6	394,8	423	451,2	507,6	–

С использованием программного продукта получаем зависимости оптимальных мощностей для каждого из генераторов при различных нагрузках системы (пример приведен для ТГ-1 ТЭС-1) (рис. 1), а также суммарные затраты на выработку и прием электрической мощности (рис. 2). Кроме того, определены оптимальные приемы мощностей из энергосистемы (рис. 3).

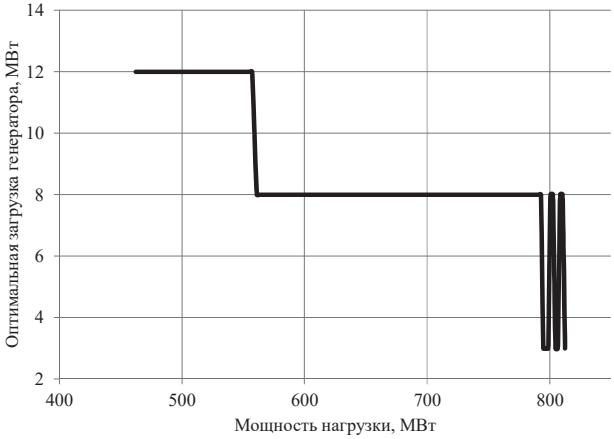


Рис. 1. Рекомендуемая мощность генератора ТГ1 ТЭС-1

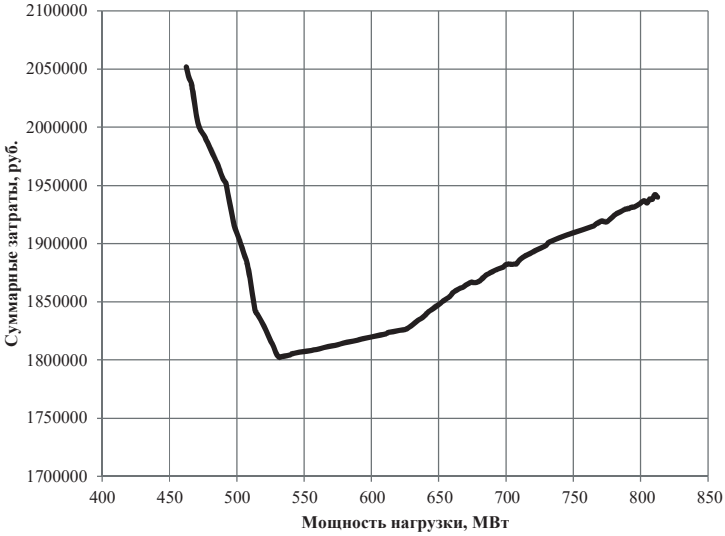


Рис. 2. Зависимость суммарных затрат от мощности нагрузки

Разработанный подход позволяет на основании технико-экономических моделей генераторов и узлов примыкания к энергосистеме, а также заданной схемы энергоузла определять экономически целесообразные режимы работы системы электроснабжения с целью прогнозирования затрат на покупные энергоносители, и на прием мощности из энергосистемы. Разработанный подход необходим для диспетчерских служб энергохозяйства предприятий.

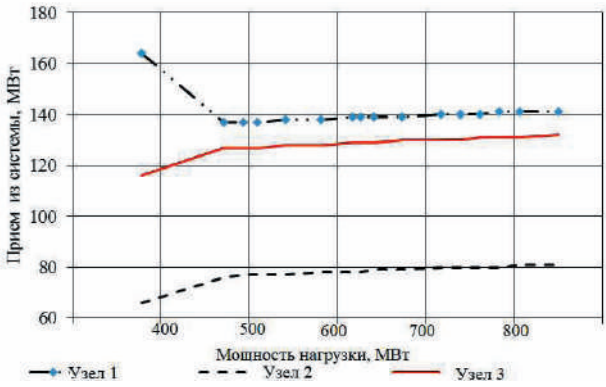


Рис. 3. Зависимость величин приема из энергосистемы от мощности нагрузки

Литература

1. **Шихин В.А., Абд-Эльрахим А.К., Павлюк Г.П.** Постановка оптимизационной задачи при проектировании мультиагентной изолированной микроэнергосистемы // Промышленная энергетика. 2020. № 6. С. 13—21.
2. **Повышение** максимальной электрической мощности тепловых электрических станций, содержащих в своем составе паросиловые и парогазовые энергоблоки / В.В. Шапошников, Б.В. Бирюков, Д.Н. Батько, Я.О. Михалко // Промышленная энергетика. 2020. № 4. С. 19—25
3. **Алхасов А.Б., Дибиров Я.А., Дибиров К.Я.** Энергоэффективные солнечные биогазовые установки с тепловыми аккумуляторами // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 35—43
4. **Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И.** Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 29—34.
5. **Малафеев А.В., Игуменщев В.А., Хламова А.В.** Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций с целью оптимизации режима системы электроснабжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. № 4. С. 34—38.
6. **Варганов Д.Е., Варганова А.В.** Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24—28.

7. **Варганова А.В.** Алгоритм внутристанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17—22.
8. **Авторское свидетельство 2019618397** Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / А.В. Варганова, А.В. Малафеев; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.19.

О.В. Газизова, logan_b_7@mail.ru, А.П. Соколов, sasha777sokolov@list.ru, МГТУ им. Носова, г. Магнитогорск

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ РЕАКТИВНОЙ ЗАГРУЗКЕ ГЕНЕРАТОРА

В настоящий момент очень высокими темпами развивается промышленность: модернизируется оборудование, строятся новые предприятия, мощность которых закладывается на долгие годы. Таким образом, огромная нагрузка ложится на ныне работающие электрические системы и сети, что приводит к строительству новых сетей или улучшению существующих. Вследствие усложнения электрических сетей может увеличиться количество аварий, связанных с перегрузкой генерирующего электрооборудования, количество ошибок персонала электрогенерирующих объектов, а также количество аварийных ситуаций на ЛЭП.

Системы электроснабжения промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции, достаточно специфичны: в нормальных режимах основной задачей является оптимизация затрат на выработку и передачу электрической энергии. Однако вопросы выработки и распределения реактивных мощностей тоже представляют огромный интерес. Это объясняется следующим: количество вырабатываемой реактивной мощности влияет на потери активной мощности в электроэнергетической сети, уровень напряжения в контрольных точках сети, а также статическую и динамическую устойчивость синхронных и асинхронных машин [1—3].

Отметим, что вырабатываемая синхронными генераторами реактивная мощность зависит в основном от выбранного закона АРВ. Перед нами стоит задача выбора закона регулирования промышленной синхронной машины в различных режимах работы энергосистемы [4—7].

Таким образом, целью работы является разработка способов управления режимами промышленных источников распределенной генерации при различных условиях связи с электроэнергетической системой и наличии энергоемкой нагрузки на генераторном напряжении.

В качестве объекта исследования была выбрана промышленная электростанция, показанная на рис. 1. На ней представлены РУ 3, 6, 10, 110 кВ; 13 генераторов мощностью 6, 12, 25, 30, 40, 50 МВт; шесть силовых трансформаторов мощностью 40, 63, 80 МВ·А; два силовых трансформатора с расщепленной обмоткой мощностью 80 МВ·А; два трансформатора связи мощностью 20 МВ·А. Связь с энергосистемой осуществляется по РУ 110 кВ через подстанцию 30; ГРУ 10 кВ предназначено для питания близко расположенных цехов; ЦРУ — для питания собственных нужд станции.

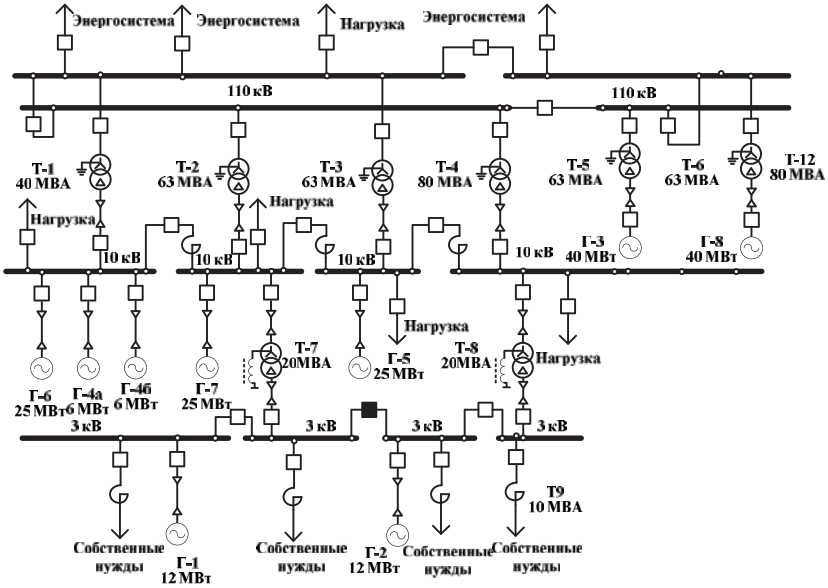


Рис. 1. Схема электроснабжения промышленной электростанции

Данная промышленная электростанция питает большое количество потребителей, которые негативно реагируют на колебания напряжения. Некоторые потребители реактивной мощности подключены непосредственно к шинам синхронных генераторов, что накладывает дополнительные трудности на выбор закона автоматического регулирования возбуждения в различных режимах работы промышленной синхронной электростанции.

Для моделирования установившихся режимов работы на кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова разработан программный комплекс КАТРАН, основанный на модифицированном методе последовательного эквивалентирования.

Будем изменять реактивную нагрузку в различных точках узла и оценивать уровень напряжения на шинах генераторов при раздельной работе с энергосистемой. Результаты опыта приведены в табл. 1, 2, а также на рис. 2—4.

Таблица 1

Влияние изменения реактивной нагрузки на напряжении 110 кВ на уровень напряжения генераторов и вырабатываемую ими реактивную мощность

Q, Мвар	Δ*P*, кВт	*Q*, Мвар								
		Г4а	Г4б	Г5	Г7	Г3	Г8	Г6	Г1	Г2
0	6038	–0,12	–0,04	–0,2	–1,7	–1,2	–2,2	–1,5	–0,4	–0,3
30	6378	–1,3	–1,5	–6	–7,4	–8,3	–10	–14	–2,9	–2,8
60	6448	–2	–1,8	–7,8	–8,9	–10	–13	–22	–3,7	–3,4
120	6545	–3,1	–3,1	–13	–14	–18	–21	–30	–5,4	–5,1

Продолжение табл. 1

Q, Мвар	*Q*, Мвар		*U*, кВ						
	ТГ1	ТГ2	ГРУ	1С 10 кВ	2С 10 кВ	3С 10 кВ	4С 10 кВ	1С ЦРУ	3С ЦРУ
0	–0,35	–2,21	123,92	11,4	11,2	11,3	11,3	3,4	3,4
30	–5	–5	115,93	10,7	10,6	10,6	10,6	3,2	3,3
60	–6	–5,9	108,3	10,1	10	10	10	3	3
120	–11	–6	103,6	9,7	9,7	9,7	9,7	3	3

Таблица 2

Влияние изменения реактивной нагрузки на напряжении 10 кВ на уровень напряжения генераторов и вырабатываемую ими реактивную мощность

Q, Мвар	Δ*P*, кВт	*Q*, Мвар								
		Г4а	Г4б	Г5	Г7	Г3	Г8	Г6	Г1	Г2
0	6038	–0,1	–0,1	–0,2	–1,7	–1,3	–2,2	–1,5	–0,4	–0,3
30	6282	–1,3	–1,3	–4	–5	–4,5	–6,7	–8,9	–1,8	–1,6
60	6541	–4,9	–4,8	–8,9	–8,5	–8,9	–12	–18	–4,7	–4,5
120	6981	–5,3	–5,3	–14	–9,7	–10	–13	–21	–5,1	–5,9

Продолжение табл. 2

Q, Мвар	*Q*, Мвар		*U*, кВ						
	ТГ1	ТГ2	ГРУ	1С 10 кВ	2С 10 кВ	3С 10 кВ	4С 10 кВ	1С ЦРУ	3С ЦРУ
0	–0,35	–2,21	124	11,4	11,2	11	11	3,4	3,4
30	–2,55	–1,33	117	10,2	10,5	10	11	3,23	3,22
60	–4,62	–2,1	113	9,5	9,5	9,6	9,7	3,13	3,12
120	–5,4	–2,8	105	8,5	8,5	8,2	8,3	3,05	3,05

В результате было установлено следующее: все генераторы на ЦЭС и ПВЭС-2 работали в режиме выдачи реактивной мощности, причем, чем больше реактивная нагрузка, тем большую реактивную мощность выдавали синхронные генераторы; при увеличении реактивной нагрузки напряжение на шинах электростанций снижалось.

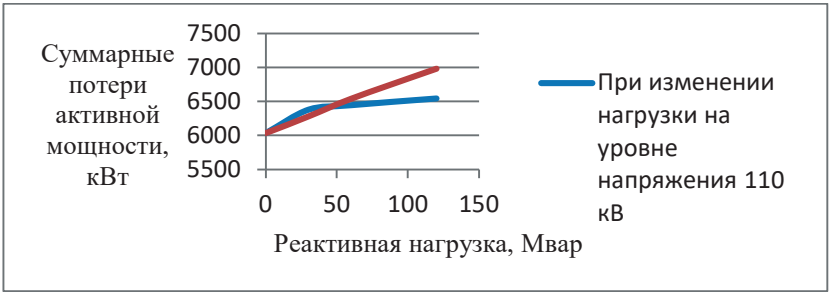


Рис.2. Влияние изменения величины реактивной нагрузки на суммарные потери активной мощности в сети

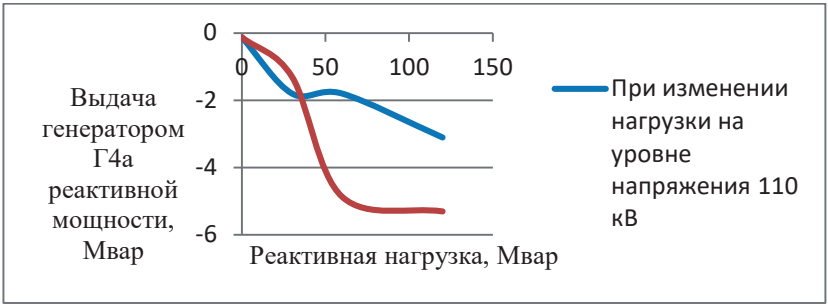


Рис. 3. Влияние изменения величины реактивной нагрузки на уровень выдаваемой генератором Г4а реактивной мощности

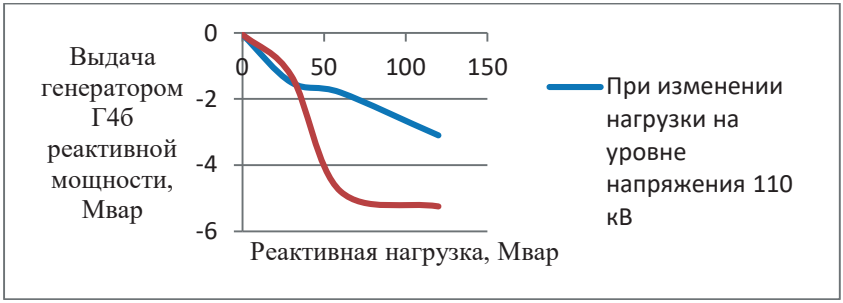


Рис.4. Влияние изменения величины реактивной нагрузки на уровень выдаваемой генератором Г4б реактивной мощности

Хочется особо уделить внимание величинам, полученным при расчете второго опыта, когда нагрузка была расположена на 1С 10 кВ ГРУ. Во втором опыте генераторы Г4а и Г4б взяли на себя реактивную нагрузку больше, чем в первом опыте. Напряжение на секции, к которой присоединены данные генераторы, снизилось с 9,7 до 8,5 кВ.

Как видно из полученных результатов, при присоединении большой реактивной нагрузки на шинах 110 кВ примерно все генераторы узла одинаково загружаются по реактивной мощности.

В случае подключения большой реактивной нагрузки на 1С 10 кВ ГРУ прежде всего загружаться начинают наиболее электрически близко расположенные генераторы Г4а и Г4б. При существенных значениях реактивной мощности нагрузки они перегружаются по реактивной мощности, что следует из круговых диаграмм мощности.

С целью введения загрузки генератора в допустимую область необходимо снизить напряжение уставки регулятора возбуждения в соответствие с рис. 5, при этом напряжение уставки снижается на 5 %.

Рис. 5. Корректировка уставки по напряжению генератора Г4а: *1* − минимально допустимый уровень напряжения генератора; *2* − ограничение по выдаваемой генератором реактивной мощности; *3* − изменение напряжения генератора Г4а при реактивной нагрузке на шинах 110 кВ; *4* − изменение напряжения генератора Г4а при реактивной нагрузке на шинах 10 кВ; *5* − снижение напряжения уставки по напряжению с целью введения реактивной мощности в допустимую область

В настоящее время наиболее распространенным законом регулирования возбуждения является закон постоянства напряжения на выводах обмотки статора. В чистом виде данный закон неприменим в случае, если генератор имеет малую мощность или на шинах генераторного напряжения существенно изменяется реактивная нагрузка. При этом бывают режимы работы, когда генератор достаточно сильно перегружается по реактивной мощности. В свою очередь, это приводит к повышенному протеканию постоянного

тока по обмотке возбуждения генератора, что может негативно сказаться на ее работе вплоть до выхода из строя. Одним из способов поддержания номинального режима работы автоматики при указанном законе регулирования возбуждения является изменение уставки по напряжению.

Литература

1. **Варганова А.В.** Алгоритм внутристанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17—22.
2. **Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В.** К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1 (38). С. 40—47.
3. **Веников В.А.** Сильное регулирование возбуждения. М.: Госэнергоиздат, 1963. 152 с.
4. **Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н.** Исследование влияния автоматических регуляторов промышленных генераторов на параметры переходных процессов коротких замыканий и выхода на раздельную работу // Главный энергетик. 2011. № 3. С. 26—29.
5. **Газизова О.В., Соколов А.П.** Исследование влияния АРВ на результирующую и динамическую устойчивость промышленного генератора в режиме трехфазного КЗ с учетом демпферных моментов и насыщения // Федоровские чтения — 2018: Тр. 48-й Межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 289—296.
6. **Анализ** допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2 (43). С. 12—18.
7. **Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В.** Учет влияния АРВ при определении переходных сопротивлений промышленных генераторов // Энергетические и электротехнические системы: Междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск, 2017. С. 34—41.

С.А. Хорьков, horkov_07@mail.ru,
В.К. Преснухин, v.presnukhin@yandex.ru, Т.Ф. Зарипов,
t.zaripov98@gmail.com,УдГУ, г. Ижевск

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СХЕМЫ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ БЛОКОМ ПГУ-230

Важной задачей электроэнергетики является оценка структурной надежности электрических схем и систем. Для ее решения разработаны методы, позволяющие сначала получать модели электрических цепей и систем, а затем на их основе осуществлять расчет показателей надежности схемы.

Расчет структурной надежности электрических систем, содержащих большое количество различных элементов, выполняют методом пространства состояний. Преимуществами этого метода является возможность применения в большинстве случаев для описания переходов системы из одного состояния в другое модели Маркова [1, 2]. Практический интерес представляет применение таких моделей и методов для исследования структурной надежности находящейся в эксплуатации схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230.

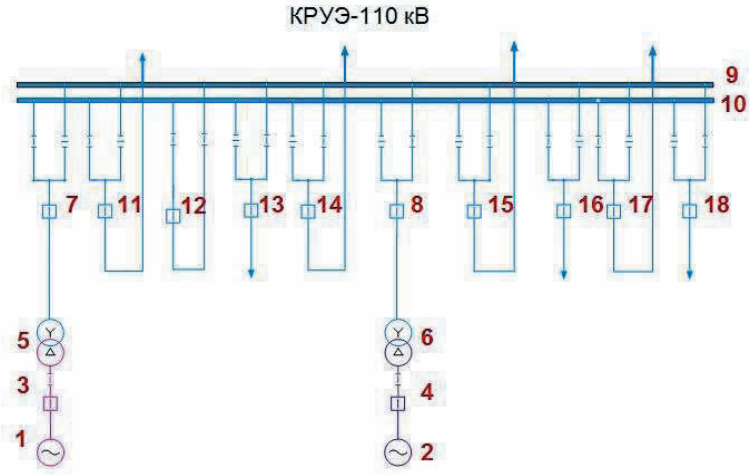


Рис. 1. Схема выдачи мощности блоком ПГУ-230

Блок ПГУ-230 включает два генерирующих агрегата. Один агрегат выполнен на базе газовой турбины, а другой – на базе паровой турбины. Оба агрегата связаны технологически. Вся электрическая мощность, вырабатываемая генераторами, за исключением мощности, необходимой для собственных нужд блока, выдается в энергосистему через комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией напряжением 110 кВ — КРУЭ 110 кВ.

Особенностью блока ПГУ-230 является невозможность работы парового генерирующего агрегата без газового и наоборот; например, при аварийном отключении газового агрегата паровой незамедлительно отключают.

На рисунке 1 показана схема выдачи мощности блоком ПГУ-230 через КРУЭ с двойной системой шин. КРУЭ имеет 10 ячеек, две из которых работают на прием (обозначены цифрами *7*, *8*), семь на выдачу энергии (*11*, *13*—*18*), одна ячейка имеет шиносоединительный выключатель (*12*). Каждая ячейка схемы включает элегазовый выключатель и два шинных разъединителя. Все ячейки КРУЭ конструктивно идентичны и заключены в единый

общий корпус с разделением на поэлементные отсеки. Выключатели *3*, *4* входят в состав элегазовых генераторных распределительных устройств.

Целью статьи является исследование структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230, расчет вероятности состояния отказа схемы и среднего параметра потока ее отказов. Одной из задач работы является анализ применения метода пространства состояний для конкретного случая исследования структурной надежности блока ПГУ-230.

Примем методику расчета структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230 на основе [2,3]. Чтобы оценить надежность системы методом пространства состояний, необходимо сначала описать систему состояниями и возможными переходами между ними. Состояние системы определяется состоянием каждого ее элемента. Для одного элемента схемы состояния и переходы из одного состояния в другое описывают марковской моделью, показанной на рис. 2.

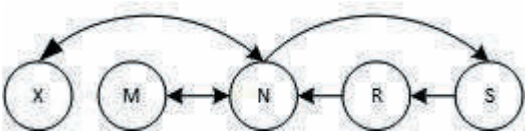


Рис. 2. Диаграмма состояния элемента. Обозначение состояний: *N* — норма; *S* — отказ типа короткого замыкания; *R* — аварийный ремонт (ситуация типа «обрыв цепи»); *M* — капитальный ремонт, *X* — текущий ремонт

Эта модель имеет пять состояний и пять переходов. Причем только одно состояние *N* соответствует нормальной работе элемента, остальные четыре состояния *S, R, M, X* — отказ типа короткое замыкание, аварийный ремонт, капитальный ремонт, текущий ремонт соответственно — характеризуют состояние его отказа. Очевидно, что диаграмма пространства состояний для двух элементов имеет гораздо большее количество состояний и переходов. Для анализа структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230 на основе схемы на рис. 1 составляют расчетный граф, представленный на рис. 3. Нумерация элементов схемы и расчетного графа совпадают. Блок ПГУ-230, блочные трансформаторы и шины КРУЭ обозначены вершинами графа, элегазовые выключатели и разъединители — ребрами.

Следует отметить, что пространство состояний расчетного графа на рис. 3, имеет значительную сложность. Для упрощения пространства состояний схемы будем использовать понятие сечения, базирующегося на понятии отказа, и понятие минимального сечения (МС). Критерием отказа является нарушение связи между генерацией и системой. Под сечением понимают некоторое множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы. Под минимальным сечением (МС) понимают такое множество эле-

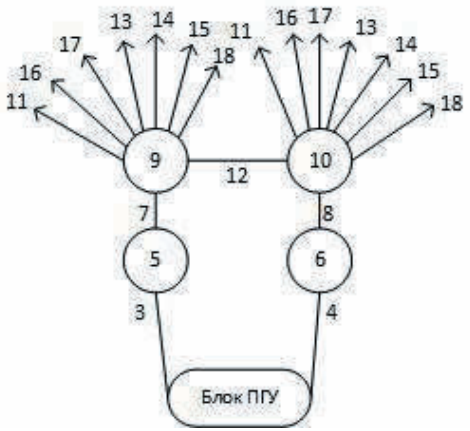


Рис. 3. Расчетный граф

ментов, отказ которых приводит к отказу системы, причем восстановление нормального состояния одного элемента, входящего в это множество, восстанавливает работу системы. Другими словами, понятие сечения позволяет разделить пространство состояний на множество элементов, находящихся в нормальном состоянии и на множество отказавших элементов. Причем минимальное сечение (МС) отличается от сечения тем, что для восстановления работоспособного состояния системы необходимо восстановить работу только одного элемента. По сути, под минимальным сечением (МС) здесь понимают не одно сечение, а некоторый класс сечений.

Важно отметить, что минимальное сечение (МС) относится к оборудованию (элементам) схемы, но оно связано с некоторым минимальным состоянием, в котором находится оборудование (элемент). Некоторый набор оборудования, составляющий минимальное сечение (МС), позволяет разделить пространство состояний на два класса: класс отказавшего оборудования и класс оборудования, находящегося в нормальном состоянии, причем минимальное сечение содержит очевидный путь перехода от состояния отказа к состоянию нормальной работы всей схемы.

На основе методики, изложенной в [2, 3], сформируем классы минимальных сечений (МС), состоящие из одного и двух элементов, для графа, представленного на рис. 3. Результаты поместим в табл. 1. Класс J_2 содержит один элемент, классы J_3, J_4, J_5, J_6 — два элемента.

Из рисунка 3 и табл. 1 видно, что отказ элементов минимального сечения (МС) приводит к отказу всей системы выдачи мощности, а восстановление в работе хотя бы одного элемента класса восстанавливает работу всей системы.

Таблица 1

Классы минимальных сечений (МС) схемы выдачи мощности

Класс	Элементы класса
J_2	12
J_3	10-11, 11-8,7-2,7-8,7-6,5-8,7-4,5-6,3-8,5-4,3-6,3-2,1-4,1-2
J_4	1-8,9-4,2-7,10-3
J_5	11-2,13-1
J_6	5-10,6-9,1-6,2-5

Для минимальных сечений, представленных в табл. 1, задают минимальные состояния отказа:

$MC(J_2) = \{I_S\}$

$MC(J_3) = \{I_R K_R\},\{I_M K_R\},\{I_X K_R\},\{I_R K_X\},\{I_R K_M\}$

$MC(J_4) = \{I_S K_R\},\{I_S K_X\},\{I_S K_M\}$

$MC(J_5) = \{I_S K_S\}$

$MC(J_6) = \{I_S K_R\},\{I_S K_X\},\{I_S K_M\},\{I_R K_S\},\{I_X K_S\},\{I_M K_S\}$

Запись $MC(J_2) = \{I_S\}$ нужно понимать так: минимальное сечения класса J_2, в котором элемент I, представляющий множество элементов, находится в состоянии S.

Запись минимальных сечений (МС) всех классов табл. 1 можно интерпретировать графически через соответствующие минимальные состояния. Представленные состояния в графическом виде отображают на рис. 4.

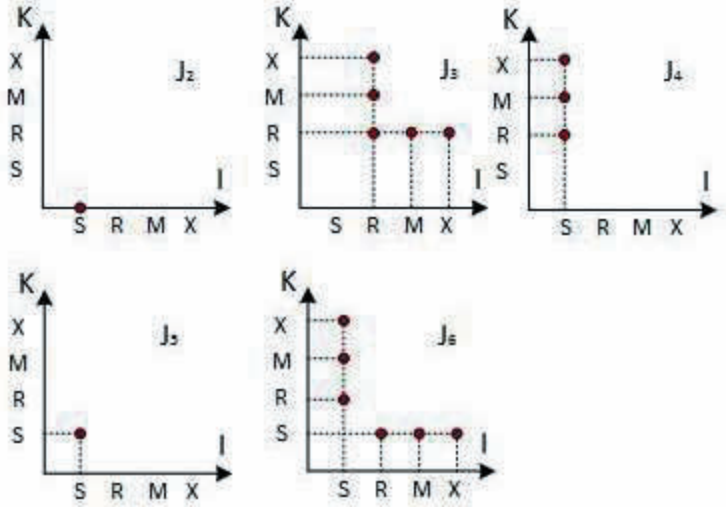


Рис. 4. Графический вид МС-состояний для классов МС-сечений J_2, J_3, J_4, J_5, J_6

Оси координат на рис. 4, обозначенные буквами *K* и *I*, соответствуют элементам схемы, а значения, обозначенные буквами *X*, *M*, *R*, *S,* соответствуют состояниям элементов. Сами рисунки для различных классов поясним на примере класса J_5, который означает, что элемент *K* находится в состоянии *S* и элемент *I* находится в состоянии *S*.

Все присоединения выполнены через разъединители, входящие в состав КРУЭ и элегазовых генераторных распределительных устройств, их показатели надежности в расчете не учитывают, они соответствуют абсолютно надежному элементу системы, который дает нулевой вклад в результирующие показатели надежности [3]. Для классов минимальных сечений (МС) табл. 1 рассчитывают вероятность состояний отказа системы *P* и средний параметр потока отказов *f*. Информацию о надежности элементов берут из [4, 5, 6] и помещают в табл. 2.

Таблица 2

Принятые исходные данные

Элемент	λ_{NS}	λ_{NM}	λ_{NX}	T_{SR}	T_{RN}	T_{MN}	T_{XN}
Блок ПГУ	0,78	0,236	0,472	2,0	163	54	22
КРУЭ	0,0073	0,0457	0,083	0,2	384	192	22
Трансформатор блочный	0,028	1	2	2	74	30	16
Элегазовый выключатель 10–20кВ	0,003	0,02	0,03	0,2	11	7,6	3
Элегазовый выключатель 110кВ	0,0037	0,0223	0,041	0,2	37	28,9	16

Вклад минимальных сечений (МС) табл. 1 в вероятность состояния отказа системы рассчитывают по выражениям (1)—(5) на основе [2, 3]:

$$P_2(J_2) = P(I_S) = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\,; \tag{1}$$

$$\begin{aligned} P_3(J_3) &= \{P(I_R K_M) + P(I_R K_X)\} + P(I_R K_R) + \{P(I_M K_R) + P(I_x K_R)\} = \\ &= \left\{ \frac{\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NM}(K)T^2_{MN}(K)}{T_{MN}(K)+T_{RN}(I)} + \frac{\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NX}(K)T^2_{XN}(K)}{T_{XN}(K)+T_{RN}(I)} \right\} + \\ &+ \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T^2_{RN}(K) + \\ &\left\{ \frac{\lambda_{NM}(I)T_{RN}(K)\lambda_{NS}(K)T^2_{MN}(I)}{\left(T_{MN}(I)+T_{RN}(K)\right)} + \frac{\lambda_{NX}(I)T_{RN}(K)\lambda_{NS}(K)T^2_{XN}(I)}{\left(T_{XN}(I)+T_{RN}(K)\right)} \right\}; \end{aligned} \tag{2}$$

$$P_4(J_4) = \{P(I_S K_M) + P(I_S K_X)\} + P(I_S K_R) =$$
$$= \left\{ \frac{\lambda_{NS}(I) T_{RS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}^2(K)}{\left(T_{MN}(K) + T_{SR}(I)\right)} + \frac{\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NX}(K) T_{XN}^2(K)}{\left(T_{XN}(K) + T_{SR}(I)\right)} \right\} + \quad (3)$$
$$+ \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}^2(K);$$

$$P_5(J_5) = P(I_S K_S) = \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K); \quad (4)$$

$$P_6(J_6) = \{P(I_S K_M) + P(I_S K_X)\} + P(I_S K_R) + P(I_R K_S) +$$
$$+ \{P(I_M K_S) + P(I_X K_S)\} =$$
$$= \left\{ \frac{\lambda_{NS}(I) T_{RS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}^2(K)}{\left(T_{MN}(K) + T_{SR}(I)\right)} + \frac{\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NX}(K) T_{XN}^2(K)}{\left(T_{XN}(K) + T_{SR}(I)\right)} \right\} + \quad (5)$$
$$+ \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) + \lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) +$$
$$+ \left\{ \frac{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) T_{MN}^2(I)}{\left(T_{MN}(I) + T_{SR}(K)\right)} + \frac{\lambda_{NX}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) T_{XN}^2(I)}{\left(T_{XN}(I) + T_{SR}(K)\right)} \right\}.$$

Вклад минимальных сечений (МС) табл. 1 в средний параметр потока отказов системы рассчитывают по выражениям (6)—(10) на основе [2, 3]:

$$f_2(J_2) = f(I_S) = \lambda_{NS}(I); \quad (6)$$

$$f_3(J_3) = \{f(I_R K_M) + f(I_R K_X)\} + f(I_R K_R) + \{f(I_M K_R) + f(I_X K_R)\} =$$
$$= \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}(K) + \lambda_{NS}(I) \lambda_{NX}(K) T_{XN}(K)\} +$$
$$+ \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \left(T_{RN}(I) + T_{RN}(K)\right) + \quad (7)$$
$$+ \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) T_{MN}(I) + \lambda_{NX}(I) \lambda_{NS}(K) T_{XN}(I)\};$$

$$f_4(J_4) = \{f(I_S K_M) + f(I_S K_X)\} + f(I_S K_R) =$$
$$= \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}(K) + \lambda_{NS}(I) \lambda_{NX}(K) T_{XN}(K)\} + \quad (8)$$
$$+ \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \left(T_{SR}(I) + T_{RN}(K)\right);$$

$$f_5(J_5) = f(I_S K_S) = \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \left(T_{SR}(K) + T_{SR}(I)\right); \quad (9)$$

$$
\begin{aligned}
f_6(J_6) &= \{f(I_S K_M) + f(I_S K_X)\} + f(I_S K_R) + f(I_R K_S) + \\
&+ \{f(I_M K_S) + f(I_X K_R)\} = \\
&= \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)T_{MN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NX}(K)T_{XN}(K)\} + \\
&+ \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\big(T_{SR}(I) + T_{RN}(K)\big) + \\
&+ \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\big(T_{RN}(I) + T_{SR}(K)\big) + \\
&+ \lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)T_{MN}(I) + \lambda_{NX}(I)\lambda_{NS}(K)T_{XN}(I).
\end{aligned}
\tag{10}
$$

В выражениях (1)—(10) для элементов *I, K* приняты обозначения: λ_{NS} — интенсивность отказов; λ_{NM} — интенсивность капитального ремонта; λ_{NX} — интенсивность текущего ремонта; T_{SR} — среднее время переключений; T_{RN} — среднее время аварийного ремонта; T_{MN} — среднее время капитального ремонта; T_{XN} — среднее время текущего ремонта [2].

Результаты расчета структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230 сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результирующие показатели надежности блока ПГУ-230

Сумма по классам	f (1/год)	P
J_2	7300×10^{-6}	178.082×10^{-6}
J_3	1318.69×10^{-6}	12.9328×10^{-6}
J_4	1194.77×10^{-6}	0.26755×10^{-6}
J_5	1.52794×10^{-6}	0.0000317×10^{-6}
J_6	1300.85×10^{-6}	0.270392×10^{-6}
ИТОГО:	1194.77×10^{-6}	$13.4707317 \times 10^{-6}$

В таблице 3 по строкам указаны минимальные сечения, в столбцах – средний параметр потока отказов схемы f и вероятности состояния отказа схемы P.

На основе представленной методики были получены количественные показатели структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230. Вероятность состояния отказа схемы составляет $13.4707317 \times 10^{-6}$, средний параметр потока отказов схемы — 1194.77×10^{-6}. Время безотказной работы составит $1/f \approx 90$ лет, что является высоким показателем надежности и удовлетворяет условиям эксплуатации схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230.

Для уменьшения вычислительных затрат расчет структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230 требуется автоматизировать.

Значительное влияние на показатели структурной надежности схем выдачи мощности оказывают количество и номинальная мощность генерирующего оборудования, параметр потока отказов которого возрастает с увеличением номинальной мощности.

Литература

1. **Эндрени Дж.** Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: пер. с англ.: под ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1983. 336 с.
2. **Гришкевич А.А.** Комбинаторные методы исследования экстремальных структур математических моделей электрических цепей и систем: Монография. Челябинск: ЮУрГУ, 2004. 258 с.
3. **Степкина Ю.В., Гришкевич А.А.** Надежность систем электроснабжения: учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2005. 91 с.
4. **Руденко Ю.Н.** Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем. Справочник / под ред. М.Н. Розанова. М.: Энергоатомиздат, 2000. 568 с.
5. **Evaluation** of total cycle cost of GIS substation and development of portable diagnosis devise / T. Shimato, H. Yonezava, T. Nakajima. etc. CIGRE, 2000. P. 23—107.
6. **Report** on the second international survey on high voltage gas insulated substations (GIS) service experience / T.M. Cyan, F. Heil, D. Kopejtkova etc. CIGRE, 2000. P. 23—102.

В.Д. Костюков, kostyukovvlad@yandex.ru,
Д.А. Кретов, dmitry.kretov@gmail.com,
ФГБОУ ВО «ТГУ», г. Тольятти

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРИОДА ОКУПАЕМОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Ключевое место в генерации электрической энергии (ЭЭ) занимают тепловые электростанции (ТЭС): согласно отчета СО ЕЭС за 2019 г. [1] на их долю приходится 62,8 % общей выработки ЭЭ по стране. Установленная мощность ТЭС на базе газотурбинных установок составляет 5,15 % суммарной мощности ТЭС ЕЭС России [2].

Промышленность — один из основных потребителей вырабатываемой тепловой и электрической энергии. Рост нагрузок потребителей сопровождается необходимостью увеличения генерирующих мощностей имеющихся электростанций, поиском дополнительных резервов, а также разработкой и реализацией комплекса мероприятий, направленных на эффективное

использование топливно-энергетических ресурсов. На сегодняшний день одним из актуальных направлений является когенерация на природном газе и других газообразных видах топлива [3–5], а именно внедрение газопоршневых (ГПУ) и газотурбинных установок (ГТУ) на вновь строящихся, расширяющихся или существующих промышленных объектах в качестве альтернативы и надежного дополнения к имеющемуся электроснабжению от энергосистемы.

Ввиду масштабности названного направления и разнообразия модельных рядов когенерационного оборудования внимание в работе сконцентрировано на применении ГТУ. Газотурбинные установки применяются на крупных промышленных предприятиях, заводах, объектах сельскохозяйственного сектора, предприятиях нефте- и газодобывающей отраслей. Предмет исследования: ГТУ отечественного (ОАО «Авиадвигатель») [6, 7] и зарубежного (Siemens) [8] производства. Цель исследования: проведение технико-экономического анализа периода окупаемости установок и систематизация полученных результатов.

В основе расчета использована методика технико-экономического обоснования создания ТЭС, представленная в [9], согласно которой определяются следующие показатели.

1. Проектный расход топлива (кг/с) на одну ГТУ:

$$B_{\text{ГТУ}} = \frac{P_{\text{ГТУ}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}\ \eta_{\text{эл}}}, \qquad (1)$$

где $P_{\text{ГТУ}}$ — мощность ГТУ, кВт; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{эл}}$ — электрический КПД ГТУ, %.

2. Годовой расход топлива (т/год) в установившемся режиме работы:

$$B_{\text{уст}} = B_{\text{ГТУ}}\ n_{\text{ГТУ}} \cdot 3{,}6\ T_{\text{р}}\ n_{\text{блоков}}, \qquad (2)$$

где $B_{\text{ГТУ}}$ — проектный расход топлива на одну ГТУ, кг/с; $n_{\text{ГТУ}}$ — число установок, шт.; $T_{\text{р}}$ — число часов фактической работы агрегата, ч/год; $n_{\text{блоков}}$ — число блоков, шт.

3. Расход условного топлива (т.у.т/год):

$$B = B_{\text{уст}} + B_{\text{неуст}}, \qquad (3)$$

где $B_{\text{уст}}$ — расход топлива в установившемся режиме, т.у.т/год; $B_{\text{неуст}}$ — расход топлива в неустановившемся режиме, т.у.т/год.

4. Годовой расход натурального топлива (тыс.м^3/год):

$$B_{\text{нат}} = \frac{B \cdot 29330}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \, \rho_{\text{газа}}}, \tag{4}$$

где B — расход условного топлива , т.у.т/год; $\rho_{\text{газа}}$ — плотность газа, кг/м^3.

На основании параметров, полученных в (1)–(4), определяется величина годовых затрат на топливо (млн руб/год) [9]:

$$U_{\text{Т}} = \text{Ц} \, B_{\text{нат}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{л}}}{100}\right) 10^{-6}, \tag{5}$$

где Ц — стоимость топлива, руб/тыс.м^3; $B_{\text{нат}}$ — годовой расход натурального топлива, тыс. м^3/год; $\alpha_{\text{л}}$ — справочный коэффициент, учитывающий потери топлива.

5. Расходы на заработную плату персоналу (млн руб/год):

$$U_{\text{ЗП}} = P_{\text{ГТУ}} \, n_{\text{у}} \, \Phi_{\text{ЗП}} \left(1 + \frac{\text{ЕСН}}{100}\right) 10^{-6}, \tag{6}$$

где $P_{\text{ГТУ}}$ — мощность ГТУ, МВт; $n_{\text{у}}$ — штатный коэффициент, чел/МВт (параметр определяется по справочным данным); $\Phi_{\text{ЗП}}$ — заработная плата работника за год, руб.; ЕСН — коэффициент, учитывающий налоги в пенсионный фонд, а также медицинское и социальное страхование, % (ЕСН = 30 %).

6. Амортизационные отчисления (млн руб/год):

$$U_{\text{А}} = K \, H_{\text{А}}, \tag{7}$$

где K — сумма капиталовложений, млн руб.; $H_{\text{А}}$ — средняя норма амортизации, % (определяется по справочным данным).

7. Расходы на регламентные ремонтные работы (млн руб/год):

$$U_{\text{ТР}} = K \, H_{\text{ТР}}, \tag{8}$$

где $H_{\text{ТР}}$ — норма отчислений на сервисное обслуживание (поправочный коэффициент).

8. Величина прочих финансовых затрат (млн руб/год):

$$U_{\text{пр}} = 0{,}25\,(U_{\text{А}} + U_{\text{ТР}} + U_{\text{ЗП}})\,. \qquad (9)$$

9. Эксплуатационные расходы на ГТУ (млн руб/год) определяются как алгебраическая сумма ранее найденных финансовых затрат по (5)—(9):

$$U_{\text{э}} = U_{\text{Т}} + U_{\text{ЗП}} + U_{\text{А}} + U_{\text{ТР}} + U_{\text{пр}}\,. \qquad (10)$$

10. Себестоимость отпущенной ЭЭ [руб/(кВт·ч)]:

$$U^{\text{Э}}_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{Э}}}{W_{\text{отп}}}\,1000\,, \qquad (11)$$

а для выработанной ЭЭ себестоимость определится по выражению [руб/(кВт·ч)]

$$U^{\text{Э}}_{\text{выр}} = \frac{U_{\text{Э}}}{W}\,1000\,. \qquad (12)$$

11. Для расчета периода окупаемости ГТУ необходимо определить чистый дисконтированный доход (ЧДД) и денежный поток (ЧДП). Чистый дисконтированный доход (млн руб.):

$$\text{ЧДД} = \left\{\left[\left(T - U^{\text{Э}}_{\text{отп}}\right) W_{\text{отп}}\right] \frac{1}{(1+0{,}1)^{n}}\right\} - K\,, \qquad (13)$$

где T — стоимость за кВт·ч ЭЭ, руб/(кВт·ч); $\dfrac{1}{(1+0{,}1)^{n}}$ — коэффициент дисконтирования; n — текущий год.

12. Чистый денежный поток (млн руб.):

$$\text{ЧДП} = \left[\left(T - U^{\text{Э}}_{\text{отп}}\right) W_{\text{отп}} \cdot 10^{-3}\right] - U_{\text{Э}}\,. \qquad (14)$$

Период окупаемости ГТУ определяется по алгоритму, представленному на рис. 1, и по (14)—(16):

$$\text{ЧДД}_1 = -K + \frac{1}{(1+0{,}1)^{1}}\,\text{ЧДП}\,, \qquad (15)$$

$$\text{ЧДД}_n = \text{ЧДД1}_{n-1} + \frac{1}{(1+0{,}1)^{n}}\,\text{ЧДП}\,. \qquad (16)$$

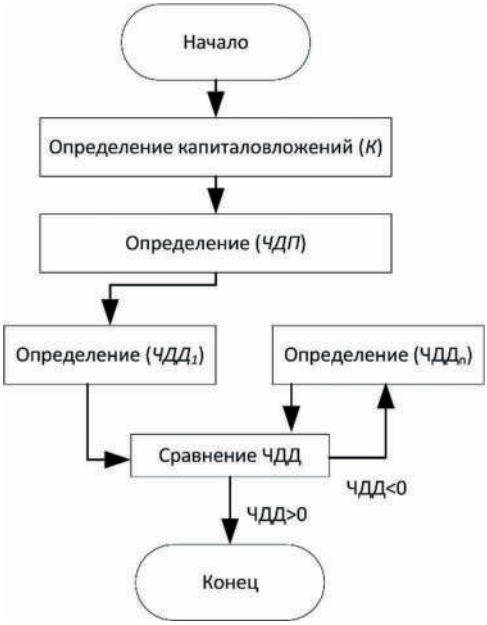


Рис. 1. Алгоритм вычисления периода окупаемости

Расчет по (16) ведется до тех пор, пока величина не поменяет свой знак на противоположный (с « − » на « + »). Смена знака будет свидетельствовать о компенсации всех капиталовложений (с учетом ежегодных эксплуатационных расходов) в ГТУ, т.е. окупаемости агрегата. При этом срок эксплуатации собственного источника электроснабжения (*n* лет), в течение которого происходит полная компенсация финансовых затрат на него, является периодом окупаемости.

Ввиду громоздкости и трудоемкости вычислений на основании представленной методики в MS Excel была составлена программа, позволяющая оптимизировать вычислительный процесс и существенно сэкономить время пользователя. Для выполнения расчета необходимо задать исходные параметры согласно каталожной информации и паспортных данных конкретно рассматриваемой ГТУ. Интерфейс рабочего окна программы представлен на рис. 2.

Рабочее окно программы содержит ячейки для ввода исходных данных, результаты расчета эксплуатационных издержек (затраты на топливо, зарплата персонала, амортизация, регламентные сервисные работы и ППР, прочие расходы; эксплуатационные расходы определяются как алгебраическая сумма перечисленных затрат) и себестоимость производимой ЭЭ, рас-

Исходные данные				
Ргту, кВт	23000		Qр, кДж/кг	46916
N станции, МВт	23		n блоков, шт.	1
Ц газа, руб./тыс. м^3	7000		ρ газа, кг/м^3	0,762
КПД эл.	0,331		ny, чел./МВт	1,59
T уст., ч	7000		ЕСН, %	30
n гту, шт.	1		На	0,12
Фзп, руб.	30000		Нтр	0,073
Фзп годовая, руб./год	360000		α он	0,05
К, млн. руб.	629,18		Т, руб./кВт·ч	5,64
Расчёт эксплуатационных расходов				
			ВГТУ, кг/с	1,481
			Тр, ч/год	7314
			W, МВт·ч	161000
			В уст., т/год	38997,460
			В, т.у.т./год	38997,460
U т, млн. руб./год	223,807		Внат. тыс. м^3/год	31972,470
U зп, млн. руб./год	17,115			
Ua, млн. руб./год	75,502			
Utp, млн. руб./год	45,930			
Unp, млн. руб./год	34,637			
Uэ, млн. руб./год	**396,990**			
Себестоимость ЭЭ				
			W отп., МВт·ч	152950
U отп., руб./кВт·ч	**2,596**		U выр., руб./кВт·ч	2,466

Рис. 2. Рабочее окно программы

чет окупаемости (поле содержит 35 ячеек: ЧДД1 — ЧДД35; ячейка, в которой величина ЧДД меняет свой знак на противоположный, соответствует сроку окупаемости установки), а также свободное поле для заметок.

Гарантированный срок эксплуатации ГТУ при своевременном обслуживании (соблюдение графиков регламентных и планово-предупредительных ремонтов) и капитальном ремонте, а также соблюдении всех технических требований производителя, находится в промежутке от 30 до 35 лет [10]; поэтому при превышении значения периода окупаемости максимально гарантированного срока эксплуатации установки (35 лет) расчет программой не производится – значение максимального периода окупаемости соответствует ячейке ЧДД35 программы. Заключение о нерентабельности того или иного технического решения возможно сделать только после проведения дополнительных исследований и учета дополнительных факторов и параметров.

Согласно представленной методике расчета периода окупаемости с использованием разработанной программы, для модельного ряда ГТУ отечественного (ОАО «Авиадвигатель») и зарубежного (Siemens) производства выполнен технико-экономический анализ, результаты котрого представлены в таблице.

Таблица

Сводная ведомость расчета окупаемости ГТУ

ОАО «Авиадвигатель»		Siemens	
$P_{ГТУ}$, МВт	$T_{окуп.}$, лет	$P_{ГТУ}$, МВт	$T_{окуп.}$, лет
2,50	16	5,25	19
4,13	18	6,75	20
6,14	19	7,90	21
12,30	21	12,90	22
16,30	23	17,00	24
23,00	25	24,70	26
		31,21	29
		47,00	33

По данным таблицы наименьший период окупаемости имеет ГТУ мощностью 6,14 МВт (19 лет), а наибольший период — ГТУ мощностью 47 МВт (33 года). Это критические значения периода окупаемости установок: при вычислениях целенаправленно использовались завышенные стоимости установок, комплектующих и расходных материалов, топлива, регламентных сервисных и капитальных работ для получения граничных показателей. На основании полученных результатов периодов окупаемости ГТУ выполнен перерасчет периода окупаемости с учетом более благоприятных условий (базовая комплектация установок, минимум финансовых затрат и эксплуатационных издержек). Для наглядного отображения результатов построены усредненные интервалы окупаемости, представленные на рис. 3.

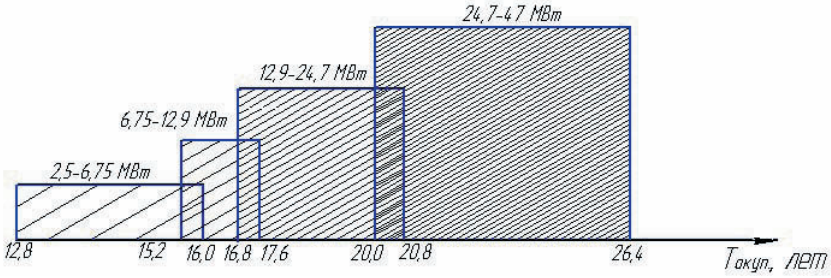


Рис. 3. Усредненные интервалы окупаемости ГТУ

При построении интервалов учитывалась стоимость базовой и максимальной комплектаций установок. Так как стоимость подобных установок является коммерческой тайной и обычно открыто не разглашается на сайтах официальных производителей, то для проведения расчетов по определению усредненных интервалов окупаемости ГТУ выполнен мониторинг стоимости оборудования, близкого по мощности к рассматриваемому. При проведении расчетов использованы два типа возможной комплектации ГТУ —

минимальная и максимальная. При этом базовой стоимостью считалась минимальная стоимость установки, а максимальная стоимость определялась как увеличенная на 40 % базовая.

Значение периода окупаемости для построения усредненных интервалов окупаемости ГТУ определялось как среднее арифметическое между критическим и минимальным сроком окупаемости конкретно рассматриваемой ГТУ по мощности. Стоит отметить, что период окупаемости любого оборудования, в том числе и ГТУ, является случайной величиной, которая зависит от множества различных факторов, учет которых полностью в расчетах невозможен. Полученные усредненные интервалы окупаемости ГТУ, представленные на рис. 3, показывают диапазоны наиболее возможных периодов окупаемости ГТУ по мощности и носят оценочный характер. Построенная диаграмма усредненных интервалов окупаемости может использоваться при проведении упрощенных оценок возможности использования ГТУ на промышленном предприятии в качестве собственного источника электрической энергии.

Литература

1. **Министерство** энергетики Российской Федерации. Основные характеристики российской электроэнергетики: отчет АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/532/ (дата обращения: 08.08.2020).
2. **Системный** оператор единой энергетической системы. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf. (дата обращения: 08.08.2020).
3. **Gambini M., Vellini M.** High Efficiency Cogeneration: Electricity from cogeneration in CHP plants [Электронный ресурс]. URL:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.117/ (дата обращения: 09.08.2020).
4. **Navarro J.P.J., Quoilin S., Zucker A.** The joint effect of centralized cogeneration plants and thermal storage on the efficiency and cost of the power system [Электронный ресурс]. URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218302536/ (дата обращения: 09.08.2020).
5. **Enescu A., Diaconu E.** Cogeneration plant on biomass – case study [Электронный ресурс]. URL:https://www.researchgate.net/publication/32886 (дата обращения: 09.08.2020).
6. **Оценка** стоимости строительства и эксплуатации электростанций. Сравнение стоимости строительства и эксплуатации генерирующего оборудования в России с международным рынком. [Электронный ресурс]. URL:https://docviewer.yandex.ru/view/prilozhenie-1-razdel-4.pdf/ (дата обращения: 08.08.2020).
7. **Газотурбинные** электростанции. Газотурбинные установки для энергетики: каталог продукции [Электронный ресурс]. URL: http://www.avid.ru/energy/engines/ (дата обращения: 10.08.2020).

8. **Siemens** gas piston power plants: product catalog [Электронный ресурс]. URL:https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-engines.html/ (дата обращения: 10.08.2020).
9. **Барановский В.В., Короткова Т.Ю.** Технико-экономическое обоснование создания тепловых электрических станций: учебное пособие. СПб. ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. Часть 1. 29 с.
10. **Исследовательская** компания Abercade. Аналитика. Энергетика. Рынок газопоршневых и двухтопливных установок в России [Электронный ресурс]. URL: http://www.abercade.ru/ (дата обращения: 08.08.2020).

Д.А. Аверьянов, averianov_98@mail.ru,
М.В. Бурмейстер, max.burmeyster@gmail.com,
Р.В. Булатов, bulatov_rv@inbox.ru,
С.В. Ильин, lovaskirptr@yandex.ru
НИУ «МЭИ», Москва

ВЛИЯНИЕ МОБИЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА УСЛОВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ

В марте 2014 г. в Крыму остро встал вопрос с обеспечением надежности электроснабжения потребителей. В часы утреннего максимума потребление достигало 1100 МВт, а в вечерний пик — 900 МВт. Максимальная же мощность собственной генерации без учета возобновляемых источников энергии равнялась 182 МВт. Крымская энергосистема была дефицитной и остро нуждалась в увеличении мощности собственной генерации. В связи со сложившейся ситуацией в 2014 г. были установлены 13 мобильных газотурбинных станции (МГТЭС).

На данный момент на территории Крыма работает 19 МГТЭС, которые в основном состоят из 3—6 блоков по 22,5 МВт каждый; среди них «Симферопольская» (6 МГТЭС), «Севастопольская» (6 МГТЭС) и «Западно-Крымская» (6 МГТЭС). Присутствие в энергосистеме значительной доли МГТЭС вносит свои коррективы и особенности в режим работы крымской энергосистемы.

В рамках исследования рассматривались две энергосистемы, которые имеют межсистемную связь: энергосистема Республики Крым и энергосистема МЭС Юга. Обе системы имеют достаточно сложную и разветвленную сеть 110 кВ.

В рамках исследования линиями напряжением 110 кВ и ниже было решено пренебречь, так как их рассмотрение не оказывало существенного влияния на результат. В расчетной модели они учитывались нагрузкой на шинах низшего напряжения ПС 220 и 330 кВ, от которых они шли. В

рассмотрении остались только те линии 110 кВ, через которые осуществляется выдача мощности электростанций.

Ввиду отсутствия точных данных по нагрузкам обеих электрических сетей принималось, что нагрузка подстанций равна 0,6 общей номинальной мощности автотрансформаторов и трансформаторов, установленных на данной подстанции, в соответствии с [1].

Энергосистема Крыма вошла в рассмотренную модель целиком в соответствии с описанными ранее допущениями (рис. 1). Связи энергосистемы Украины с энергосистемой Крыма не рассматриваются, так как в 2015 г. линии, идущие от крымской энергосистемы к украинским подстанциям Каховская и Мелитополь, были разорваны. Также в модели присутствовали все новые крымские электростанции, введенные в эксплуатацию в 2019 г.: Алуштинская ТЭС и Белогорская ТЭС.

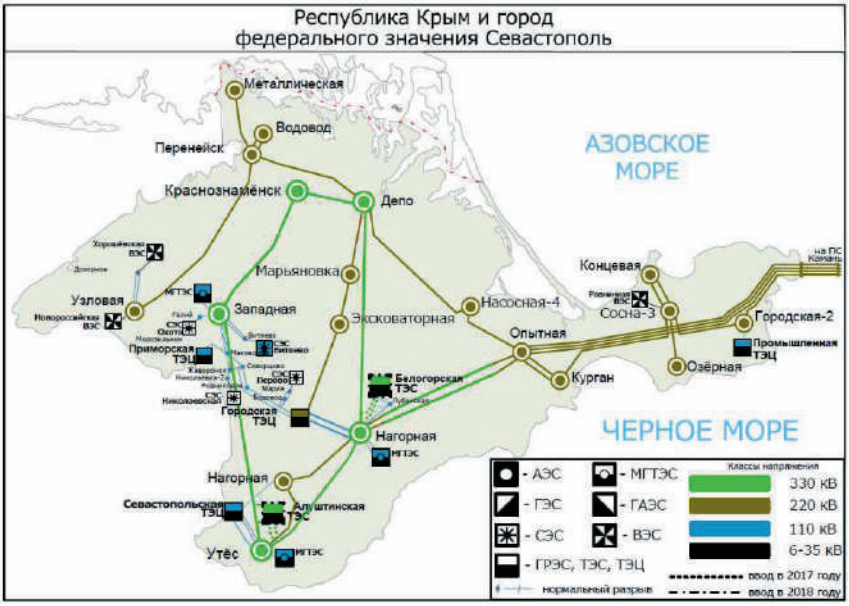


Рис. 1. Рассмотренная модель энергосистемы Республики Крым

Электрическая сеть, входящая в эксплуатационную зону ответственности МЭС Юга, была представлена в модели лишь частью сети, прилегающей к кольцу 500 кВ ПС Тамань — ПС Ростовская — Ростовская АЭС — ПС Тихорецк — Ставропольская ГРЭС — ПС Центральная (рис. 2). За шину бесконечной мощности (ШБМ) принимается Волжская ГЭС, при этом ПС Южная, ПС Фроловская и ПС Волга в модели отсутствуют.

Все генераторы моделировались сверхпереходной моделью, так как в случае задания генератора такой моделью демпфирование колебаний происходит быстрее. Сверхпереходная модель отличается от других тем, что учитывает демпферные контура. Учитывая, что в данной работе не рассматривается настройка систем возбуждения и системных стабилизаторов генераторов, генераторы должны максимально эффективно демпфировать колебания для предотвращения потери устойчивости системы при нормативных возмущениях.

Для создания модели была использована информация из [2−4] и карты-схемы сетей Черноморского РДУ и ОЭС Юга, находящиеся в открытом доступе [2—5]. Более подробно описание модели и ее отдельных элементов приведено в [6]. Все расчеты проводились в программно-вычислительном комплексе ETAP [7].

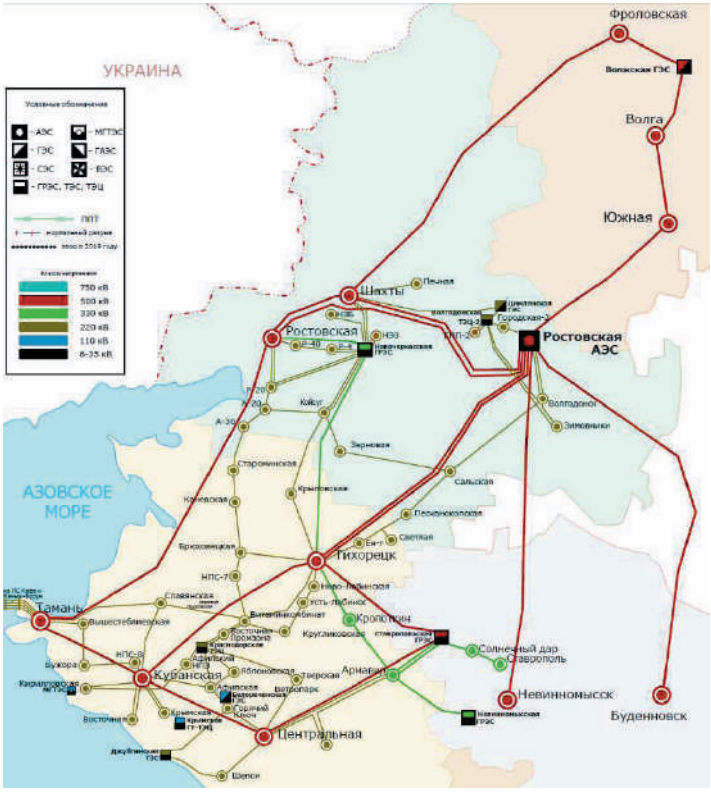


Рис. 2. Рассмотренная модель энергосистемы Кубанского ПМЭС

В рамках данного исследования были рассмотрены два варианта энергосистемы Крыма:

1) энергосистема Крыма без МГТЭС. Вместо них рассматривались ТЭС аналогичной мощности с меньшим числом блоков большей единичной мощности.

2) существующая в настоящий момент энергосистема Крыма.

В данном исследовании во всех рассматриваемых режимах работы энергосистемы Крыма МГТЭС работали на номинальной мощности. Для проведения расчетов динамической устойчивости были найдены узлы энергообъединения, в которых возмущения приводят к наиболее тяжелым электромеханическим переходным процессам. При определении данных узлов наиболее чувствительными узлами считались те, для которых максимально допустимая выдержка времени двухфазного короткого замыкания (КЗ) на землю была наименьшей. В результате проведенных расчетов были определены наиболее уязвимые узлы энергообъединения: шины 500 кВ ПС «Тамань» и 500 кВ ПС «Тихорецк».

Для оценки влияния МГТЭС на условия динамической устойчивости энергообъединения было рассчитано предельное время выдержки двухфазного короткого замыкания на землю ($K^{(1.1)}$) в соответствии с [8] для описанных выше режимов в рассматриваемых узлах сети.

Результаты расчетов динамической устойчивости представлены в таблице для первого и второго варианта модели соответственно.

Таблица

Время выдержки КЗ в различных моделях сети

Вариант модели	Место возникновения КЗ	Предельное время отключения $K^{(1.1)}$
1	ПС «Тамань» 500 кВ	0,280
	ПС «Тихорецк» 500 кВ	0,215
2	ПС «Тамань» 500 кВ	0,255
	ПС «Тихорецк» 500 кВ	0,190

Как показало проведенное исследование, наличие большой доли МГТЭС в энергосистеме ухудшает условия динамической устойчивости энергообъединения. Предельное время отключения $K^{(1.1)}$ в модели, включающей в себя МГТЭС, снизилось на 9—12 % в зависимости от рассмотренного места возникновения КЗ. Ухудшение условий динамической устойчивости происходит из-за того, что МГТЭС состоят из большого количества блоков малой мощности, при этом газотурбинная установка имеет меньший момент инерции, нежели турбина на тепловых ТЭС в блоках аналогичной мощности.

Литература

1. **Приказ** Министерства энергетики Российской Федерации от 8 февраля 2019 г. № 81 «Об утверждении требований к перегрузочной способности автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее поддержанию и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. №229».
2. **Справочник** по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. 320 с.
3. **Схема** и программа развития электроэнергетики Республики Крым на 2019—2023 гг.
4. **Распоряжение** губернатора Ростовской области от 30.04.2020 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Ростовской области на 2020—2024 годы».
5. https://www.c-o-k.ru/articles/xiii-mezhdunarodnayanauchnoprak ticheskaya-konferenciya-vozobnovlyaemaya-i-malaya-energetika-2016. (24.06.2020)
6. **Кузнецов О.Н., Аверьянов Д.А., Бурмейстер М.В.** Исследование влияния пропускной способности межсистемной связи на устойчивость энергообъединения // Международный научно-исследовательский журнал, 2020. № 8 (98) ч.1. С. 29—40.
7. **ETAP 19.0.** User Guide. Operation Technology, Inc. Registered to ISO 9001:2015, certification No. 10002889 QM 15, February 2019.
8. **Методические** указания по устойчивости параллельно работающих энергосистем стран СНГ, Балтии и Грузии.

А.А. Ковалев, kovalev_ana@mail.ru,
В.А. Панченко, pancheska@mail.ru, Российский университет транспорта; ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва

КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Отрицательное воздействие сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду связано не только с возрастающим потреблением природных ресурсов, но и, в большей степени, с образованием жидких и твердых отходов предприятий сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности. В частности, выращивание животных, переработка мясомолочной продукции, производство пива, сахара, крахмала сопровождаются образованием большого количества сточных вод [1, 2].

Быстрое расходование запасов природного топлива, ограничение строительства гидро- и атомных электростанций вызвали интерес к применению возобновляемых источников энергии, в том числе огромных масс

органических отходов, образующихся в сельском хозяйстве, промышленности, городском коммунальном хозяйстве. В связи с этим использование методов биологической конверсии органических отходов с получением биогаза и высококачественных органических удобрений при одновременном решении ряда вопросов охраны окружающей среды от загрязнения является весьма перспективным [3].

Согласно стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 февраля 2015 г. № 151-р, в области развития инженерной инфраструктуры предстоит осуществить максимальное использование возможности применения для электроснабжения сельских населенных пунктов нетрадиционных источников энергии, в том числе биогазовых установок (раздел 5 «Приоритетные направления государственной политики в области устойчивого развития сельских территорий на период до 2030 года», пункт 3 «Повышение качества жизни сельского населения»).

Несмотря на многолетнее применение биогазовых установок и еще более длительный период исследований протекающих в них процессов, представления об основных его закономерностях и механизмах отдельных стадий недостаточны, что определяет в ряде случаев низкую эффективность работы биогазовых установок, не позволяет в необходимой степени управлять их работой, приводит к неоправданному завышению строительных объемов, увеличению эксплуатационных затрат и соответственно стоимости 1 м^3 получаемого биогаза. Это выдвигает задачи по разработке наиболее эффективных технологических схем биогазовых установок, состава их оборудования, созданию новых конструкций и расчета их параметров, повышения надежности их работы, снижения стоимости и сроков строительства, что является одной из актуальных проблем при решении вопроса энергообеспечения объектов сельскохозяйственного производства [4].

Использование биогазовых технологий особенно актуально для России, где проблема утилизации органических отходов с каждым годом лишь возрастает [5].

Известно, что основные затраты энергии для нужд биогазовой установки — расход тепловой низкопотенциальной энергии для поддержания теплового режима биогазовой установки. Современные теплоизоляционные материалы снижают эти издержки. Сегодня на первое место выходят затраты тепла на нагрев суточной дозы загрузки до нужной температуры процесса брожения. Расчетные выработка биогаза и потребление его на собственные нужды биогазовой установки с рабочим объемом 60 м^3, работающей в термофильном режиме, показаны на рис. 1. Выбранная биогазовая установка в Московской области имеет теплоизоляцию из минеральной ваты толщиной 300 мм; суточная доза загрузки составляет 10 % рабочего объема метантенка и равна 6 м^3 навоза крупного рогатого скота (КРС) с влажностью 92 % [6].

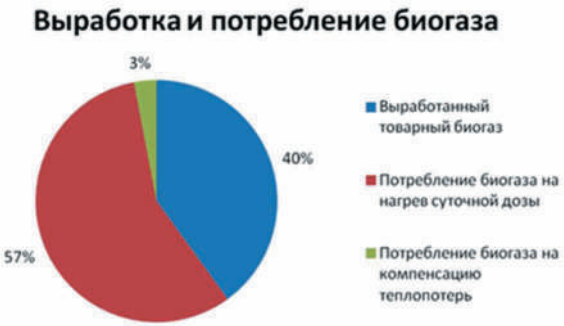


Рис. 1. Структура выработки и потребления биогаза

Как видно из рис. 1, основные затраты энергии в биогазовой установке идут на нагрев суточной дозы загрузки, и только до 40 % образующегося биогаза может быть использовано для других целей [6].

При этом в [7] показано, что использование блочно-модульной конструкции биогазовых установок с применением рекуперации теплоты эффлюента с помощью компрессионного теплового насоса способно значительно повысить энергетическую эффективность их использования в сельском хозяйстве.

Электроснабжение самой биогазовой установки целесообразно с помощью преобразователей возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из которых наиболее перспективными и быстро развивающимися на сегодня являются фотоэлектрические и теплофотоэлектрические преобразователи солнечного излучения [8].

Привод компрессора теплового насоса осуществляется от вала отбора мощности когенерационной установки. Рабочее тело теплового насоса в виде легкокипящего фреона обеспечивает охлаждение фотоэлектрических преобразователей солнечных модулей, что увеличивает их электрическую эффективность [9, 10]. Отобранное тепло позволяет заменить часть или полностью все необходимое теплоснабжение биогазовой установки, что обеспечивает энергетическую эффективность биогазовой установки и уменьшает срок ее окупаемости. Также вопрос автономного энергоснабжения биогазовых установок актуален при удаленности от централизованных сетей энергоснабжения.

В качестве строительного и энергогенерирующего материала при строительстве зданий для сельского хозяйства целесообразно использование кровельных панелей, позволяющих наряду с электроэнергией вырабатывать и тепловую энергию (рис. 2).

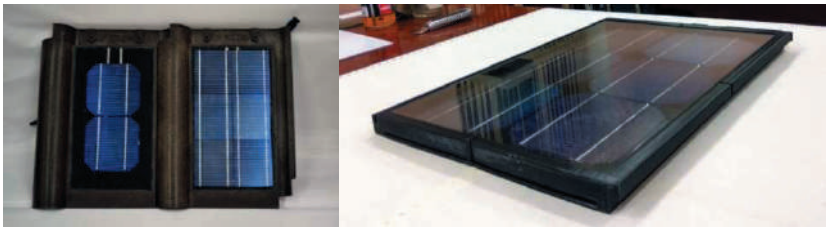


Рис. 2. Кровельные панели фотоэлектрического и теплофотоэлектрического принципа работы

Основные параметры планарной теплофотоэлектрической кровельной панели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры планарной теплофотоэлектрической кровельной панели

Параметр, единица измерения	Значение
Длина кровельной панели, мм	434
Ширина кровельной панели, мм	312
Толщина кровельной панели, мм	26
Масса кровельной панели, кг	2,5
Срок номинальной мощности, лет	40 – 50
Ток в рабочей точке, А	4,6 (5,8)
Напряжение в рабочей точке, В	2,5 (3,4)
Мощность, Вт	11 (20)
КПД фотопреобразования, %	13 (20)
Материал основы-подложки	Пластик (вторичный пластик)
Теплоноситель	Вода (воздух, фреон)

Корпуса кровельных панелей изготавливаются из вторичного пластика [11, 12], а фотоэлектрические преобразователи герметизируются с помощью полисилоксанового компаунда, который увеличивает их срок номинальной мощности [13].

В районах, где прямая составляющая солнечного излучения преобладает, целесообразно применение концентраторных теплофотоэлектрических модулей [14], в конструкции которых используются концентраторы параболоидного типа с профилем концентратора, обеспечивающим равномерную освещенность фотоэлектрических преобразователей, находящихся в его фокусе [15]. В качестве фотоэлектрических преобразователей в подобных концентрирующих системах экономически выгодно использовать матричные высоковольтные кремниевые фотоэлектрические преобразователи, которые увеличивают свою электрическую эффективность в концентрированном солнечном потоке и не теряют ее при значительном нагреве [16] (рис. 3).

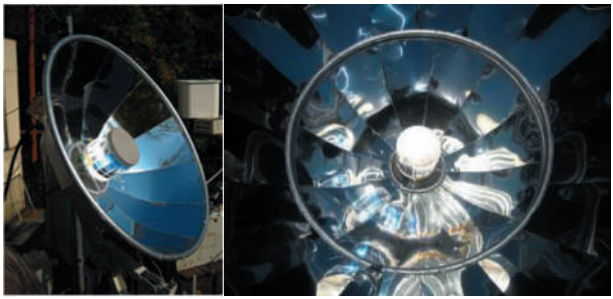


Рис. 3. Концентраторный солнечный теплофотоэлектрический модуль

Основные параметры концентраторного солнечного теплофотоэлектрического модуля представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры концентраторного теплофотоэлектрического модуля

Параметр, единица измерения	Название, значение
Тип концентратора солнечного излучения	Параболоидный
Электрическая мощность (при E = 820 Вт/м^2), Вт	18,5
Напряжение холостого хода, В	15,4
Номинальное напряжение постоянного тока, В	12
Средняя концентрация солнечного излучения на фотоэлектрической части фотоприемника, крат	7,1
Средняя концентрация солнечного излучения на тепловой части фотоприемника, крат	23
Тип фотоэлектрических преобразователей	Матричные
Теплоноситель	Вода (фреон)
Площадь миделя концентратора для фотоэлектрической части фотоприемника, м^2	0,28
Площадь миделя концентратора для тепловой части фотоприемника, м^2	0,5
Габаритные размеры составного концентратора, м	0,54 × 1,05 × 1,05
Масса модуля, кг	2,5

В районах, где солнечная радиациях непостоянна или уровень ее невысок, для энергоснабжения теплового насоса биогазовой установки и самой установки наряду с преобразователями солнечной энергии целесообразно применение преобразователей других видов возобновляемой энергии для обеспечения бесперебойного энергоснабжения. Таким образом, для получения максимального количества и качества энергоносителей, получаемых от ВИЭ, необходимо внедрять их совместное использование.

На рисунке 4 приведена блок-схема совместного использования преобразователей ВИЭ с указанием потоков энергии.

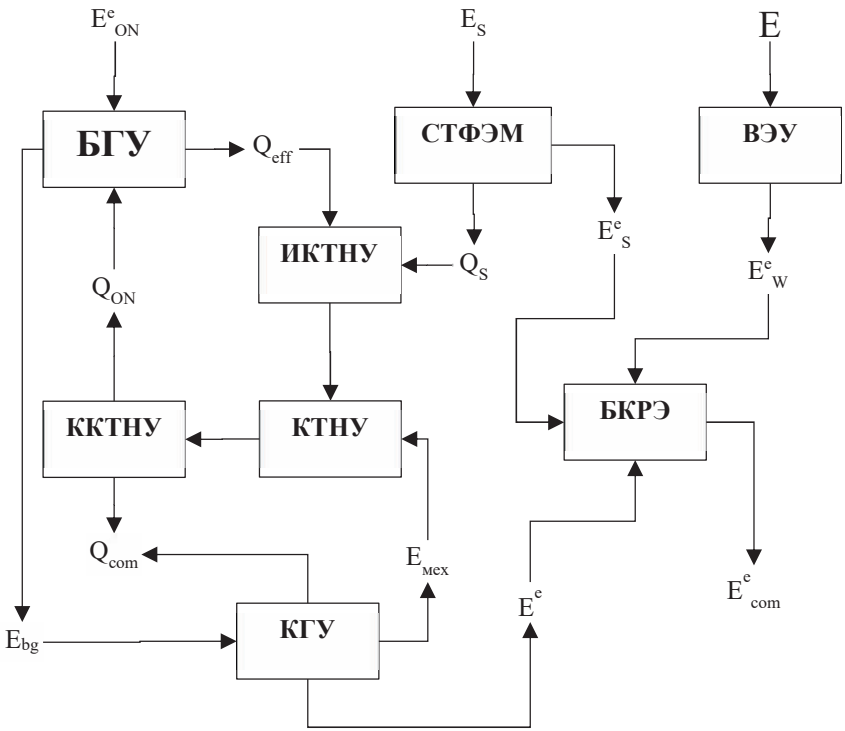


Рис. 4. Блок-схема совместного использования ВИЭ: БГУ — биогазовая установка; СТФЭМ — солнечные теплофотоэлектрические модули; ВЭУ — ветроэнергетическая установка; ИКТНУ — испаритель компрессионного теплового насоса; КТНУ — компрессор теплового насоса; ККТНУ — конденсатор компрессионного теплового насоса; БКРЭ — блок контроля и распределения электроэнергии; КГУ — когенерационная установка

В рассматриваемой схеме: E^e_{ON} — электроэнергия на собственные нужды биогазовой установки; E_S – энергия инсоляции; E_W — энергия ветра; Q_{eff} — теплота, удаляемая с эффлюентом; Q_{ON} — теплота, затрачиваемая на собственные нужды биогазовой установки; Q_S — теплота, получаемая от СТФЭМ; E^e_S — электроэнергия, выработанная на СТФЭМ; E^e_W — электроэнергия, выработанная на ВЭУ; E^e — электроэнергия, выработанная на КГУ при утилизации биогаза; E^e_{com} — товарная электроэнергия; $E_{мех}$ — механическая энергия, затраченная на привод КТНУ; Q_{com} — товарная тепловая энергия.

Таким образом, комбинированное использование ВИЭ позволяет получить товарную энергию в виде как теплоты, так и электроэнергии, при этом

колебания генерации электроэнергии при отсутствии энергии инсоляции или ветра будут компенсироваться за счет выработки электроэнергии на КГУ, работающей на биогазе.

Исследования проводились в рамках финансирования работ по Гранту «Молодой преподаватель МИИТа» на 2016—2019 гг. и Советом по грантам Президента Российской Федерации в форме Стипендии Президента Российской Федерации СП-4051.2018.1 на 2018—2020 г. для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, направление модернизации: «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива», тема научного исследования: «Разработка и исследование солнечных теплофотоэлектрических модулей планарной и концентраторной конструкции для стационарной и мобильной энергогенерации».

Литература

1. **Adsorption-Oxidation** Technology of Wastewater Recycling in Agroindustrial Complex Enterprises / A.Yu. Izmaylov, Ya.P. Lobachevskiy, A.V. Fedotov et al. // Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin. 2018. № 28(2): 207–221. https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.207-221
2. **Effective** purification of concentrated organic wastewater from agro-industrial enterprises, problems and methods of solution / A.V. Artamonov, A.Yu. Izmailov, Yu.A. Kozhevnikov et al. // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2018. No 49: 49—53.
3. **Биотехнология** и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов / А.Н. Ножевникова и др. М.: Университетская книга, 2016. 320 с.
4. **Ковалев А.А.** Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм. Диссертация … доктора технических наук: 05.14.08 / Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. Москва, 1998.
5. **Current** status and potential of bioenergy in the Russian Federation / Z.B. Namsaraev, P.M. Gotovtsev, A.V. Komova, R.G. Vasilov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018a. Vol. 81. P. 625—634.
6. **Ковалев А.А.** Повышение энергетической эффективности биогазовых установок. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. Москва, 2014.
7. **Ковалев А.А., Ковалев Д.А., Харченко В.В.** Система теплоснабжения биогазовой установки блочно-модульной конструкции с использованием рекуперации теплоты эффлюента для фермы на 400 голов КРС // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 5. С. 61.
8. **Панченко В.А.** Солнечные модули различной конструкции агроинженерного центра ВИМ // Наноструктурированные материалы и преобразовательные

устройства для солнечной энергетики: сборник трудов V Всероссийской научной конференции 27—28 октября 2017 г., Чебоксары. С. 116—121.
9. **Панченко В.А.** Моделирование теплофотоэлектрической кровельной панели для энергоснабжения объектов // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 13(65). С. 143—158.
10. **Панченко В.А., Чирский С.П.** Разработка и исследование солнечных теплофотоэлектрических модулей в системах автоматизированного проектирования и конечно-элементного анализа // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 14(66). С. 57—72.
11. **Панченко В.А.** Планарные фотоэлектрические кровельные панели в виде черепицы // Федоровские чтения — 2019: XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 288—294.
12. **Илларионова Л.А., Панченко В.А.** Интегрирование преобразователей солнечной энергии в кровельно-фасадные материалы здания // Федоровские чтения — 2018: XLVIII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 14—16 ноября 2018 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 362–369.
13. **Стребков Д.С., Персиц И.С., Панченко В.А.** Солнечные модули с увеличенным сроком службы // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 3(8). С. 154—158.
14. **Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А.** Солнечный теплофотоэлектрический модуль с параболическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 1—2 (118). С. 35—39.
15. **Синицын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А.** Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям // Геометрия и графика. 2019. Т. 7. № 3. С. 15—27.
16. **Стребков Д.С., Поляков В.И., Панченко В.А.** Исследование высоковольтных солнечных кремниевых модулей // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 6–2 (128). С. 36—42.

В.В. Зиновьев, vi777vz@gmail.com,
О.А. Бартенев, boa2@udsu.ru,
ФГБОУ ВО «УдГУ», г. Ижевск

МОДЕЛЬНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ W-ФУНКЦИИ ЛАМБЕРТА ДЛЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Эффективность работы солнечных фотоэлектрических электростанций во многом определяется их первичными источниками энергии — солнечными фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП). Диагностика и контроль ФЭП является основой прогнозирования работы таких станций.

Теоретический анализ и моделирование вольт-амперных характеристик (ВАХ) основывается на решении трансцендентного уравнения ФЭП, связывающего, согласно эквивалентной электрической схеме, выходные ток и напряжение, ток фотогенерации, параметры диода Шокли, его внутренние сопротивления. На практике часто используется однодиодная эквивалентная электрическая схема замещения ФЭП [1]. Изучаются также двухдиодные модели ФЭП, где оба диода включены в прямом смещении [2]. Второй диод вводится с целью уточнения прямой ветви ВАХ солнечного элемента при учете рекомбинационного механизма генерации токов носителей заряда.

Но обе эти модели в области обратной ветви ВАХ солнечных ФЭП не отражают экспериментально наблюдаемый нелинейный и достаточно резкий рост тока при отрицательных напряжениях. Его объясняют дополнительными механизмами генерации тока и дефектами структуры ФЭП. В общем случае следует учитывать и особый эффект обратной ветви ВАХ, а именно резкое возрастание тока и лавинный электрический пробой при определенных отрицательных напряжениях на диоде [3]. Как показала практика, данное явление существенно сказывается при частичных затенениях преобразователей (неоднородное солнечное освещение) в цепях последовательного соединения солнечных преобразователей используемых в технологиях солнечных электростанций. Возникает существенный тепловой перегрев затененных элементов ФЭП при воздействии на них отрицательных напряжений, в ряде случаев приводящий к их повреждениям типа «hot-spots», что снижает эффективность работы ФЭП [4, 5].

Цель данной работы — выработка единого подхода на основе использования W-функции Ламберта к описанию и анализу полной ветви (прямой и обратной) вольт-амперной характеристики, соответствующему экспериментальным измерениям электрических цепей с солнечными преобразователями.

Теоретическая часть. Традиционная запись уравнения ФЭП с учетом составляющей лавинного размножения носителей заряда при отрицательных напряжениях на ФЭП представлена в работе [6]:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{о.н}} \times$$
$$\times\left(\exp\left(\frac{U_{\text{н}} + I_{\text{н}} R_{\text{п}}}{A\, U_{\text{т}}} \right) - 1 \right) - \frac{U_{\text{н}} + I_{\text{н}} R_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}} - \alpha \frac{U_{\text{н}} + I_{\text{н}} R_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}} \left(1 - \frac{U_{\text{н}} + I_{\text{н}} R_{\text{п}}}{U_{\text{пр}}} \right)^{-m}, \quad (1)$$

где $I_{\text{н}}$ — ток нагрузки, А; $U_{\text{н}}$ — напряжение нагрузки, В; $I_{\text{ф}}$ — фототок (ток за счет фотогальванического эффекта), А; $I_{\text{о.н}}$ — обратный ток насыщения, А; A — фактор идеальности p-n-перехода ($A = 1\ldots5$); $R_{\text{п}}$ — последовательное сопротивление, Ом; $R_{\text{ш}}$ — параллельное (шунтовое) сопротивление,

Ом; m — численный показатель степени в составляющей формулы, описывающей лавинный пробой; $U_{пр}$ — напряжение лавинного пробоя, В; α — доля омического тока, участвующего в лавинном пробое; $U_т$ — термическое напряжение.

В [1] использовался методический подход преобразования трансцендентного уравнения ФЭП (без члена лавинного пробоя) в аналитическое уравнение, содержащее W-функцию Ламберта, что позволяло получать точные решения для вычисления ВАХ и проводить соответствующий анализ. Однако использованное степенное выражение для лавинного пробоя в формуле (1) не позволяет применить этот подход в области отрицательных напряжений, при которых, собственно, и возникает лавинный пробой. Для решения этой проблемы степенной член лавинного пробоя нами был заменен выражением в форме диода Шокли, также имеющим область резкого возрастания тока при определенном напряжении. С учетом замены эквивалентная схема солнечного элемента примет вид, представленный на рис. 1.

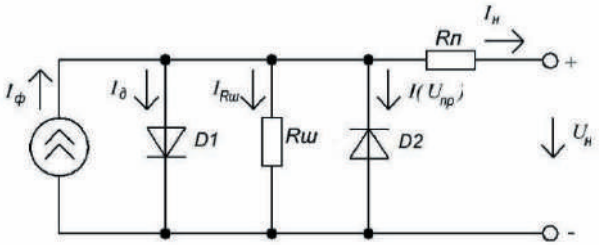


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента с учетом эффекта лавинного пробоя

Уравнение $I_н = f(U_н)$ для построения прямой ветви ВАХ солнечного элемента с использованием W-функции Ламберта для положительных напряжений выглядит следующим образом [1]:

$$I_н = \frac{A\,U_т}{R_п} W\left(I_{о.н} \frac{R_п}{A U_т r_1} \exp\left(\frac{U_н + R_п\left(I_ф + I_{о.н}\right)}{A U_т r_1} \right) \right) + \frac{I_ф + I_{о.н} - \dfrac{U_н}{R_ш}}{r_1}, \quad (2)$$

где $r_1 = 1 + \dfrac{R_н}{R_ш}$; $U_т = \dfrac{kT}{e}$ — термическое напряжение.

Для построения полной зависимости ВАХ $I_н = f(U_н)$ солнечного элемента с использованием W-функции Ламберта необходимо, в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1), добавить в уравнение (2) выражение,

которое отвечает за обратную ветвь ВАХ. Применяя принцип сложения токов для эквивалентной схемы ФЭП (рис. 1) и используя методику введения преобразования W-функции Ламберта, можно записать уравнение, описывающее полную вольтамперную характеристику ФЭП $I_н = f(U_н)$ в виде

$$I_н = \frac{A\,U_т}{R_п} W\left(I_{о.н}\,\frac{R_п}{A U_т\, r_1} \exp\left(\frac{U_н + R_п\left(I_ф + I_{о.н}\right)}{A U_т\, r_1} \right) \right) + \\ + \frac{I_ф + I_{о.н} - \dfrac{U_н}{R_ш}}{r_1} + \frac{A_2 U_т}{R_п} W\left(I_{о.н2}\,\frac{R_п}{A_2\, U_т\, r_1} \exp\left(\frac{-U_н + R_п\, I_{о.н2}}{A_2\, U_т\, r_1} \right) \right) - \\ - \frac{I_{о.н2} - \dfrac{U_н}{R_ш}}{r_1}. \qquad (3)$$

Здесь вводятся новая W-функция преобразования и два новых модельных параметра $I_{о.н.2}$ и A_2, характеризующие резкое возрастание тока при некотором отрицательном напряжении. Выбор этих значений определяет данное критическое значение напряжения (в частности, лавинный пробой).

Введенный новый обратно включенный диод $D2$ с измененными значениями тока насыщения $I_{о.н.2}$ и эффективным термическим напряжением $U_т^* = A_2 U_т$ в данном случае формально может описывать резкое размножение носителей заряда при достижении некоторого критического локального ускоряющего поля. Физически два диода в приведенной эквивалентной схеме описывают разные процессы; первый характеризует дрейфовый перенос через *p-n*-переход неосновных носителей заряда ускоряющим полем в процессе их фотогенерации, а второй отражает ударное размножение носителей, что соответствует напряжению резкого возрастания тока в форме экспоненты, т.е., например, напряжению электрического пробоя $U_{пр}$ в солнечных ФЭП с неидеальными *p-n*-переходами. Необходимо отметить, что до настоящего времени нет обобщенной теории лавинного размножения носителей заряда в неидеальных *p-n*-переходах ввиду действия различных механизмов, и фактически ранее представленный степенной член в формуле (1) — это эмпирическое выражение, часто используемое в научной литературе, в том числе и при изучении вольт-амперных характеристик солнечных преобразователей.

Введение второго диода в эквивалентной схеме ФЭП позволяет применить методику использования W-функции для анализа вольт-амперной

характеристики как прямой, так и обратной ее ветви, т.е. для положительных и отрицательных напряжений.

Математическая модель полной вольт-амперной характеристики с W-функциями Ламберта реализована на языке Python. Для выполнения вычислений и визуализации результатов используется облачный сервис Azure Notebooks компании Microsoft, предоставляющий готовое окружение для работы с языком программирования Python, доступное через веб-браузер.

Экспериментальная часть. Эксперименты и моделирование ВАХ были выполнены на солнечных кремниевых поликристаллических элементах 156x156 мм, марки TNP5-156 китайского производства, электрические и модельные параметры которых представлены в табл. 1.

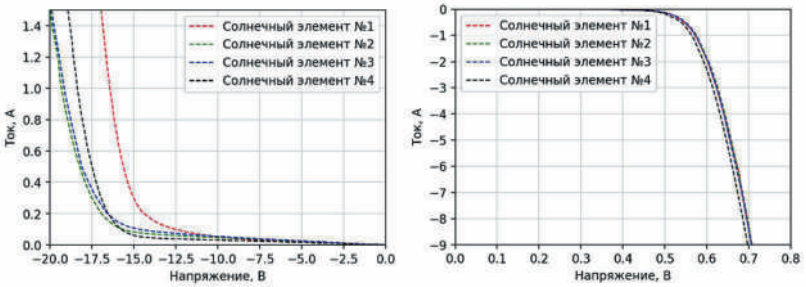
Таблица 1

Экспериментальные электрические и модельные параметры солнечного элемента

Элемент	Значение
A	1,47
$I_{о.н}$	$3{,}956 \cdot 10^{-7}$ А
$R_{ш}$	550,0 Ом
$R_{п}$	0,0064 Ом
A_2	39,5
$I_{о.н.2}$	$9{,}9 \cdot 10^{-9}$ А
T	298,0 °С
$I_{кз}$	8,21 А
$U_{хх}$	0,636 В

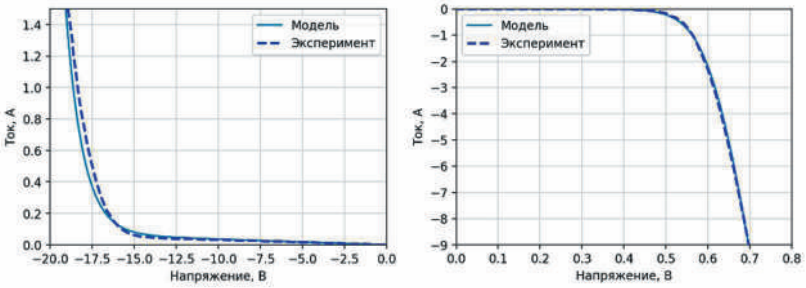
В наших работах [6–8] приведены экспериментальные исследования и рассмотрен цифровой измерительный блок автоматизированной системы записи кривой ВАХ для прямой и обратной ветвей солнечных фотопреобразователей.

Анализ результатов. На рисунке 2 показаны экспериментально снятые темновые ВАХ четырех поликристаллических солнечных элементов. Как видно из рис. 2, *а*, точки начала процесса пробоя обратных ветвей ВАХ солнечных элементов даже из одной партии отличаются на несколько вольт друг от друга, при этом прямые ветви ВАХ (рис. 2, *б*) имеют незначительные отклонения между собой. Это связано с тем, что производители в технологии ориентируются прежде всего на качество (стандартизацию) прямой ветви вольт-амперной характеристики ФЭП.



а) *б*)

Рис. 2. Экспериментальные темновые вольт-амперные характеристики поликристаллических солнечных элементов: *а* — обратная ветвь; *б* — прямая ветвь



а) *б*)

Рис. 3. Темновая вольт-амперная характеристика поликристаллического солнечного элемента № 4: *а* — обратная ветвь; *б* — прямая ветвь

На рисунке 3 показано сравнение экспериментальной и модельной темновых ВАХ поликристаллического солнечного элемента. Полученные экспериментальные и модельные полные вольт-амперные зависимости (в первом и втором квадранте) имеют хорошее совпадение во всем диапазоне напряжений, что свидетельствует о работоспособности предложенной модели. Аппроксимация зависимости $I_н = f(U_н)$ вблизи пробоя солнечного элемента дает значение $U_{пр} = -18$ В. Дальнейшие исследования в области практического использования предложенного модельного представления ФЭП на основе W-функции в расширенном диапазоне напряжений позволят достаточно точно оценить влияние параметров обратной ветви ВАХ на эффективность работы солнечных преобразователей в цепях электрических станций при неоднородном освещении солнечных модулей.

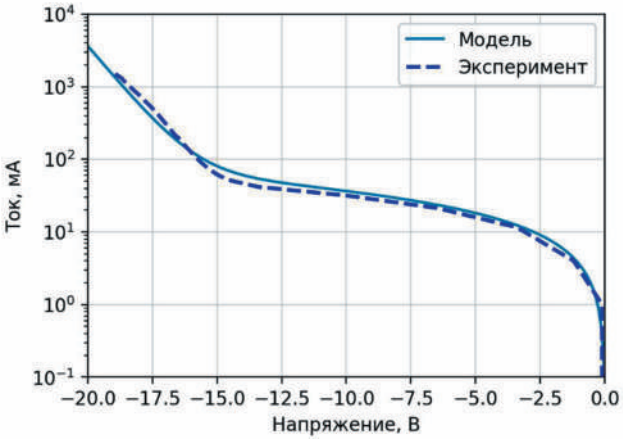
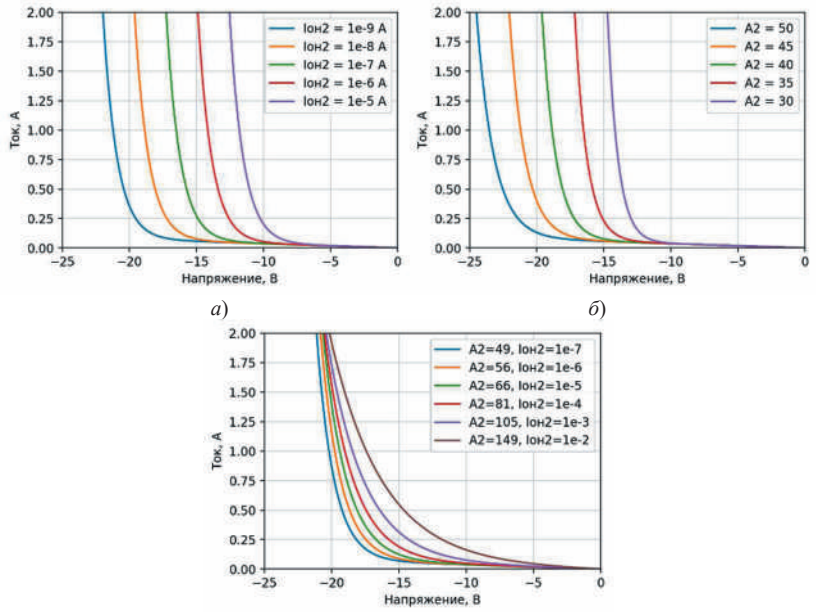


Рис. 4. Обратная ветвь темновой вольт-амперной характеристики солнечного элемента в логарифмическом масштабе оси тока

На рисунке 4 показана обратная ветвь темновой ВАХ солнечного элемента в логарифмическом масштабе оси тока. На графике можно выделить три характерных участка: нелинейный рост тока вблизи малых значений напряжения (от 0 до −4 В), пологий участок с практически линейным ростом тока в диапазоне напряжений от −4 до −15 В и участок пробоя *p-n*-перехода солнечного элемента начиная от −15 В. Нелинейный характер оси тока позволяет увидеть больше деталей обратной ветви ВАХ.

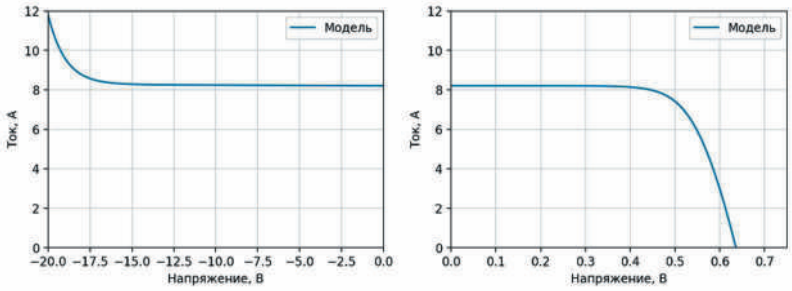
На рисунке 5 показаны серии обратных ветвей темновых ВАХ при изменении различных модельных параметров. Так, при уменьшении параметра $I_{\text{о.н.2}}$ (рис. 5, *а*) увеличивается напряжение пробоя $U_{\text{пр}}$; при увеличении параметра A_2 (рис. 5, *б*) увеличивается кривизна выхода на участок пробоя, а также увеличивается напряжение пробоя. На рис. 5, *в* показаны кривые при различных соотношениях параметров $I_{\text{о.н.2}}$ и A_2. Таким образом, подбирая соотношения $I_{\text{о.н.2}}$ и A_2 можно получать различные формы обратных ветвей ВАХ для согласования с экспериментальными ВАХ зависимостями в области отрицательных напряжений.

В качестве примера световой ВАХ на рис. 6 приведена модельная вольт-амперная характеристика поликристаллического солнечного элемента при энергетическом освещении 1000 Вт/м^2. Модель построена при параметрах, указанных в табл. 1.



а) *б*) *в*)

Рис. 5. Серия обратных ветвей темновых ВАХ: *а* — при изменении $I_{\text{о.н.2}}$ и при A_2 = const; *б* — при изменении A_2 и при $I_{\text{о.н.2}}$ = const; *в* — при изменении обоих параметров



а) *б*)

Рис. 6. Модельная вольт-амперная характеристика поликристаллического СЭ при освещении 1000 Вт/м^2: *а* — обратная ветвь; *б* — прямая ветвь

Заключение

1. Приведена аналитическая форма полной вольт-амперной характеристики двухдиодного фотоэлектрического преобразователя с учетом прямой и обратной ветвей на основе W-функции Ламберта.

2. Использование W-функции Ламберта для анализа вольт-амперной характеристики как прямой, так и обратной ее ветви стало возможным благодаря введению второго диода в эквивалентной схеме замещения фотоэлектрического преобразователя для описания ударного механизма резкого возрастания тока в области отрицательных напряжений.

3. Сравнение экспериментальных и модельных полных вольт-амперных характеристик показало хорошее совпадение во всем диапазоне напряжений, что свидетельствует о работоспособности предложенной модели.

4. Полученную полную модель ВАХ можно использовать при анализе последовательного соединения солнечных элементов, находящихся при неравномерной освещенности, когда определенную роль в электрогенерации играет обратная ветвь ВАХ.

Литература

1. **Зиновьев В.В., Бельтюков А.П., Бартенев О.А.** Математическая модель фотоэлектрического преобразователя с использованием W-функции Ламберта // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2016. № 2 (48). С. 22—30.
2. **Breitenstein O.** Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions // Opto-Electron. Rev. 21. 259—282 (2013).
3. **Bishop J.W.** Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits // Solar Cells 25. 1988. P. 73—89.
4. **Impact** of junction breakdown in multi-crystalline silicon solar cells on hot spot formation and module performance / F. Fertig, S. Rein, M. Schubert, W. Warta // Conference: 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 5–9 September 2011, Hamburg, Germany.
5. **PV output** power enhancement using two mitigation techniques for hot spots and partially shaded solar cells / M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi et al.// Electric Power Systtms Research. 2018. Vol. 158, January. P. 15—25.
6. **Зиновьев В.В., Бартенев О.А.** Диагностика промышленных солнечных модулей в областях прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики при неоднородном освещении // Промышленная энергетика. 2020. № 1. С. 56—62.
7. **Зиновьев В.В., Бартенев О.А., Бельтюков А.П.** Моделирование солнечных преобразователей при неравномерной освещенности // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 58—67.
8. **Зиновьев В.В., Бартенев О.А.** Устройство автоматического снятия вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей // Управление техносферой: Электрон. Журнал. 2019. Т. 2. Вып. 4. URL: https://f-ing.udsu.ru/technosphere

В.В. Шестакова, mrsshestakova@mail.ru, ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

Возобновляемая энергия в отличие от ископаемой считается чистой формой энергии. Чтобы обосновать это утверждение, важно тщательно изучить воздействие на окружающую среду всех видов возобновляемой энергии. В данной работе изучены непредвиденные последствия от первоначального производства до распределения и конечного использования возобновляемых источников энергии на примере солнечной энергии. Актуальность исследования заключается в принципе предупредительной науки — осознавать возможные негативные последствия до того, как будет нанесен какой-либо ущерб, и заранее предотвратить их.

Мертон [1] был первым, кто определил концепцию непреднамеренных последствий. Он утверждал, что люди иногда так стремятся осознать непосредственные выгоды от действия, что не обращают никакого внимания на его долгосрочные последствия. Подобным образом последствия могут быть упущены из виду, когда фундаментальные ценности человека требуют от него стремления к изменениям. В результате непредвиденные последствия действий могут изменить эти исходные значения с течением времени. В книге «Зеленые технологии» [2] содержится статья Оззи Зенера, в которой он описывает отдельные непредвиденные последствия, которые могут частично или полностью компенсировать намеченные экологические выгоды. Зенер описывает непредвиденные последствия как незапланированные результаты, которые происходят из-за человеческой деятельности по внедрению, но происходят в будущем и, возможно, также в другом месте. Следовательно, их может быть трудно идентифицировать или напрямую связать с инициирующим действием. Книга Ульриха Бека «Общество риска» [3] предоставляет ключевой вклад в понимание рисков применения современных технологий. Центральное место в «обществе риска» Бека заключается в том, что преимущества технологии пересматриваются путем изучения ее негативных последствий. Ставится под сомнение необходимость разработки части технологий с учетом неопределенности их безопасности.

Книга Теннера «Почему все уходит назад — технология и месть непреднамеренных последствий» показывает нам, что инженеры иногда распространяют понятие непокорной машины [4]. Он заключил: «Если есть несколько способов выполнить работу, и один из этих способов приведет к катастрофе, тогда кто-то сделает это таким образом». Позже Стэпп назвал это «Законом Мерфи», который он выразил более кратко, как «Если что-то

пойдет не так, это будет». Теннер заявляет, что закон Мерфи — эыто не фаталистический принцип, а призыв к необходимым технологическим усовершенствованиям. Это можно считать практическим напоминанием о необходимости методологий и практик, направленных на то, чтобы избежать непреднамеренных последствий технологий. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата непредвиденные последствия рассматриваются в контексте взаимодействия энергетической и климатической политики [5]. В отчете подчеркиваются перекрывающиеся факторы для развертывания возобновляемых источников энергии, а также призыв к междисциплинарному подходу при изучении непреднамеренных последствий для предотвращения декарбонизации среды.

Известно, что в дополнение к прямому использованию солнечного излучения для целей отопления, солнечная энергия используется либо путем преобразования в электрическую энергию в фотоэлектрических элементах, либо в тепловую энергию (тепло) в воде. В последнем случае термин «концентрированная солнечная энергия» используется, когда солнечное излучение фокусируется перед преобразованием в тепло. Тепло передается воде или другим жидкостям, которые циркулируют по трубам в системах централизованного теплоснабжения или используются для выработки пара, который приводит в движение генераторы для производства электроэнергии. В процессе производства влажной химии в фотоэлектрических элементах для травления солнечных пластин используются токсичные газы с высоким потенциалом глобального потепления, взрывоопасные газы, а также агрессивные жидкости.

Разрабатываются и сухие процессы, в которых выброс загрязненных сточных вод существенно меньше по сравнению с процессом влажной химии. Фотоэлектрические солнечные элементы, содержащие теллурид кадмия (CdTe), представляют особый интерес из-за их высокой токсичности [6]. Кадмий является известным человеческим кардиогеном, и необходимы строгие меры предосторожности, такие как управление жизненным циклом, при котором производители предполагают, что управление продуктом от начала до конца срока службы продукта рекомендуется, если он будет продолжать использоваться в тонкопленочных фотоэлементах [7]. Другие токсичные химические вещества, такие как сульфид кадмия (CdS) и арсенид галлия (GaAs), также используются в производстве фотоэлектрических элементов [8]. Поскольку эти химикаты являются высокотоксичными и стойкими в окружающей среде на протяжении веков, утилизация использованных фотоэлементов может вызвать серьезные проблемы. Потенциальные непреднамеренные последствия утилизации, например, гелиоконцентраторов включают случайное или аварийное выделение токсичных химических веществ, используемых в системе теплообмена [8].

Производство электричества путем сбора солнечной энергии в фотоэлектрических солнечных элементах может, как мы видим, привести к серьезным непредвиденным последствиям. Именно производство PV оказывает наиболее очевидное воздействие на здоровье и окружающую среду. Большой расход воды на промывные пластины между этапами травления создает последующую потребность в очистных сооружениях. Производство также приводит к дополнительным выбросам фторированных соединений, таких как гексафторэтан (C_2F_6), трифторид азота (NF_3) и гексафторид серы (SF_6). Все это чрезвычайно сильные парниковые газы с потенциалом глобального потепления в 9200, 17 200 и 39 800 раз больше, чем у CO_2. Эти выбросы от производства фотоэлектрических систем заслуживают серьезного рассмотрения. Фактически массовое производство новых фотоэлектрических солнечных батарей будет означать огромные глобальные выбросы парниковых газов.

В качестве альтернативы текущему процессу мокрого химического травления, используемому в производстве кристаллических солнечных элементов, разрабатываются процессы с более низким уровнем выбросов парниковых газов на основе сухой плазмы [9]. Некоторые из этих процессов используют очень токсичные и взрывоопасные газы, такие как фтор (F_2), который фактически характеризуется как ядовитый газ. Этот желтый газ является чрезвычайно реактивным и очень сильным едким раздражителем для кожи человека. По данным Научного комитета ЕС по предельным значениям воздействия на рабочем месте (SCOEL), это связано с его высокой реакционной способностью с водородсодержащими соединениями, что может привести к возгоранию и взрыву в результате воздействия газа [10]. Таким образом, велика опасность пожара и взрыва. Выбросов можно избежать только с помощью строгих контрольных мер, которые включают генерацию на месте, изоляцию процесса от воздействия на человека и воздушные скрубберы для удаления фтора из среды.

Существует вероятность того, что выбросы фторидсодержащих соединений с производственных предприятий оказывают влияние на здоровье человека и окружающую среду [11]. Использование мокрых скрубберов является средством предотвращения попадания газов в окружающий воздух во время процесса. Тем не менее, многие химические вещества могут потенциально присутствовать в сбросе воды из скрубберов. Они включают различные продукты реакции между фторсодержащими соединениями и водой. Токсикологические характеристики фторидсодержащих газов, которые характеризуют их токсикологическое и неблагоприятное воздействие на здоровье, были составлены Министерством здравоохранения и социальных служб США, Службой общественного здравоохранения при Агентстве по регистрации токсичных веществ и заболеваний [12]. В дополнение к парниковым газам существует два типа фторсодержащих выбросов, которые

необходимо учитывать. Они также связаны с альтернативными процессами производства PV — это фторид водорода (HF) и фториды кремния (SiF_x).

Фторид водорода при вдыхании является ядовитым для человека. Это разъедающее раздражение для кожи, глаз и слизистых оболочек. Он также обладает тератогенным и репродуктивным эффектами, а также вызывает повреждение скелета. Газообразный фторид водорода (HF) растворяется в воде, где он ионизируется во фторид (F-). Слив воды из мокрых скрубберов, таким образом, является источником выбросов F в почву и подземные воды.

Фторид кремния является наиболее значительной газовой эмиссией из трех газов HF, F_2, SiF_4 и составляет более 90 % общего объема выбросов при сухом травлении PV. В воздухе фторид кремния образуется при взаимодействии фтористого водорода с кремнезитом. Присутствие в воздухе фторида кремния характеризуется как яд, умеренно токсичный при вдыхании. Кроме того, он оказывает разъедающее раздражение для кожи, глаз и слизистых оболочек. В мокрых скрубберах выбросы фторида кремния могут реагировать с водой таким же образом, как он может реагировать с влагой в воздухе с образованием оксида кремния (SiO_2), HF [13] и фторсиликоновой кислоты (H_2SiF_6).

В США и Канаде фторсиликоновая кислота обычно используется при фторировании питьевой воды. Это спровоцировало дебаты по проблемам здоровья. Основой для этого послужил ряд сообщений о взаимосвязи между водой, обработанной фторсиликоновой кислотой, и повышенным уровнем свинца (Pb) в крови детей [14]. Эта связь была объяснена как влиянием, которое не полностью диссоциированные фторсиликаты в питьевой воде оказывают на увеличение клеточного поглощения свинца в организме [14], так и увеличением коррозии Pb-несущих труб фторсиликатами [15]. Тем не менее, научная строгость этих исследований и обоснованность их выводов были поставлены под сомнение Урбански и Шок [13]. Они утверждают, что фторсиликаты гидролизуются до того, как попадают в кран потребителя, и поэтому не влияют на растворимость.

Таким образом, все рассмотренные последствия производства фотоэлектрических солнечных батарей заслуживают серьезного рассмотрения и изучения, поскольку они противоречат распространенной идее о том, что солнечные фотоэлементы являются «зеленой энергетической технологией», с той целью, чтобы предотвратить глобальные выбросы парниковых газов и неблагоприятные последствия для окружающей среды при массовом производстве новых фотоэлектрических солнечных батарей.

Литература

1. **Merton RK.** The unanticipated consequences of purposive social action // Am Sociol Rev. 1936. No 1(6). P. 894—904.
2. **Zehner O**. Unintended consequences of green technologies. In: Robbins Pet al (eds) Green technology. Sage, London, 2011. P. 427—432.
3. **Bronin S**. Building-related renewable energy and the case of 360 State Street // Vand L Rev 65, 2012: 1875.
4. **Tenner E**. Why things bite back: technology and the revenge of unintended consequences. http://www.citeulike.org/group/2050/author/Tenner: E. Accessed 17 September 2013.
5. **IPCC.** Renewable energy sources and climate change mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf. Accessed 17 September 2013.
6. **Zayed J., Philippe S**. Acute oral and inhalation toxicities in rats with cadmium telluride // Int J Toxicol. 2009. 28(4). P. 259—265.
7. **Regulatory** policy governing cadmium-telluride photovoltaics: a case study contrasting life-cycle management with the precautionary principle / P. Sinha, C. Kriegner, W. Schew et al. // Energy. 2008. No 36. P. 381—387.
8. **Pimentel D**. Biofuels, solar and wind as renewable energy systems: benefits and risks. Springer, Dordrecht, 2008.
9. **Economical** and ecological aspects of plasma processing for industrial solar cell fabrication / J. Rentsch, J. Jaus, K. Roth, R. Preu // IEEE Xplore. Digital library. Conference record of the thirty-first IEEE. 2005. P. 931—934.
10. **SCOEL.** Recommendation from scientific committee on occupational exposure limits for fluorine, hydrogen fluoride and inorganic fluorides (not uranium hexafluoride). European Commission, 1998.
11. **Pehnt M**. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies // Renewable Energy. 2006. No 31. P. 55—71.
12. **Urbansky E., Schock M**. Can fluoride affect lead (ii) in potable water? Hexafluorosilicate and fluoride equilibria in aqueous solution // Int J Environ Stu. 2000. No 57. P. 597—637.
13. **Voltaix**. Material safety data sheet for: silicon tetrafluoride (SiF4). Voltaix, LLC Post Office Box 5357, North Branch, New Jersey 08876-5357. http://www.voltaix.com/images/doc/Mssi030_Silicon_Tetrafluoride.pdf. Accessed 28 June 2013.
14. **Masters R., Coplan M**. Water treatment with silico-fluorides and lead toxicity // Int J Environ Sci (China). 1999. No 26. P. 435—449.
15. **Confirmation** of and explanation for elevated blood lead and other disorders in children exposed to water disinfection and fluoridation chemicals / M. Coplan, S. Patch, R. Masters, M. Bachmann // Neurotoxicology. 2007. No 28(5). P. 1032—1042.

А.И. Рудаков, rud-38@mail.ru, Р.Р. Спиридонов, roma-62@bk.ru,
И.Н. Киселев, igorkiselev17@gmail.com, КГЭУ, г. Казань

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ (МАШИН СТИРЛИНГА)

Решение энергетических и экологических задач — одна из важнейших проблем, стоящих перед Российской Федерацией в настоящее время. Сейчас все чаще поднимаются вопросы энергосбережения и энергоэффективности на государственном уровне. Поэтому значительно возрос интерес к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии и устройствам, использующим их. К одному из таких устройств относится двигатель Стирлинга [9].

При значительной «всеядности» двигателей Стирлинга большей энергоэффективностью они обладают при работе на дешевом биогазе. Биогаз, как правило, получают путем сбраживания в метантенках органических отходов растительного и животного происхождения. Отметим, что наряду с получением тепла и электричества путем сжигания биогаза современные технологии направлены на решение проблем экологии.

Расчет двигателя Стирлинга проводится на основе молекулярно-кинетической теории газов (МКТ). Процессы в двигателе протекают с изменением параметров объема, давления и температуры при неизменном количестве рабочего тела в машине. Для предварительного расчета обычно используют теоретические зависимости МКТ и определяют состояния системы для каждого такта двигателя Стирлинга.

Двигатель Стирлинга — тепловая машина внешнего сгорания, в которой жидкое или газообразное рабочее тело перемещается в замкнутом объеме. Принцип работы машины основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения объема рабочего тела. Двигатель может работать не только от сжигания топлива, но и от любого источника тепла (солнца, земли и т.п.) [3].

Принципиальные особенности цикла Стирлинга. Отличительными особенностями цикла Стирлинга являются:

- нестационарные параметры рабочего тела машины, т.е. периодическое изменение его объема;
- работа с газообразным рабочим телом, давление которого существенно превышает атмосферное.

В большинстве обзоров по энергопреобразующей технике двигатель Стирлинга рассматривается как двигатель с наибольшей перспективой. Низкий шум, невысокая токсичность отработанных газов, широкая возможность работы на различных топливах, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, приемлемые характеристики крутящегося момента — все эти

параметры дают возможность машинам Стирлинга в ближайшее время значительно потеснить двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Теоретическая эффективность двигателя Стирлинга равна максимальной эффективности тепловых машин (эффективность цикла Карно). Двигатель Стирлинга содержит некоторый постоянный объем рабочего газа, который перемещается между «холодной» частью (обычно находящейся при температуре окружающей среды) и «горячей» частью, которая обычно нагревается за счет сжигания любого вида топлива или других источников теплоты. Нагрев производится снаружи, поэтому двигатель Стирлинга относят к двигателям внешнего сгорания.

Кафедрой ЭХП Казанского государственного энергетического университета спроектирован и выполнен опытный образец двигателя Стирлинга типа Альфа-Стирлинг (рис. 1). Регенератор соединяет верхние части цилиндров вытеснителя и рабочего поршня. В этом случае рабочий поршень двигателя будет находиться в нижней мертвой точке (НМТ), что обеспечивает достижение максимальной схожести с идеальным циклом Стирлинга; нужно, чтобы мертвый объем над рабочим поршнем стремился к нулю.

Рис. 1. Опытный образец двигателя Стирлинга: *1* — первый рабочий поршень; *2* — второй поршень-вытеснитель; *3* — регенератор; *4* — нагреватель (газовая горелка)

Принцип работы двигателя Стирлинга типа альфа заключается в постоянно чередующихся циклах нагрева и охлаждения газа в закрытых цилиндрах. При нагреве воздух в горячем цилиндре расширяется и двигает рабочий поршень. Этот поршень поворачивает маховик. Одновременно изменяется положение вытеснительного поршня, который перемещается из нагретой зоны в холодную через регенератор. Воздух остывает и создает обратное усилие на рабочий поршень. Вытеснитель затем перемещается воздух в рабочую зону, и весь цикл повторяется.

Механическая работа маховика, в свою очередь, передается на генератор, который вырабатывает электрическую энергию, направляемую потребителю.

Термодинамический расчет двигателей Стирлинга. Классическая термодинамика рассматривает три вида процессов: изохорные, изобарные и адиабатические. В этом случае процессы в двигателе Стирлинга протекают с изменением объема, давления и температуры при постоянном количестве рабочего тела в машине. Для предварительного расчета обычно применяют теоретические зависимости молекулярно-кинетической теории газов (МКТ) и определяют состояния системы для каждого такта двигателя Стирлинга.

Расчет двигателей Стирлинга строится на основе МКТ. Теплоотдача определяется эмпирической формулой

$$Q = k\,t\,S\,dT, \tag{1}$$

где Q — количество тепла; t — время; S — площадь; dT — перепад температур; k — коэффициент теплоотдачи, который для воздуха равен $5{,}6+4V$ [Вт/(м^2·К)]; V — скорость воздуха, м/с.

Как видно, для обеспечения ощутимой мощности необходимо обеспечить большую площадь теплообмена и скорость воздуха относительно поверхности.

Термодинамические процессы, происходящие в Стирлинг-машине, определяются известной формулой термодинамики — уравнением состояния идеального газа:

$$PV = m\,R\,T. \tag{2}$$

Произведение давления газа на его объем равно молярной массе газа m, умноженной на произведение универсальной газовой постоянной R и температуры газа в Кельвинах T. Следовательно, $(PV)/T$ — есть постоянная, не меняющаяся величина. Зная температуру и объем рабочего тела, можно вычислить давление. Задав мгновенное значение максимального давления и объема, можно определить температуру. При этом нужно помнить, что все термодинамические процессы протекают в определенных условиях.

В двигателе Стирлинга одновременно меняются все три параметра: нагреваемый или охлаждаемый объем, давление и температура рабочего тела. Поэтому при всей простоте основной формулы для расчета двигателя вводятся некоторые идеальные условия.

Уравнения и вычисления сделаны для расчета Альфа-стирлинга. Моментальный объем расширения V_E и моментальный объем сжатия V_C описаны в уравнениях с охваченным объемом дисплейсера V_{SE}, охваченным

объемом рабочего поршня V_{SC} и углом поворота вала dx между дисплейсером и рабочим поршнем:

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}\left(1-\cos x\right) + V_{DE}\,; \tag{3}$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}\left(1-\cos x\right) + \frac{V_{SC}}{2}\left\{1-\cos\left(x-dx\right)\right\} + V_{DC}\,. \tag{4}$$

Тогда общий моментальный объем V опишется уравнением

$$V = V_E + V_R + V_c\,. \tag{5}$$

Рабочее давление P, среднее давление P_{mean}, минимальное давление $P_{\min}$ и максимальное давление $P_{\max}$ найдено в следующих уравнениях:

$$P = \frac{P_{\text{mean}}\sqrt{1-c^2}}{1-c\,\cos\left(x-a\right)} = \frac{P_{\min}\left(1+c\right)}{1-c\,\cos\left(x-a\right)} = \frac{P_{\max}\left(1+c\right)}{1-c\,\cos\left(x-a\right)}\,;$$

$$t = \frac{T_C}{T_E}, \quad v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}, \quad X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}}, \quad X_R = \frac{V_R}{V_{SE}}; \tag{6}$$

$$a = \tan^{-1}\frac{v\,\sin dx}{t+\cos dx+1}; \quad S = t + 2\,t\,X_{DE} + \frac{4tV_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1;$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2\left(t-1\right)v\,\cos dx + v^2 - 2t + 1}, \quad c = \frac{B}{S}.$$

Мощность и КПД. Мощность двигателя Стирлинга рассчитывается при исходных параметрах: температуре охладителя T_1; температуре нагревателя T_2; рабочем давлении P_1.

Полезная работа за один цикл идеального Стирлинга равна

$$A = 0.37\,P_1\,V_1\,(T_2 - T_1)\,\log\left((T_2 + 273 / (T_1 + 273)\right)\text{ Дж},$$

где P_1 — в кг/см^2; V_1 — в дм^3; температура — в °C.

Давление в горячем цилиндре

$$P_2 = P_1\,(T_2 + 273) / (T_1 + 273) = 1{,}726\text{ кг/см}^2.$$

Для двигателя Стирлинга объемом (0,3 дм^3) при атмосферном давлении 1 кг/см^2, температуре нагрева 275 °C, температуре охлаждения 100 °C

полезная работа цикла равна ~15,5 Дж. Если принять, что в секунду совершается 10 циклов, то мощность составит 155 Вт.

Для перехода к практическим значениям необходимо уменьшить значение мощности как минимум в 3 раза: окончательно получим ~50 Вт. Значит, если создать давление, равное 10 кг/см^2, то получим мощность ~0,5 кВт.

КПД для цикла Стирлинга равен максимально достижимому КПД тепловых машин и определяется по формуле

$$\text{КПД} = (T_2 - T_1) / (T_2 + 273). \quad (7)$$

В этом случае для низкотемпературного Стирлинга (T_1 = 30 °С, T_2 = 100 °С) получаем КПД = 18,75 %, для высокотемпературного Стирлинга (T_1 = 100 °С, T_2 = 275 °С) КПД = 31,9%.

Поделив результат на 3, получим, что низкотемпературные Стирлинги имеют КПД несколько процентов (6,25 %), а высокотемпературные ~10 % (10,65 %).

Необходимо отметить, что при всей простоте расчета метод приводят к определенным неточностям. Более точным является расчет по теории Шмидта [9, 15]. Шмидт Г. провел анализ работы двигателей Стирлинга и предложил вариант расчета стирлинг-машин также на основе расчета МКТ. Теория немного идеализирована, но реалистичней теории идеального цикла Стирлинга.

Разработан еще более точный, но и более сложный способ – метод узлового анализа, но он редко используется на практике.

Перспективы развития двигателей Стирлинга:

- более расширенное применение методов расчета роторных двигателей внешнего сгорания Стирлинга [1];

- автоматизация процессов анаэробного сбраживания органических отходов в метантенках с целью получения биогаза для машин Стирлинга [2, 4, 5, 15];

- световое и тепловое воздействие солнечного излучения на работу двигателей Стирлинга с целью повышения их энергоэффективности [6, 13];

- использование биогаза для получения тепловой и электрической энергии с помощью двигателя Стирлинга [7, 8];

- использование двигателя Стирлинга в когенерационных и тригенерационных процессах получения тепла, холода и электричества, а также механических процессах привода [10, 11, 14];

- получение тепловой и электрической энергии путем использования комбинированных солнечных и биоресурсных преобразователей на базе двигателя Стирлинга [13, 15].

Литература

1. **Андреев Ю.П.** Роторный двигатель внешнего сгорания. Пат. РФ 2451811; подача: 27.08.2010, опубл.: 27.05.2012.
2. **Автоматизация** процесса анаэробного сбраживания органических отходов / И.Х. Гайфуллин, Б.Г. Зиганшин, А.И. Рудаков, Ю.Х. Шогенов // Агроинженерная наука XXI века: Научные труды региональной научно-практической конференции, 2018. С. 339—343.
3. **Даниличев В.Н., Ефимов С.И., Звонок В.А**. Двигатели Стирлинга / [Электронный ресурс]. URL: http://www.studopedia.ru›3_13485_dopolnenniy.html
4. **Иванова В.Р., Литвиненко М.С.** Формирование сигналов управления в электротехнических системах // Федоровские чтения – 2019: Матер. XLIX Международной научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 199—205.
5. **Иванова В.Р., Киселев И.Н.** Частотно-регулируемый привод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21 № 5. С. 59—70.
6. **Майоров В.А., Панченко В.А.** Исследование тепловых режимов работы двигателя Стирлинга с параболоидным концентратором солнечного излучения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. № 1. С. 28—29.
7. **Мевлиянов М.Д., Рудаков А.И.** Использование биогаза для получения электрической энергии с помощью двигателя Стирлинга. // Вестник магистратуры. № 52. Том 1.
8. **Працков И.И.** Двигатель Стирлинга − универсальный источник энергии // Современная техника и технологии. 2015. № 1 [Электронный ресурс]. URL: http://technology.snauka.ru/2015/01/5553 (дата обращения: 19.09.2020).
9. **Ридер Г., Хупер Ч.** Двигатели Стирлинга: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 464 с.
10. **Рудаков А.И.** Использование двигателя Стирлинга в когенерационных процессах получения тепла и электричества // Международная научно-техническая конф., посвящ. памяти проф. А.К. Юлдашева. Казань: Изд-во КГАУ, 2018. С. 65—70.
11. **Фирсова Е.В.** Возможность использования двигателя Стирлинга в комбинированном источнике энергии // Энергетика: состояние, проблемы перспективы: Всероссийская научно-техническая конференция. Оренбург, 2010. С. 55—58.
12. **Фирсова Е.В., Соколов В.Ю.** Использование двигателя Стирлинга в тригенерационном цикле // Фундаментальные исследования. 2012. № 3−1. С. 141—144.
13. **Цырук С.А., Лисицын И.Д.** Энергосберегающие источники света и инновационный подход к построению систем искусственного освещения объектов ЖХК / Матер. Всероссийской научно-практ. конф., посвящ. 100-летию образования Республики Башкортостан. Уфа, 2019. С. 196—201.
14. **Denisova A.R., Rudakov A.I., Rozhentsova N.V.** Energy Efficiency of Electric Vacuum Systems: Induction Motor − Water Ring Pump with an Ejector // Advances in Automation. RusAutoCon 2019.
15. **Уокер Г.** Двигатели Стирлинга. Сокр. пер. с англ. Б.В. Сутулина и Н.В. Сутулина. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.

Н.Ю. Саввин, n-savvin@mail.ru, Д.Д. Гарбузов,
BSTU-Belgorod@yandex.ru,
Д.А. Калашников, kalashnikov.dima2016@gmail.com,
П.В. Рощубкин, qwerty315@yandex.ru,
Р.С. Сингатулин, roma882007@yandex.ru, В.А. Сапрыка,
БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОТОРА САВОНИУСА ПРИ СОЗДАНИИ КОМПАКТНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

В настоящее время наблюдается тенденция к переходу от невозобновляемых источников энергии к возобновляемым. Такой переход позволит решить ряд проблем современной электроэнергетики, а именно позволит снизить риски, связанные с атомной энергетикой, вероятность возникновения энергетического кризиса, сократить затраты на невозобновляемые энергетические ресурсы, повысить стабильность электроснабжения и обеспечить снижение экологической напряженности [1].

Переход к «зеленой» энергетике подразумевает комплексный подход к использованию альтернативных энергетических ресурсов, таких как энергия солнца, ветра, геотермальная энергия, энергия приливов и отливов и др.

Энергия ветра — один из самых перспективных источников энергии, поскольку обладает рядом преимуществ, таких как:

- абсолютная экологичность, отсутствие выбросов и излучения;
- использование неисчерпаемого источника энергии;
- перспективность направления;
- легкость в эксплуатации и обслуживании.

Ветроэнергетические генераторные установки, как правило, имеют огромные габаритные размеры и занимают обширные площади. Одной из задач отрасли является снижение размеров установок с одновременным увеличением эффективности для расширения сфер их применения и повышения доли ветроэнергетики в общем объеме производства «зеленой» энергии.

Возникает потребность в изготовлении компактных генераторных установок, не требующих специальных условий для монтажа и эксплуатации, а также обладающих высокой эффективностью. Для решения данной задачи необходимо внести изменения в конструкцию основных элементов. Существует две основные группы ветрогенераторов: с горизонтальным (рис. 1) и вертикальным (рис. 2) расположением турбины. В условиях городской инфраструктуры предпочтительнее использовать установки с вертикальным расположением турбины ввиду их эксплуатационно-технических характеристик и особенностей. Ветряная установка, имеющая вертикальную ось вращения, по показателям эффективности превосходит ветрогенераторы с горизонтальными осями вращения [2].

Рис. 1. Горизонтально ориентированная турбина

Рис. 2. Вертикально ориентированная турбина

Основными элементами ветрогенераторной установки вертикального типа являются: ветряная турбина (вертикально ориентированный ротор); генератор; аккумулятор; системы контроля и учета электрической энергии.

Турбина служит для преобразования энергии ветра в механическую энергию с последующей передачей этой энергии валу генератора. Существует несколько типов вертикально ориентированных турбин, таких как ротор Савониуса, ротор Дарье, геликоидный ротор, многолопостный ротор, ортогональный ротор.

Ротор Савониуса (рис. 3), изобретенный Сигурдом Савониусом, является наиболее интересным решением с инженерной точки зрения. Данный вид ротора представляет собой цилиндр, разделенный на две половины, смещенные относительно друг друга и разделенные осевым промежутком. Давление воздуха на одну из половин цилиндра значительно больше, чем на другую, что приводит к вращению турбины. Поток, попадающий на одну лопасть, проходя через осевой промежуток, попадает на вторую лопасть, тем самым усиливая скорость вращения турбины (рис. 4) [3].

Ротор Савониуса имеет меньший КПД (17–18 %) по сравнению с горизонтально ориентированными турбинами, однако обладает преимуществами, которые расширяют сферу его применения:

- работа при небольших значениях скорости ветра (от 3 м/с);
- работа практически в любых погодных условиях, включая ураганные ветры;
- простота и надежность конструкции;
- работа при любом направлении ветра;
- небольшие габаритные размеры;

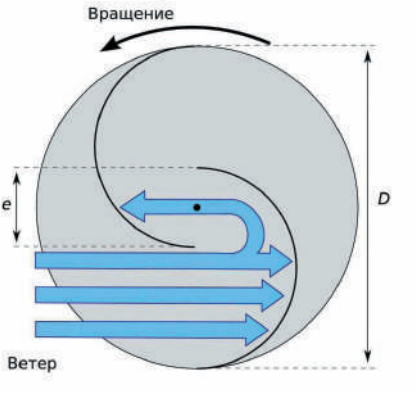


Рис. 3. Внешний вид ротора Савониуса **Рис. 4. Принцип работы ротора Савониуса**

- безопасность для человека и птиц;
- низкий уровень шума.

Для ротора Савониуса характерны высокие пусковые крутящие моменты, работа при относительно низких скоростях и относительно высокая технологичность его производства [4].

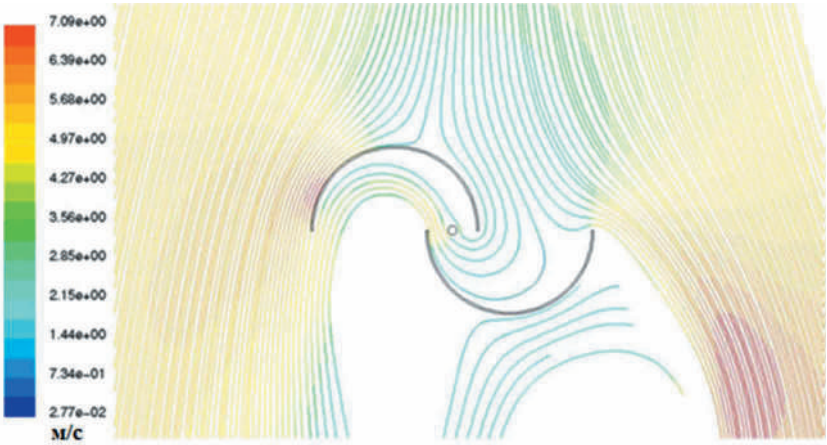


Рис. 5. Пример распределения скорости ветрового потока в роторе Савониуса

В условиях городской инфраструктуры выгоднее использовать большое количество генераторных установок с вертикально ориентированной турбиной, чем несколько установок с горизонтально ориентированной турбиной. Ветрогенераторы с ротором Савониуса могут применяться для покрытия

нужд в электроэнергии крупных автомагистралей и дорог федерального значения. Воздушные потоки от проезжающих транспортных средств имеют достаточно высокую скорость для того, чтобы вращать лопасти турбины.

Для исследования процессов аэродинамики ротора Савониуса чаще всего применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье—Стокса несжимаемой жидкости, для замыкания которых используются алгебраические или дифференциальные модели турбулентности:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0;$$
$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[V_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (1)$$

где x_i, $i = 1, 2$ — декартовы координаты; t — время; u_i — декартовы составляющие вектора скорости; p — давление; V_{eff} — эффективный коэффициент кинематической вязкости.

Применение этих уравнений позволяет изучить особенности нестационарного обтекания, структуру поля скоростей, а также процессы появления вихрей вокруг ротора [5].

В ходе исследований энергетических характеристик ротора Савониуса было выявлено, что наибольшую эффективность имеет ротор с тремя или четырьмя лопастями. Использование четырехлопастной схемы наиболее выгодно при тихоходном режиме работы турбины; при более высоких значениях ее скорости предпочтительнее использовать трехлопастную турбину.

На производительность ротора Савониуса большое влияние оказывают соотношение между высотой ротора и его диаметром и коэффициент перекрытия, который может быть представлен как $\beta = (e - a)/d$, где e — ширина зазора между лопастями; a — диаметр вала и d — диаметр лезвия. Установлено, что при увеличении соотношения сторон увеличивается и коэффициент мощности.

Отдельный интерес для исследований представляет возможность увеличения производительности ротора Савониуса при изменении характеристик среды, в которой работает ротор, в частности, температуры воздуха. Для этого был проведен эксперимент с использованием ротора Савониуса, установки для генерации теплого воздуха и подачи его на лопатки ротора. При этом скорость воздушного потока измерялась при помощи анемометра, а момент, создаваемый ротором, при помощи динамометра. По результатам исследования выявлено, что энергетические показатели ротора Савониуса стандартной конструкции при использовании горячего воздуха повышаются незначительно, однако наблюдается более выраженно при использовании так

называемой вихревой турбины, представляющей из себя ротор с увеличенными по площади внутренними пластинами, позволяющими создать вихревую камеру. Выявлено увеличение коэффициента мощности при использовании вихревой турбины.

Изменение рабочей среды ротора также позволяет добиться прироста энергетических характеристик. Это доказывают проведенные эксперименты с работой ротора в жидкости. Для этих целей использована емкость с насосной установкой, позволяющей создавать потоки жидкости различной интенсивности в нескольких направлениях. Экспериментально установлено, что ротор может вращаться при любом направлении движения жидкости.

Для оценки мощности, генерируемой ротором, используется уравнение

$$P = \frac{1}{2}\rho A C_p V_{\text{опт}}^3 . \quad (2)$$

Тогда уравнение скорости потока жидкости имеет вид

$$V = \left(\frac{2P}{\rho A C_p} \right)^{\frac{1}{3}} . \quad (3)$$

Таким образом, вращающий момент ротора в жидкости

$$C = \frac{1}{2}\rho A C_m R V_{\text{опт}}^2 , \quad (4)$$

где C_m — коэффициент вращающего момента.

Использование ротора Савониуса позволит создать сеть из небольших и компактных генераторных установок, обеспечивающих электроэнергией различные объекты инфраструктуры, что приблизит нас еще на один шаг к по-настоящему «зеленой» энергетике.

Литература

1. **Соловьев А.П.** Ротор типа Савониуса. М.: Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ, 1997.
2. **Исследование** аэродинамических и энергетических характеристик ротора Савониуса / А.А. Бубенчиков, А.Е. Белодедов, И.С. Булычев, А.О. Шепелев [Электронный ресурс]. URL: //https://research-journal.org/technical/issledovanie-aerodinamiki-i-energeticheskix-xarakteristik-rotora-savoniusa/
3. **Tcip.ru** (все об альтернативной энергетике) [Электронный ресурс]. URL: https://tcip.ru/blog/wind/osnovnye-vidy-vetrogeneratorov-vertikalnye-gorizontalnye.html
4. **Экоэнергия** [Электронный ресурс]. URL: // https://ekoenergia.ru/energiya-vetra/energiya-vetra.html

Х.С. Сангов, khushdil.sangov@mail.ru,
Ф.О. Исмоилов, ismoilovf@mail.ru,
Таджикский технический университет
имени академика М.С. Осими

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ ТРУДНОДОСТУПНЫХ, МАЛОНАСЕЛЕННЫХ И УДАЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Характерными особенностями Республики Таджикистан (РТ) и других восточных регионов являются весьма низкая плотность населения на громадных, слабо освоенных в производственном отношении территориях, изолированных от централизованного электроснабжения, а также наличие большого числа мелких потребителей энергии, удаленных от источников энергии и центров ее распределения — это небольшие населенные пункты, станции сотовой мобильной связи, геологические экспедиции, туристические базы, пастбища, пограничные заставы, объекты гражданской обороны и МЧС и многие другие автономные потребители, где централизованное электроснабжение очень затруднительно или малоэффективно [1]. Стоит выделить высокогорный Мургабский район Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО).

Проблема надежного и качественного электроснабжения высокогорного Мургабского района ГБАО остается острой в социальном, техническом и экономическом аспектах. Электрообеспечение Мургаба может быть осуществлено либо за счет централизованного электроснабжения, либо путем создания децентрализованных зон [2].

Мургаб охватывает 24 % территории РТ, 59,4 % территории ГБАО. Площадь 38 442,2 км^2. Население 16,9 тыс. человек. Расположен на высотах 3500−4500 м (максимальная высота 6233 м). Температура в течение летнего периода на высотах 3500—4200 м колеблется в пределах от (+11) до (−12) градусов, даже в июле возможны существенные ночные заморозки. Потребность в электроэнергии оценивается в 31 748 480 кВт·ч в год, при этом дефицит составляет 13 790 480 кВт·ч. В домохозяйствах установлено 800 локальных, автономных солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ).

Проблемы электроснабжения Мургабского района.

- Единственная в районе малосточная река Аксу в сильные морозы до 50 градусов ниже нуля зимой на 80 % замерзает.
- Мургабский район состоит из 20 удаленных населенных пунктов, расположенных в 50—150 км друг от друга, которые не присоединены к системам центрального электроснабжения района и ГБАО (расстояние от административного центра области до районного центра — 320 км).

- Возведение для этих целей воздушных ЛЭП 10–6/0,4 кВ с учетом постоянно растущих цен на строительные материалы представляется для района и области экономически нецелесообразным.
- По этим причинам гидроэнергетика не может быть доступным источником электрической энергии в районе.
- Проблема энергоснабжения района может решаться с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечная и ветровая. Для этого район располагает большим потенциалом.

Наиболее перспективным для Мургабского района представляется совместное использование ресурсов ВИЭ, а конкретно ветроэнергетических установок (ВЭУ) и СФЭУ с целью сглаживания пиковых всплесков и простоев в производстве энергии. Максимум скоростей ветра приходится на холодное время года (январь−май 4,3—6,1 м/с) и совпадает с сезонным пиком потребления энергии. Зимний максимум находится в противофазе с среднегодовым коэффициентом солнечной инсоляции, т.е. ветровая и солнечная энергия удачно дополняют друг друга. Это создает благоприятные условия для их совместного использования. В условиях снижения общего уровня интенсивности ветра в летнее время дневной максимум солнечной инсоляции является благоприятным для эффективного использования энергии солнца.

Таким образом, можно констатировать, что решение проблемы электроснабжения высокогорного Мургабского района основывается на внедрении новых разработок альтернативной энергетики, где наибольшее распространение получили СФЭУ и ВЭУ. Преимуществами выбранного района в качестве объекта внедрения ВЭУ являются высокий ветропотенциал, а также удобное расположение объекта на возвышенности (более 3000 м над уровнем моря) и наличие больших площадей, для размещения преобразовательного оборудования и системы управления ВЭУ.

Анализ ветропотенциала места размещения потребителя. Важнейшие характеристики ветропотенциала какой-либо территории — средняя скорость ветра за определенный период (месяц, год) и по-вторяемость различных градаций скорости ветра. Среднегодовую скорость можно определить по карте ветровых ресурсов Таджикистана, а среднюю скорость ветра за определенный период вычислить по материалам регулярных наблюдений метеорологических станций РТ, которые получают из специализированных баз данных [3].

Проведем анализ ветропотенциала района населенного пункта Мургаба. Для оценки характеристик использовались данные российского метеорологического сайта «Расписание погоды» [3] по метеостанции «Мургаб» за период 01.01.2018—31.12.2018. Среднегодовая скорость ветра составила

5,1 м/с, функция распределения, построенная по второму способу, изображена на рис. 1.

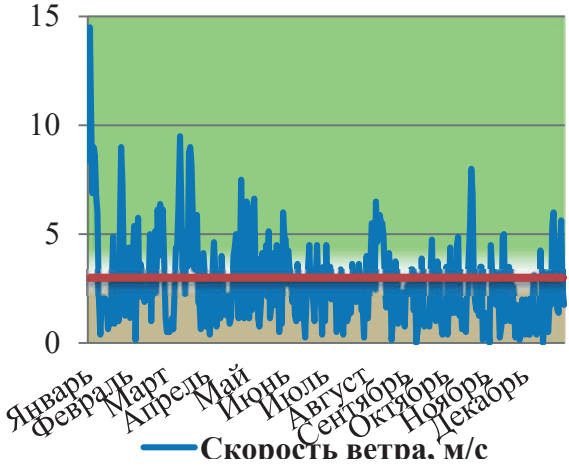


Рис. 1. Диаграмма среднесуточной скорости ветра с 1.01.2018 г. по 31.12.2018 г.

Характеристика потребителей Мургабского района. Ставя задачу обеспечить каждый дом отдельного населенного пункта электроэнергией, т.е. независимым источником энергоснабжения, следует ориентироваться только на местные энергоресурсы (преимущественно возобновляемые) и традиционные автономные источники, работающие параллельно с сетью. Применение автономных источников энергоснабжения означает сокращение сетей, повышение надежности электроснабжения, решение проблем электропередачи отдельных автономных объектов. Все эти случаи требуют определения величины электропотребления каждого населенного пункта и отдельной семьи [4].

В Таджикистане, где 93 % территории занимают горы, более 73 % населения проживает в сельской и высокогорной местности. Сегодня численность среднестатистической семьи в этих мест равна 3—10 человек — это максимальная величина, ставящая вопрос о росте уровня децентрализованной энергообеспеченности населения. Если известна численность населенного пункта и количество семей, в нем проживающих, как и численный состав каждой семьи, то посредством гауссовой статистики возможно приближенное определение электропотребления произвольной семьи и населенного пункта в целом. Суть предлагаемой методики заключается в случайном выборе уже известных показаний счетчика для семьи заданной численности из предложенного массива данных [4].

Полагая, что для семьи различной численности существует свой массив данных об электропотреблении, справедливо следующие равенство:

$$W_i = nW_{i,k}, \tag{1}$$

где i — численность семьи; W_i — потребление электроэнергии семьей в течение года; $W_{i,k}$ — суточное потребление электроэнергии семьи численностью i; n — число дней в году.

Для определения электропотребления населенного пункта справедливо следующее соотношение:

$$W_{\text{нас.п}} = \sum_{l=1}^{q} m_l W_l, \tag{2}$$

где q — максимальная численность семьи; m_l — число семей численностью l; W_l — электропотребление семьи численностью l.

Тогда суммарное электропотребление района определяется зависимостью

$$W_{\text{рн}} = \sum_{k=1}^{p} W_k, \tag{3}$$

где p — количество поселений; W_k — потребление электроэнергии отдельного населенного пункта.

Таким образом, потребители восточного высокогорного района Мургаба были классифицированы в виде групп населенных пунктов с численностью населения до 10, 25, 50, 100 человек [4]. Для этой классификации определены максимальная и минимальная потребляемые мощности, а также расчетное электропотребление по соотношениям (1) − (3). В данной работе рассмотрим первую группу (численность 3—10 человек), максимальные характеристики этой группы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики потребителей Мургабского района для пунктов численностью 3—10 человек

Численность	Сезон	Мощность, кВт		Электропотребление, кВт·ч			
		$P_{\min}$	$P_{\max}$	За сутки	За месяц	За сезон	За год
3—10 человек	Осень−зима	0,3	3,0	25,95	778,5	2335,5	9054
	Весна−лето	0,1	3,0	24,35	730,5	2191,5	

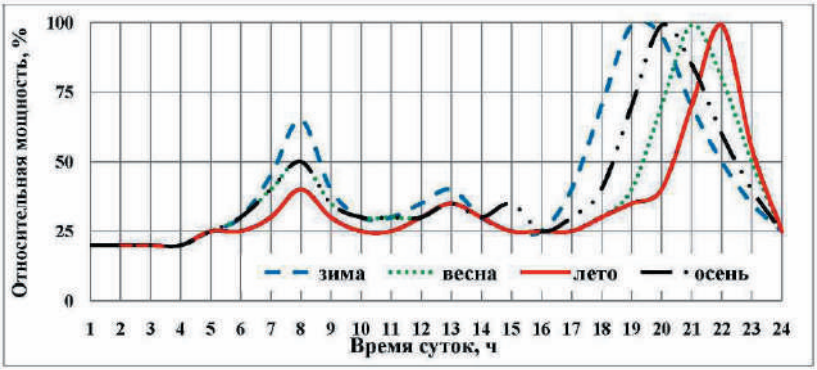


Рис. 2. Суточный график нагрузки комунально-бытовых потребителей сельских хозяйств Мургабского района

На рисунке 2 показан характер изменения графика электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей сельских хозяйств и поселков Мургабского района. Отличительной особенностью этих потребителей является тот факт, что максимум суточного потребления (100 %) наступает в 19^{00} зимой, 20^{00} — осенью, в 21^{00} и 22^{00} соответственно весной и летом. Первый суточный всплеск электропотребления наблюдается в 8^{00} независимо от времени года и составляет относительно максимума потребления 65—75 % зимой, 40—55 % летом. После этого явно прослеживается спад потребления электрической энергии, продолжающейся по времени до 16^{00} и сопровождающийся снижением потребляемой мощности до 25 % в одной семьи и 40 % в населенном пункте.

Таким образом, из графика видно, что максимальные значения потребляемой мощности хозяйством не превышают 3,0 кВт, и приходятся на определенные интервалы длительностью примерно 1,5 часа.

Выбор модели ВЭУ малой мощности. Работа ВЭУ в реальных условиях на открытой местности зависит от стохастического характера ветровых потоков в любой промежуток времени. Для повышения мощности ВЭУ с заданным диаметром ротора необходимо увеличивать высоту башни, так как скорость ветра увеличивается с высотой. Чем выше расчетная скорость ветра, тем выше эффективность ВЭУ. В качестве расчетной скорости ветра обычно применяется среднегодовая скорость ветра, которая относительно мало меняется по годам, но в течение года существенно меняется в течение суток, так и года в целом.

Процесс изменения скорости ветра в течение года имеет свои закономерности: в зимний период скорость ветра выше, чем летом; в полдень выше, чем утром. Однако когда скорость ветра равна нулю или недостаточна для нормальной работы ВЭУ, это означает, что выработка электроэнергии

отсутствует. В этом случае о бесперебойности электроснабжения потребителей, подключенных к ней, и речи быть не может. Поэтому ветроэнергетические установки могут работать только совместно с другими источниками энергии или с аккумуляторами, а это приводит к экономии других видов энергоресурсов.

Исходя из изложенного следует рассмотреть работу ВЭУ, в которой генерируемая электроэнергия первоначально накапливается аккумуляторными батареями, у которых энергоемкость рассчитана на продолжительную пиковую нагрузку потребителя. В автономных условиях электроснабжения сельскохозяйственных объектов на примере одной семьи, удаленных от линий электропередачи и потребляющих суточное количество электроэнергии до 5 кВт·ч, целесообразно использовать ВЭУ, имеющую в качестве накопителя энергии аккумуляторные батареи. Данная система позволяет накапливать электроэнергию, и через инвертор преобразовывать энергию АКБ в соответствующую форму сигнала, удовлетворяющего номинальным требованиям современного оборудования.

В функциональной схеме, представленной на рис. 3, к промежуточной шине постоянного тока подключены ВЭУ и аккумуляторная батарея (АКБ). ВЭУ выполнена на синхронном генераторе на постоянных магнитах (СГ) с системой управлением (СУ) [5, 6]. Автономный инвертор (И) обеспечивает потребителей электроэнергией переменного тока промышленной частоты 50 Гц.

Мультипликатор (М) размещается в корпусе гондолы ВЭУ и может быть установлен таким образом, чтобы вал редуктора позволил вращаться ротору синхронного генератора как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

Для ВЭУ малой мощности до 5 кВт электроэнергия, вырабатываемая ветрогенератором, после выпрямления через двунаправленный конвертер постоянного напряжения (ДКПН) поступает в аккумуляторную батарею. Функция регулировки заряда аккумуляторной батареи возлагается на блок автоматики. Подключение теплонагревательных элементов (балластная нагрузка) через контроллер Ветрогрей (КВ) осуществляется, если аккумуляторная батарея полностью заряжена. При этом тепловая энергия может аккумулироваться в виде горячей воды внутри помещений.

С другой стороны, балластная нагрузка необходима, чтобы поддерживать электромагнитное потокосцепление между статором и ротором синхронного генератора, в результате которого возникает тормозной момент на валу генератора. В случае отсутствия нагрузки электрогенератор переходит в режим работы на холостом ходу. При таком режиме электромагнитное потокосцепление снижается и опасно в период сильных ветровых потоков, так как тормозной момент близок к нулю. Отсутствие сопротивления вращению

вала генератора сопутствует развитию высоких оборотов вращения, которые могут привести к деформации лопастей ветродвигателя [6].

Электрические нагрузки подключаются как на постоянном токе 12/24 или 48 В, так и на переменном токе 380/220 В через инвертор.

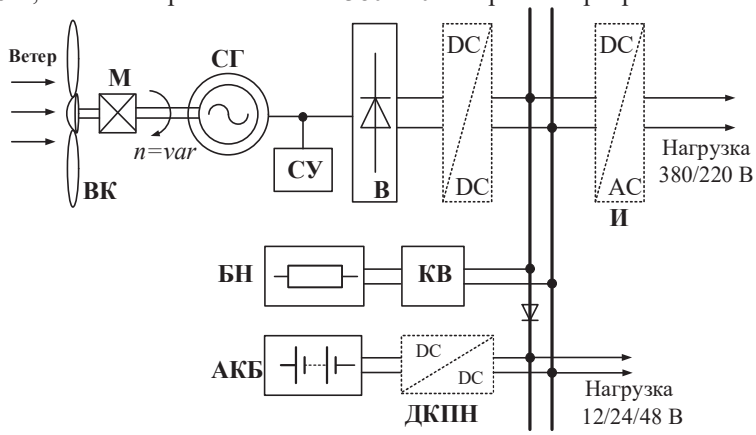


Рис. 3. Функциональная схема ветроэнергетической установки опосредованного электроснабжения

Мощность, вырабатываемая ветроагрегатом, в состав которого входит ветротурбина, трансмиссия, синхронный генератор, выпрямительный диодный мост и контроллер зарядки аккумуляторных батарей, находится из выражения [7]:

$$P_{\text{ВЭУ}} = \xi\ \pi\ R^2\ 0{,}45\ V_{\text{ветра}}^3\ \rho\ \eta_{\text{ген}}\ \eta_{\text{пр}} / 1000, \qquad (4)$$

где ξ — коэффициент использования энергии ветра (ξ_{max} = 0,4÷0,5), о.е.; R — радиус ветроколеса, м; $V_{\text{ветра}}$ — скорость воздушного потока, м/с; ρ — плотность воздуха (при стандартных условиях ρ = 1,225), кг/м^3; $\eta_{\text{ген}}$ — КПД генератора (принимаем $\eta_{\text{ген}}$ = 0,8), о.е.; $\eta_{\text{пр}}$ — КПД преобразовательной системы ВЭУ (принимаем $\eta_{\text{пр}}$=0,9), о.е.

Необходимое количество аккумуляторов для системы автономного электроснабжения рассчитывается из выражения

$$N_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{н}}\ t_{\text{н}}\ \alpha_{\text{сут}}}{U_{\text{н}}\ C\ \eta_{\text{ак}}\ \eta_{\text{и}}}, \qquad (5)$$

где $P_н$ — мощность нагрузки, 3000 Вт; $t_н$ — время потребления мощности нагрузкой, 24 ч; $\alpha_{сут} = \frac{P_{\min сут}}{P_{\max сут}} = 0,033$ — коэффициент неравномерности нагрузки; $U_н$ — номинальное напряжение на выходе автономной системы электроснабжения, 12,8 В; C — емкость одного аккумулятора, 200 А/ч; $\eta_{ак}$ — коэффициент использования емкости аккумулятора, $\eta_{ак} = 0,94$; $\eta_и$ — КПД инвертора, $\eta_и = 0,98$.

По известному значению максимальной нагрузки объекта электроснабжения можно определить суточную расчетную мощность нагрузки для любого дня в году по выражению

$$P_{pi} = P_i P_{\max}(1 \pm C_{pi}\xi)k_c, \qquad (6)$$

где P_{pi} — расчетная активная мощность на i-м часе суточного графика; P_i — математическое ожидание нагрузки на i-м часе суточного графика; C_{pi} — коэффициент вариации нагрузки для i-й ступени суточного графика; k_c — коэффициент сезонности; ξ — равновероятная случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Как было отмечено выше, максимальные значения потребляемой электроэнергии сельским хозяйством не превышают 3,0 кВт, поэтому, чтобы обеспечить надежное электроснабжение одного хозяйства на всех интервалах времени суточного энергопотребления, необходимо рассчитать достаточное количество электроэнергии, передаваемое синхронным генератором в час для непрерывного заряда аккумуляторов, энергоемкость которых, в свою очередь, удовлетворит электроснабжению в любой момент времени. В общем случае вырабатываемую мощность генератора, удовлетворяющую достаточному количеству электроэнергии для заряда АКБ, определим по выражению

$$P_{ГЭН} = \frac{N_{АКБ} U_н C \eta_{ак} \eta_и}{t_н} = \frac{2 \cdot 12,8\,В \cdot 200\,А/ч \cdot 0,94 \cdot 0,98}{24\ ч} \approx 200\ Вт/ч. \qquad (7)$$

Подставляя приведенные выше расчетные данные в (7), можно основываться на том, что при средней скорости ветра 5,1 м/с активная мощность, генерируемая синхронным генератором, может быть равна 200 Вт, чтобы удовлетворять заряду двух АКБ емкостью по 200 А·ч [8], которые обеспечивают бесперебойное суточное электроснабжение до 3 кВт группы потребителей численностью 3—10 человек.

Для надежной работы системы электроснабжения одного хозяйства населенного пункта Мургаба в период штиля необходимо выбрать соответствующую емкость аккумуляторных батарей, а также мощность генератора, удовлетворяющего заряд накопителей энергии. Учитывая трехдневный безветренный период необходимо основываться на выборе шести аккумуляторных батарей с суммарной энергоемкостью 1200 А·ч, заряд которых обеспечивал бы электрогенератор мощностью 3000 Вт.

Выбор ВЭУ проведем на основании модельного ряда производителя Zonhan Windpower (Китай). Предварительно выбираем ВЭУ модели ZH3KW [9].

Оценка экономической эффективности использования автономного электроснабжения на базе ВЭУ. В [10] была проведена оценка эффективности инвестиций в автономный комплекс на базе ВЭУ, основанная на расчете чистого дисконтированного дохода (ЧДД) и определении дисконтированного срока окупаемости (ДСО). По ее результатам сделан вывод об экономической целесообразности применения ВЭУ для электроснабжения населенных пунктов Мургабского района.

В таблице 2 представлен расчет капитальных вложений автономного комплекса на базе ВЭУ, в состав которого входит выбранное выше оборудование, на основании цен, приведенных в [10]. Автономный комплекс на базе ВЭУ стоит 211,3 тыс. руб., общие капитальные вложения в проект равны 364 тыс. руб. При этом важно помнить о необходимости замены всего комплекта АКБ на 12-м году использования автономного ВЭУ, когда потребуются дополнительные капитальные вложения на их закупку, транспортировку, монтаж и т.д. [10].

Таблица 2

Расчет капитальных вложений автономного комплекса на базе ВЭУ

Составная часть автономного комплекса	Цена за шт., тыс. руб.	Количество, шт.	Стоимость, тыс. руб
ВЭУ Zonhan ZH3KW (3 кВт, 48 В)	92,7	1	92,7
Мачта для ветрогенератора (15 м)	32,5	1	32,5
Контроллер для ветрогенератора Hefei Win Power WWS30A-48-E (3 кВт, 48 В)	18,5	1	18,5
Свинцово-кислотные АКБ Ritar Power RA-12-200 (12 В, 200 А·ч)	15,4	2	30,8
Инвертор Mean Well TS-3000–248 (3 кВт, 48 В/ ~230 В)	36,8	1	36,8
Стоимость автономного комплекса			211,3
Капитальные затраты автономного комплекса			364

Предлагаемая в данной статье система автономного электроснабжения на основе ВЭУ обладает следующими отличительными признаками и преимуществами:

1) за счет минимального количества электромеханических устройств конструкция ветроагрегата является компактной, технологически гибкой и готовой к частой транспортировке;

2) мощность синхронного генератора 3 кВт должна быть не меньше максимальных кратковременных значений потребляемой мощности нагрузки в пределах 3 кВт с учетом суммарного суточного потребления энергии;

3) мощность электрогенератора рассчитывается на обеспечение заряда емкости АКБ 1200 А·ч, удовлетворяющей суточное потребление электроэнергии одной семьи с запасом на время трехдневного штиля;

4) генерируемая электроэнергия первоначально накапливается аккумуляторными батареями, у которых энергоемкость рассчитана на продолжительную пиковую нагрузку потребителя.

Таким образом, предложенная автономная система электроснабжения позволяет в любое время устойчиво и непрерывно обеспечивать энергией сельских потребителей Мургаба для бытовых нужд.

Литература

1. **Нетрадиционная** ветроэлектрическая установка / М.Д. Додхудоев, Х.С. Сангов, О.А. Мираков, Ш.Р. Давроншоев // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Экономическое развитие энергетики в республике Таджикистан». Курган-Тюбе, 2015. С. 66—71.
2. **Экономическая** эффективность использования ветроэнергетической установки для электроснабжения отдаленных сельских потребителей Республики Таджикистан / Х.С. Сангов, С.А. Цырук, Д.В. Михеев, К.Ф. Шарафеддин // Федоровские чтения − 2019. XLIX Международная научно-практическая конференция. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 330—344.
3. **Российский** метеорологический сайт «Расписание погоды». [Электронный ресурс]. URL: http://www.rp5.ru. (Дата обращения: 17.09.2020).
4. **Ветроэнергетическая** установка для автономного электротехнического комплекса малой мощности / К.Ф. Шарафеддин, С.А. Цырук, Х.С. Сангов, Д.В. Михеев // Федоровские чтения − 2018. XLVIII Международная научно-практическая конференция. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 330—342.
5. **Устройство** автоматического регулирования и стабилизации напряжения асинхронного генератора / С.А. Цырук, К.Ф. Шарафеддин, Х.С. Сангов, Д.В. Михеев// Патент на изобретение 2726949 С1; подача 17.07.2020. Заявка № 2019131852 от 09.10.2019.
6. **Tsyruk S.A., Sangov K.S.** Dynamic analysis of three-phase self-excited induction generator for wind energy // Федоровские чтения − 2017. XLVII Международная научно-практическая конференция. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 272—277.

7. **Устройство** ветроэнергетической установки для электроснабжения овцеводческих хозяйств небольшой мощности / Г.В. Никитенко, И.В. Деведеркин, Е.В. Коноплев, П.Е. Коноплев // Вестник АПК Ставрополья. 2016. № 3(23). С. 41—46.
8. **Zonhan Windpower** — производитель ветровых турбин малой мощности. URL: http://www.zonhan. com/ (Дата обращения: 15.09.2020).
9. **Ritar** — производитель аккумуляторов. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ritarpower.com/. (Дата обращения: 15.09.2020).
10. **Economic** efficiency of using a windmill for supplying power to remote rural consumers in the republic of Tajikistan / K.S. Sangov, S.A. Tsyruk, D.V. Mikheev et al. // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. P. 1047—1053.

Г.Р. Титова, Москва, titovagr@mpei.ru,
А.Р. Байбиченков, Москва, artur.bajbichenkov@mail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

В настоящее время в России актуальным вопросом является обеспечение электроэнергией изолированных районов страны. К таким районам относится большая часть Севера страны. Подключение таких районов к единой энергосистеме не всегда целесообразно с учетом показателей качества и надежности электроснабжения.

В ряде государственных программ по развитию энергетики России сделан акцент на внедрении нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. В регионах Крайнего Севера использование солнечной энергетики нерентабельно [1]. В работе рассмотрим варианты использования ветровой и приливной энергий.

Определение мощности электротехнического комплекса жилого поселка проведем по СП-256.1325800.2016 [2] и типовым проектам домов площадью до 150 м^2 с установленной мощностью 15 кВт. Расчетная мощность жилого сектора составит

$$P_{\text{расч.жил}} = N_{\text{дм}} P_{\text{раз.дм}} K_{\text{с}} K_0 = 30 \cdot 15 \cdot 0,75 \cdot 0,22 = 74,3 \text{ кВт}. \qquad (1)$$

Расчетные коэффициенты приняты из [2].

Расчетная мощность коммерческих помещений площадью до 100 м^2 и общая нагрузка:

$$P_{\text{расч.ком.пом}} = N P_{\text{н ком.пом}} K_0 = 8 \cdot 15 \cdot 0,38 = 45,6 \text{ кВт}; \qquad (2)$$

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{расч.жил}} + P_{\text{расч. ком.пом}} = 74{,}3 + 45{,}6 = 119{,}9 \text{ кВт}. \quad (3)$$

Расчетная мощность наружного освещения в соответствии с генеральным планом поселения составит примерно 15 кВт, сторонняя нагрузка 21,6 кВт, тогда

$$P_{\text{расч.этк}} = 119{,}9 + 15 + 21{,}6 = 156{,}5 \text{ кВт}. \quad (4)$$

Определим годовое потребление электроэнергии электротехническим комплексом по числу часов использования максимума из [3]:

$$W_{\text{год}} = P_{\text{расч.этк}} T_{\max} = 156.6 \cdot 3200 = 500\,800 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (5)$$

Определив мощность электротехнического комплекса, можно перейти к определению мощности энергоустановок.

Приливная электростанция — это электростанция, относящаяся к «зеленой» энергетике. В качестве механической энергии станции такого типа используют энергию приливов.

Принцип работы приливных электростанций достаточно прост. Для функционирования приливной электростанции необходимо отделить узкий морской залив плотиной, в отверстиях которой монтируются гидротурбины с генераторами. Во время прилива вода, проходя через отверстия плотины и вращая турбину, наполняет бассейн. При отливе происходит аналогичная ситуация, но уже вода возвращается в океан и ее уровень в бассейне становится меньше. На рис. 1 представлена схема приливной электростанции.

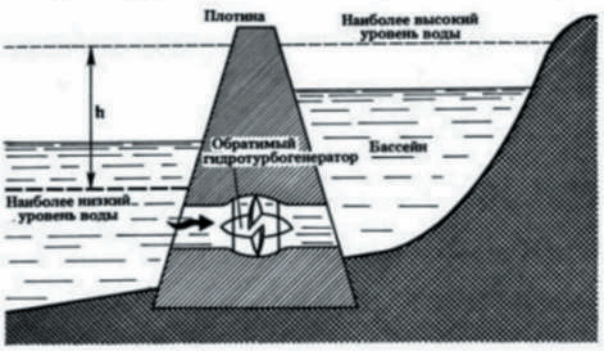


Рис. 1. Схема приливной электростанции

Рассмотрим приливную станцию однобассейнового типа двухстороннего действия. Для расчета основных энергетических показателей ПЭС необходимо иметь данные о площади, отведенной под бассейн ПЭС; примем, что площадь бассейна будет равна 0,5 км^2. Значение средней величины прилива было получено исходя из имеющихся данных.

Определим технический энергопотенциал бассейна ПЭ[4]:

$$\begin{aligned} Э_{\text{тех.пот}} &= 0,34 \cdot 1,97 \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot А_{\text{ср}}^2 \; S\left(1+\frac{4-Д}{Д}\right) = \\ &= 0,34 \cdot 1,97 \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 5,1^2 \left(1+\frac{4-3,1}{3,1}\right) = 5335 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $А_{\text{ср}}$ — средняя величина прилива, м; критерий Д в данном случае является показателем характера прилива (так, например, для чисто сточного прилива Д > 4). Для интересующих нас мест критерий Д для мыса Астрономический имеет значение 3,1.

Определим начальный напор:

$$H_{\text{нач}} = 0,5А = 0,5 \cdot 5,1 = 2,55 \text{ м}. \tag{7}$$

Расчетный расход воды

$$Q = 250\frac{А}{5,44} S = 46 \; А \, S = 46 \cdot 5,1 \cdot 0,5 = 117,3 \; \text{м}^3/\text{с}. \tag{8}$$

Установленная мощность ПЭС

$$\begin{aligned} N_{\text{уст}} &= 7QH = 7 \cdot 1,23 \cdot 46 \cdot А_{\text{ср}} \, S \cdot 1,23 \cdot 0,5А_{\text{ср}} = \\ &= 7 \cdot 1,23 \cdot 46 \cdot 5,1 \cdot 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,5 \cdot 5,1 = 3167,7 \text{ кВт}. \end{aligned} \tag{9}$$

Также энергопотенциал и установленную мощность можно определить, используя способ Прендла. Потенциальная энергия

$$\begin{aligned} Э &= \frac{c\,4\rho\,g\,H^2 S \; 706}{3600} = \\ &= \frac{0,37 \cdot 4 \cdot 1020 \cdot 9,81 \cdot 2,55^2 \cdot 0,5 \cdot 706}{3600} = 9442,4 \text{ МВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned} \tag{10}$$

где c — безразмерный оптимальный параметр, равный 0,27 при одностороннем действии и 0,37 при двустороннем действии; 706 — число циклов в году; ρ — плотность морской воды, равная 1020 кг/м^3; g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2; H — амплитуда прилива, м; S — площадь бассейна ПЭС, км^2.

Мощность ПЭС равна

$$N_{\text{уст}} = \frac{c\,4\rho\,g\,H^2 S}{3600T} = \\ = \frac{0{,}7 \cdot 4 \cdot 1020 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}55^2 \cdot 0{,}5}{3600 \cdot 9} = 2811{,}5 \text{ кВт}, \tag{11}$$

где c — безразмерный параметр, равный 0,7; T — период прилива, ч.

Исходя из расчетов мощность приливной станции может составить 2811,5 кВт, но для электротехнического комплекса будет достаточно установки агрегата мощностью 200 кВт.

Выполним расчет основных энергетических показателей ветроустановки. Мощность, вырабатываемая ветроустановкой, зависит от скорости набегающего потока ветра [5], поэтому ее можно определить [6] так:

$$N_{\text{ВЭУ}}(\upsilon_{h\text{б}}) = \begin{cases} 0 \text{ при } V \le V_p^{\min} \\ N'_{\text{в.п}}(\upsilon_{h\text{б}})\eta_{\text{вк}}\eta_{\text{р}}\eta_{\text{ген}} \text{ при } V_p^{\min} \le V \le V_p^n; \\ N'_{\text{в.п}}(\upsilon_{h\text{б}})\eta_{\text{вк}}\eta_{\text{р}}\eta_{\text{ген}} \left(\frac{V_p^n}{V}\right) \text{ при } V_p^n \le V \le V_p^{\max}, \end{cases} \tag{11}$$

где $N'_{\text{в.п}}(\upsilon_{h\text{б}}(t))$ — мощность ветрового потока, приходящегося на ветроколесо, Вт, $\eta_{\text{вк}}$ — КПД ветроколеса; $\eta_{\text{р}}$ — КПД редуктора; $\eta_{\text{г}}$ — КПД генератора; $V_p^{\min}$ — минимальная скорость ветра, ниже которой мощность вырабатываемая ветроустановкой равняется 0; V_p^n — расчетная скорость, при которой мощность, вырабатываемая ветроустановкой, равняется номинальной мощности; $V_p^{\max}$ — максимальная скорость, при которой мощность, вырабатываемая ветроустановкой, также равняется 0.

Энергия, вырабатываемая ветроустановкой

$$Э_{\text{ВЭУ}}(T) = \sum\nolimits_{j=1}^{N^{\text{гр}}} \left[N_{\text{ВЭУ}}(V^{\text{ср}\,j})\, t(\Delta V_j^{\text{гр}}) \right] T, \tag{12}$$

где $N^{\text{гр}}$ — количество градаций повторяемости скоростей ветра; T — период наблюдения, ч; $V^{\text{ср}\,j}$ — средняя скорость j-й градации (интервала), м/с, пересчитанная на высоту башни ВЭУ; $t(\Delta V_j^{\text{гр}})$ — повторяемость скоростей ветра ΔV диапазона.

Для определения мощности необходимо выбрать ветроустановку. Технические характеристики ветроустановки Vestas приведены в табл. 1. Результаты расчетов сведем в табл. 2.

Таблица 1

Технические характеристики выбранной ветроустановки

Параметр	Значение
Номинальная мощность	100 кВт
Диаметр ротора	21 м
Высота башни	22 м
Тип башни	Труба, 3 секции
Скорость ротора	44 об/мин
Минимальная рабочая скорость ветра	4 м/с
Максимальная рабочая скорость ветра	25 м/с
Регулирование мощности	Срыв потока
Вес турбины в сборе	20 т
Тип генератора	Асинхронный 400 В, 50 Гц
Срок службы	Не менее 10 лет

Таблица 2

Вырабатываемая энергия ветроустановкой в зависимости от скорости ветра

Диапазон скорости ветра, м/с	Средняя скорость ветра, м/с	Вероятность скорости ветра, %	Количество часов в году, ч	Мощность ВЭУ, кВт	Производство электро-энергии, кВт·ч
0–3	1,5	32,8	2882	0	0
3–6	4,5	36,5	3198	7,44	23 789
6–9	7,5	18,8	1647	34,45	56 735
9–12	10,5	8,3	727	94,52	68 724
12–15	13,5	2,5	219	200,89	4400
15–18	16,5	0,73	64	366,77	23 454
18–21	19,5	0,2	17	605,41	10 607
21–24	22,5	0,07	63	930,03	5703
Итого		100	8760		233 006

Для полного обеспечения электроэнергией электротехнического комплекса с потребляемой 679 140 кВт·ч, достаточно установить четыре ветроустановки в ряд. Рассчитаем энергию, вырабатываемую этими установками [7]:

$$Э_{ВЭС}(T) = m_{ВЭУ}\beta_1\beta_2\beta_3 Э_{ВЭУ1}(T), \qquad (13)$$

где $Э_{ВЭУ1}(T)$ — энергия, вырабатываемая одной ВЭУ; $m_{ВЭУ}$ — количество ВЭУ; β_1 β_2 β_3 — соответственно коэффициенты потерь энергии ВЭС, отн.ед., на взаимное влияние ВЭУ (аэродинамические потери) (0,7—1,0),

технический простой ВЭУ, вызванный поломкой ветроагрегата (0,95), потребление энергии на собственные нужды (0,97).

$$Э_{ВЭС}(T) = 4 \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,97 \cdot 233006,1 = 687\,088,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Из расчетов видно, что ветропарк из четырех ветроустановок может полностью обеспечить электроэнергией весь электротехнический комплекс.

Для обеспечения надежности электроснабжения предложен вариант использования дизельной генераторной установки в качестве дополнительного источника энергии [8]. Выбранная дизельная установка имеет номинальную мощность 200 кВт.

В дальнейшем необходимо будет полностью отказаться от дизельной установки, заменив ее использованием накопительных систем для обеспечения надежности электроснабжения. Также необходимо внедрить в данную систему Smart grid.

Литература

1. **Malsagov M., Titova G .**Feasibility of Using Hybrid Plants on the Basis of Renewable Energy Sources // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059182.
2. **СП 256.1325800.2016.** Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. АО «ЦНИИПромзданий», 2017. 92 с.
3. **Будзко И.А.** Электроснабжение сельского хозяйства. М: Колос, 2000.
4. **Приливные** электростанции / Л.Б. Берештейн, В.Н. Силаков, С.Л. Гельфер и др. М. Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
5. **Глобальная** метеорологическая СБД «NASA». [Электронный ресурс]. URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgibin/sse/grid.cgi?&email=na&step=1&p=&lat=43.509167&submit=&lon=46.327778.
6. **Расчет** ресурсов ветровой энергетики / В.И. Виссарионов, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин и др. М.: Издательство МЭИ, 1997. 32 с.
7. **Кудрин Б.И.** Электроснабжение: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Академия, 2012. 350 с.
8. **Эльбазуров А.Р., Титова Г.Р.** Анализ влияния земной поверхности на формирование ветра в Чеченской Республике // Федоровские чтения – 2018: XLVIII Международная научно-практическая конференция. М.: Издательский дом МЭИ, 2018.

А.Р. Эльбазуров, essame@yandex.ru,
Г.Р. Титова, TitovaGR@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СЕЛЕ КАРГАЛИНСКАЯ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Чеченская Республика, являясь одним из регионов России с уникальными природно-климатическими условиями, имеет большие потенциальные возможности для использования возобновляемых источников энергии: солнца, ветра, гидроэнергии и т.д. Наиболее перспективными среди них являются солнечная и ветровая энергия, которая в последнее время успешно развиваются во всем мире [1].

Территория Чеченской Республики относится к району со средним уровнем ветровой энергии. Характерной особенностью ветровой обстановки является неравномерность распределения скорости ветра по территории и интенсивности в различные периоды года.

Для того, чтобы говорить о целесообразности и эффективности использования ветроэнергетики, необходимо провести более глубокий анализ рассматриваемого региона с соответствующими расчетами и выбором схемы для электроснабжения потребителей.

Для эффективного анализа и использования ветровой энергии необходимо иметь исчерпывающую информацию о ветре как о природном процессе и источнике энергии. Характеристики, учитывающие природную структуру ветра и практические возможности использования энергии ветра в соответствии с РД 52.04.275–89 [2] подразделяется на три типа. К первому относятся общие климатические характеристики, необходимые для оценки теоретического (или валового) ветроэнергетического потенциала [3]:

- временные вариации скорости ветра;
- средняя скорость ветра $\overline{V}$, м/с;
- повторяемость скорости ветра $t(V)$, %;
- продолжительность (обеспеченность) скорости ветра O(V);
- повторяемость направлений ветра («роза» ветров) $t(\overline{V})$, %;
- поправочные коэффициенты, учитывающие изменение ветра по территории вследствие неоднородности подстилающей поверхности;
- вертикальный профиль средней скорости ветра;
- максимальная скорость ветра $V_{\tau}^{\max}$;
- удельная мощность $N_{\text{уд}}$ и удельная энергия ветра $Э_{\text{уд}}$;
- ветроэнергетические ресурсы района.

Ко второму типу относятся специализированные климатические характеристики, с помощью которых можно выбрать оптимальные режимы работы ВЭУ, т.е. характеристики для оценки технических ветроэнергетических ресурсов. К третьему типу климатических характеристик относятся характеристики для расчета конструкций ВЭУ на прочность и устойчивость (воздействия ветра). Рассмотрим первый тип климатических характеристик ветра, на базе которых осуществляется расчет основных энергетических характеристик ветра – удельной мощности и энергии ветрового потока.

Для оценки эффективности использования энергии ветра в селе Каргалинская Чеченской Республики воспользуемся глобальной метеорологической базой данных NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) [4], содержащей необходимые для оценки некоторые данные в период с 2008 по 2018 гг.

В таблице 1 приведена средняя скорость ветра по месяцам и годам в течение 10 лет наблюдений на высоте 10 м.

Таблица 1

Многолетние (10 лет) среднемесячные и среднемноголетняя скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли (м/с)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$\overline{V}, \overline{V_0}$	4,48	5,13	4,91	4,62	4,14	4,14	4,34	4,59	4,86	4,59	4,39	4,64	4,57

В таблице 2 приведена средняя скорость ветра по месяцам и годам в течение 10 лет наблюдений на высоте 50 м.

Таблица 2

Многолетние (10 лет) среднемесячные и среднемноголетняя скорости ветра на высоте 50 м над поверхностью земли (м/с)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$\overline{V}, \overline{V_0}$	6,17	6,87	6,53	6,26	5,68	5,67	5,89	6,27	6,70	6,47	6,24	6,51	6,27

В таблицах 3 и 4 приведены данные по повторяемости скоростей ветра на высоте 50 м и рядам трехчасовых наблюдений скоростей ветра на высоте 50 м для села Каргалинская Чеченской Республики.

Выполним расчет среднемноголетней удельной мощности на высоте $h = 50$ м (так как современные наземные ВЭУ могут достигать и еще большей высоты) разными методами для получения более достоверных результатов.

Таблица 3

Месячные и многолетняя повторяемости скорости ветра на высоте 50 м над поверхностью земли в пределах указанного диапазона (%)

$t(\vec{V})$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
0—2	6	7	8	10	10	14	14	12	10	10	7	6	9,5
3—6	44	45	52	55	58	59	57	58	55	53	49	43	52,3
7—10	43	38	32	30	27	22	21	22	28	31	36	41	31,0
11—14	7	10	7	5	5	5	7	8	6	6	8	9	7,0
15—18	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,3
19—25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0

Таблица 4

Среднемесячные скорости ветра на уровне 50 м над поверхностью земли для характерных часов (м/с)

Время, (ч:мин)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
01:30	7,24	7,39	6,97	6,38	6,45	6,43	6,31	6,22	6,48	6,58	7,09	7,52	6,75
04:30	7,15	7,14	6,16	4,96	4,45	3,98	3,91	4,15	5,14	5,95	6,85	7,48	5,60
07:30	5,49	5,07	4,34	4,63	4,80	4,47	4,40	4,34	4,23	3,96	4,83	5,56	4,67
10:30	4,95	5,27	5,46	5,88	5,68	5,03	4,99	5,25	5,39	5,42	4,75	4,57	5,21
13:30	5,62	5,75	5,81	5,82	5,57	4,87	5,16	5,55	5,58	5,59	5,44	5,43	5,51
16:30	6,82	6,76	6,16	5,91	5,52	5,03	5,67	6,24	6,15	6,21	6,68	6,96	6,17
19:30	7,22	7,27	6,72	6,52	6,17	5,93	6,53	6,77	6,56	6,55	7,13	7,40	6,72
22:30	7,27	7,33	6,88	6,40	6,23	6,05	6,11	6,13	6,21	6,50	7,15	7,46	6,63

При расчете удельной мощности различными методами принимается допущение: плотность воздуха ρ не меняется и равна 1,226 кг/м^3.

1. Расчет $\overline{N}_{\text{уд}}$ по ряду наблюдений (ряд трехчасовых наблюдений) за скоростью V_i, используя данные из табл. 4:

$$\text{Э}_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^{8760} N_{\text{уд}i} = \frac{1}{2}\rho \sum_{i=1}^{8760} V_i^3 \Rightarrow N_{\text{уд}} = \text{Э}_{\text{уд}} / (8760/3) =$$

$$= \sum_{i=1}^{2920} N_{\text{уд}i} / 2920 = \left(\frac{1}{2}\rho \sum_{i=1}^{2920} V_i^3\right) / 2920;$$

$$N_{\text{уд}} = \frac{0,5\cdot 1,226\cdot((7,24^3+7,15^3+5,49^3+4,95^3+5,62^3+6,82^3+7,22^3+7,27^3)\cdot 31+}{2920}$$

$$\frac{+(7,39^3+...+7,33^3)\cdot 28+(6,97^3+...+6,88^3)\cdot 31+...+(6,38^3+...+6,40^3)\cdot 30+}{2920}$$

$$\frac{+(7,52^3+...+7,46^3)\cdot 31)}{2920} = 137 \text{ Вт/м}^2.$$

Числа 31, 28, 31, 30 и т.д. означают число дней в месяце.

2. Расчет $\overline{N}_{\text{уд}}$ по многолетней повторяемости $t(V)$. Для каждого значения $\overline{V_j^{\text{гр}}}$, м/с, и $t(\Delta V_j^{\text{гр}})$, отн. ед., приведенных в табл. 3, рассчитывается удельная энергия $Э_{\text{уд}\,j}$, используя средние значения скоростей из диапазона скоростей. Посчитаем средние значения диапазонов скоростей, приведенных в таблице 3, запишем их в табл. 5.

Расчет выполнен на примере средней скорости, равной 1,5 м/с, из диапазона 0–2 м/с повторяемостью 9,5 % в году:

$$Э_{\text{уд}} = \frac{1}{2}\,\rho\, T \sum_{j=1}^{N^{\text{гр}}} \overline{(V_j^{\text{гр}})}^3\, t(\Delta V_j^{\text{гр}});$$

$$Э_{\text{уд}} = (0,5\cdot 1,226\cdot 8760\cdot 1,5^3\cdot(9,5/100))/1000 = 1,72 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^2.$$

$$N_{\text{уд}} = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^3;$$

$$N_{\text{уд}} = 0,5\cdot 1,226\cdot 1,5^3 = 2,07 \text{ кВт/м}^2.$$

Таблица 5

Результаты расчета удельной мощности и энергии

$\overline{V_j^{\text{гр}}}$, м/с	1,5	4,5	8,5	12,5	16,5	22
$t(\Delta V_j^{\text{гр}})$, %	9,5	52,3	31,0	7,0	0,3	0,0
$\overline{N}_{\text{уд}\,j}$, кВт/м^2	2,07	55,86	376,46	1197,27	2753,67	6527,22
$Э_{\text{уд}\,j}$, (кВт·ч)/м^2	1,72	255,92	1022,31	734,16	72,37	0,00

Годовая удельная энергия ветрового потока

$$Э_{уд} = 1,72 + 255,92 + 1022,31 + 734,16 + 72,37 = 2086,48 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/м}^2.$$

Годовая удельная мощность ветровой энергии

$$\overline{N}_{уд} = \frac{Э_{уд}}{T} = \frac{2086,48}{8760} = 0,238 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/м}^2 = 238 \text{ Вт/м}^2.$$

3. Расчет $\overline{N}_{уд}$ по значению среднемноголетней скорости ветра $\overline{V}_0$, используя данные из табл. 2:

$$\overline{N}_{уд} = \frac{1}{2}\rho\overline{V}_0^3;$$

$$\overline{N}_{уд} = \frac{1}{2} \cdot 1,226 \cdot 6,27^3 = 151 \text{ Вт/м}^2.$$

Среднемноголетняя удельная мощность ветрового потока $\overline{N}_{уд}$ служит исходной характеристикой общего уровня интенсивности ветра в рассматриваемом месте на высоте h = 50 м; но ней в первом приближении можно судить о перспективности использования ветровых ресурсов: если $\overline{N}_{уд} < 100$ Вт/м^2 — не рекомендуется, $\overline{N}_{уд} > 400$ Вт/м^2 — хорошие условия [5, 6].

Рассчитанная тремя способами, средняя удельная мощность ветрового потока составляет $\overline{N}_{уд}$ = 175 Вт/м^2. Как видно, по данному критерию удельная мощность ветрового потока в селе Каргалинская Чеченской Республики занимает промежуточное положение между хорошими условиями и «не рекомендуется». Соответственно для удовлетворения данному критерию необходимо провести дополнительное технико-экономическое обоснования использования ветровых ресурсов в рассматриваемом районе, но такие расчеты в данной статье пропустим и продолжим рассматривать следящие критерии, согласно которым целесообразно использование ветроэнергетики в рассматриваемом регионе.

Следующим критерием по оценке целесообразности использования ветровых ресурсов рассмотрим среднемноголетнюю скорость ветра $\overline{V}_0$, которая является основной исходной характеристикой интенсивности ветра в рассматриваемом месте; по ней в первом приближении можно судить о перспективности использования ветровых ресурсов. На первых этапах развития ветроэнергетики для системных ВЭУ принимались следующие ориентировочные значения среднемноголетних скоростей ветра в рассмат-

риваемой географической точке (φ_A^o, ψ_A^o) на высоте флюгера (h = 10 м): $\overline{V}_0 > 5$ м/с — хорошие условия для использования энергии ветра; $\overline{V}_0 < 4$ м/с — не рекомендуется использование энергии ветра; $4 < \overline{V}_0 < 5$ м/с — требуется экономическое обоснование для целесообразности использования энергии ветра [1, 7—9].

Согласно данным табл. 1 среднемноголетняя скорость ветра на высоте флюгера (h = 10 м) составляет 4, 57 м/с, и по вышеприведенному критерию требуется также экономическое обоснование. В соответствии с тем, что современные ВЭУ могут достигать высоты и до 130 м, за среднемноголетнюю скорость ветра возьмем скорость ветра на высоте 50 м и применим данный критерий. Как видно из табл. 2, скорость ветра на высоте 50 м уже составляет 6,27, что даже больше указанной в критерии. В соответствии с последним критерием в рассматриваемом районе целесообразно и перспективно использование ветровых ресурсов как источника электроэнергии.

Для работы в системе электроснабжения в рассматриваемом районе можно использовать ветроустановку Aeolos H 20KW высотой башни 50 м и номинальной мощностью 20 кВт.

Литература

1. **Ресурсы** солнечной и ветровой энергии Чеченской Республики / И.А. Керимов, М.В. Дебиев, Р.А.-М. Магомадов, Х.И. Хамсуркаев // Электронный журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. № 1.
2. **РД 52.04.275—89.** Методические указания проведения изыскательных работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для схем обоснования, схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии,1990. 70 с.
3. **Васьков А. Г, Дерюгина Г, В., Малинин Н. К**. Ветроэнергетика: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2016. 384 с.
4. **NASA** Prediction Of Worldwide Energy Resources. [Электронный ресурс]. URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (дата обращения: 11.10.2019)
5. **Wegley H.L., Ramsdell J.V., Orgill M.M.** R. L. Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems / Drake. Battelle: US DOE. 1980.
6. **Эльбазуров А.Р., Титова Г.Р.** Использование возобновляемых источников энергии для эффективного функционирования промышленности Чеченской Республики // Федоровские чтения − 2017: XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 15−17 ноября 2017 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2017.
7. **Эльбазуров А.Р., Титова Г.Р.** Анализ влияния земной поверхности на формирование ветра в Чеченской Республике // Федоровские чтения − 2018: XLVIII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 14−16 ноября 2018 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2018.

8. **Штанникова О.О.** Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат,1989. 80 с.
9. **Безруких П.П.** Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб.: Наука, 2002. 314 с.

А.В. Шалухо, shaluho.andrey@mail.ru,
Н.И. Эрдили, erdili.ni@yandex.ru,
А.С. Власов, lion32211@yandex.ru,
НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В России расширение использования установок РГ прежде всего направлено на повышение качества электроснабжения удаленных потребителей. Особенностью систем с РГ являются многосторонние перетоки мощности и большая доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) со стохастическим характером генерации. Стохастический характер ВИЭ обусловлен зависимостью выработки электроэнергии от погодных условий. При определенных погодных условиях возможно как полное прекращение выработки электроэнергии, так и появление гипергенерации (производства избыточного количества электроэнергии). Это создает проблему управления режимами работы систем с РГ.

Объектом исследования является система с РГ напряжением 0,4−10 кВ, объединяющая энергетические ячейки малой мощности (до 1 МВт). В состав объекта входят:

- энергоячейки с ВИЭ: ветроэнергоустановка, солнечная электростанция;
- энергоячейки с управляемой генерацией (ГПУ);
- энергоячейки с твердооксидными топливными элементами (ТОТЭ);
- накопители электроэнергии: аккумуляторные батареи (АКБ);
- нагрузка: потребители электрической энергии (ПЭЭ).

Цель работы заключается в разработке мультиагентного подхода для обеспечения эффективной работы системы за счет управления выработкой, потреблением и перераспределением электроэнергии.

На рисунке 1 представлена структурная схема объекта исследования.

Для управления системой с РГ могут быть использованы централизованная, децентрализованная и распределенная системы управления (СУ). Применение централизованной СУ целесообразно на высоком уровне напряжения 110(220) кВ. На напряжении 0,4—10 кВ предлагается применение децентрализованной и распределенной СУ.

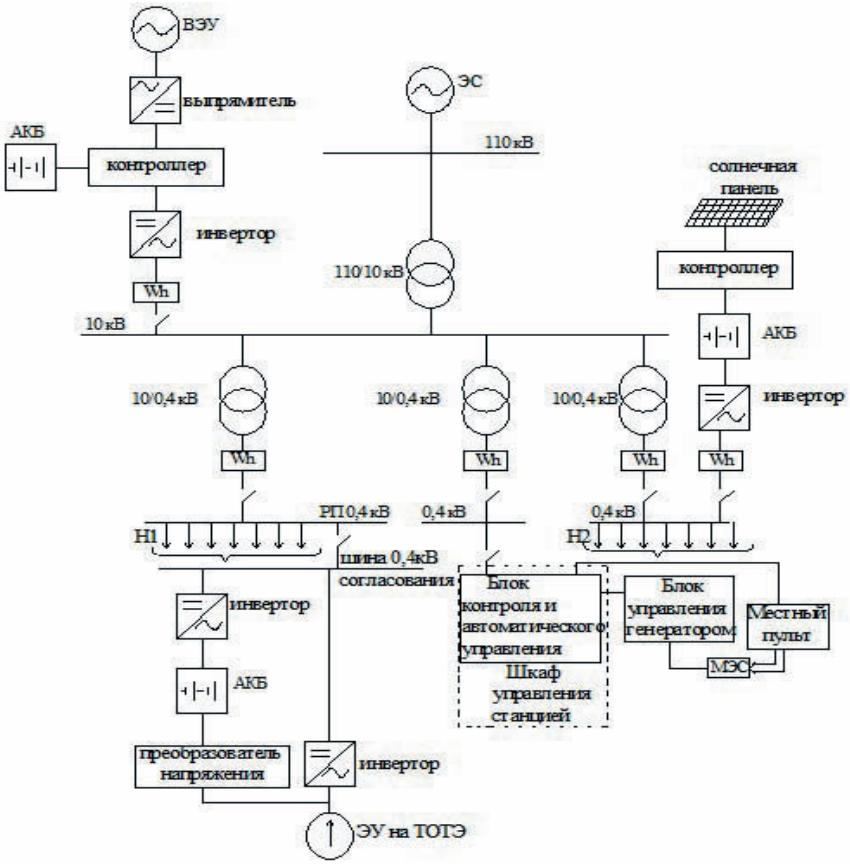


Рис. 1. Структурная схема объекта исследования: ЭУ — ветроэнергетическая установка; АКБ — аккумуляторная батарея; ЭС — энергосистема; МЭС — мини-электростанция; ТОТЭ — энергоустановка на твердооксидных топливных элементах; Н1 — поселок с фермерским хозяйством; Н2 — деревоперерабатывающее предприятие

Для исследуемой системы предложено использовать распределенную СУ на основе мультиагентного подхода, представляющую собой интеллектуальную распределенную динамическую систему, основанную на взаимодействии друг с другом автономных агентов [1].

Одно из наиболее общепринятых определений «агента» представлено в [2]. Здесь под агентом понимается «любая сущность, которая находится в некоторой среде, воспринимает ее посредством сенсоров, получая данные, которые отражают события, происходящие в среде, интерпретирует эти данные и действует на среду посредством эффекторов». Таким образом,

считается, что агент способен воспринимать информацию из внешней среды, обрабатывать ее на основе собственных ресурсов, взаимодействовать с другими агентами и воздействовать на среду, преследуя свои собственные цели.

Агент должен обладать следующими свойствами:

- автономность: агент является самоуправляющимся объектом;
- реактивность: способность реагировать на изменения во внешней среде;
- целенаправленность: поведение агента подчинено определенной цели;
- коммуникативность: способность общаться с другими агентами [3].

Согласно теории мультиагентной системы управления (МАСУ) считается, что каждый агент имеет лишь частичное представление о состоянии системы, поэтому он может решить лишь некоторую часть общей задачи. В связи с этим для решения сложной задачи необходимо создать некоторое множество агентов и организовать между ними эффективное взаимодействие, что позволит построить единую многоагентную систему. В таких системах весь спектр задач по определенным правилам распределяется между всеми агентами, каждый из которых считается членом рассматриваемой системы.

Цель МАСУ заключаются в соблюдении критериев эффективности системы и достижении агентами своих целей. Основными достоинствами МАСУ являются:

- гибкость функционирования;
- быстрота принятия решения;
- оперативное взаимодействие между агентами;
- возможность агентов самообучаться и учитывать опыт предыдущих взаимодействий с средой при использовании искусственных нейронных сетей;
- возможность автономной работы агентов;
- оптимальное распределение задач;
- простота наращивания емкости системы.

Основными составляющими мультиагентного подхода являются: множество организационных единиц, в котором выделяются подмножество агентов, манипулирующих подмножеством объектов, множество задач; среда, т.е. некоторое пространство, в котором существуют агенты и объекты; множество отношений между агентами; множество действий агентов (например, операций над объектами).

Согласно теории мультиагентных систем агент может быть представлен как

$$Agent = \{G, B, S, A, P, C, \alpha\},$$

где G — целевая функция агента (цели деятельности агента); B — убеждения агента (восприятие окружающей среды); $S = \{s_1, s_2, \ldots s_n\}$ — набор параметров состояния; $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \ldots \alpha_n\}$ — набор действий агента; P — база знаний агента; C — механизм взаимодействия агента с другими агентами; α —ператор.

В дальнейшей работе предполагается исследовать параметры системы с распределенной генерацией в следующих режимах:

1 режим: раздельный режим работы;

2 режим: есть только генерация от ВИЭ, нет питания от ЭС;

3 режим: есть только генерация от установки на ТОТЭ и ГПУ, нет питания от ЭС;

4 режим: питание от ЭС, есть генерация от установки на ГПУ.

Литература

1. **Фишов А.Г., Мукатов Б.Б.** Реконфигурация электрических сетей с распределенной генерацией и мультиагентным управлением // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 143−152.
2. **Rassel S., Norvig P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. Moscow: Williams Publishing House, 2006.
3. **Воропай Н.И., Колосок И.Н., Панасецкий Д.А.** Мультиагентные технологии в исследованиях электроэнергетических систем и управлении ими // ИСЭМ СО РАН, 2014.

А.А. Семеренко, SemerenkoAA@mpei.ru,
И.К. Мургов, MurgovIK@mpei.ru,
М.В. Володарский, VolodarskyMV@mpei.ru,
Ю.В. Кошарная, KosharnyaYV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В последнее время в России стремительно увеличивается число предприятий, которые имеют собственную генерацию или всерьез задумываются о включении в свой состав объекта по производству электрической энергии. Это вызвано несовершенством законодательной базы и наличием административных барьеров (из-за которых потребители лишены возможности гибкого регулирования выделенной мощности согласно потребностям и получения необходимой мощности в полном объеме от сетевой организации), а также увеличивающейся стоимостью электроэнергии [1].

Одним из вариантов решения данной проблемы является развитие распределенной генерации, которая дает существенные экономические и технологические преимущества, позволяет потребителям минимизировать затраты на передачу электроэнергии и обеспечить требуемую мощность как для самого энергокомплекса предприятия, так и для присоединенных к его сетям субабонентов. Возникает потребность в регулировании и контроле появляющихся энергокомплексов, в утверждении нормативно-правовых документов, регламентирующих условия создания, функционирования и развития на розничных рынках электрической энергии активных энергетических комплексов. Для этой цели было принято Постановление Правительства РФ от 21.03.2020 г. № 320 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов» [2].

Рассмотрим вышеуказанное постановление с точки зрения интересов потребителей и, соответственно, энергетических комплексов. Активный энергетический комплекс образуют электростанция и энергопринимающие устройства промышленных предприятий, административно-деловых и торговых центров при выполнении следующих условий:

- все объекты активного энергетического комплекса имеют между собой электрические связи через объекты электросетевого хозяйства, не принадлежащие сетевой организации;
- регулирование производства и потребления электрической энергии (мощности) осуществляется с применением управляемого интеллектуального соединения активного энергетического комплекса;
- места установки, схемы подключения и характеристики устройств и компонентов управляемого интеллектуального соединения активного энергетического комплекса должны соответствовать требованиям к управляемому интеллектуальному соединению активного энергетического комплекса, установленным уполномоченным федеральным органом исполнительной власти.

Проблема перехода потребителей на малую генерацию очень актуальна на сегодняшний момент для сетевых организаций, так как образованные активные энергетические комплексы уходят из общего поля потребления электроэнергии и выпадают из объемов услуг по передаче [3]. Чтобы избежать этого, новый документ [2] устанавливает полный контроль сетевых организаций и объектов диспетчеризации над энергокомплексами с малой генерацией, а также над величиной разрешенной к единовременному использованию мощности для потребителей и энергетического комплекса в целом, что противоречит самой цели, которую ставит перед собой распределенная генерация.

Так как данное постановление является пилотным проектом, то управляемое интеллектуальное соединение, с помощью которого будет осуществляться регулирование производства и потребления электрической энергии, только будет разрабатываться с помощью реестра активных энергокомплексов, который будет сформирован по жестким требованиям, описанным в [2]. В настоящий момент решение проблемы разработки нормативно-технических требований к характеристикам устройств и компонентов управляемого интеллектуального соединения активного энергетического комплекса (УИС АЭК) возложены на Министерство энергетики РФ и на Системного оператора ОРЭМ, однако конечный исполнитель-разработчик не назван.

Резюмируя вышеизложенное, можно с уверенностью сказать, что положения постановления Правительства РФ от 21.03.2020 г. № 320 на данный момент не регламентируют ни нормативные, ни технические требования к созданию интеллектуальных систем управления режимами активных энергетических комплексов. Кроме того, идея создания в постановлении [2] требований к УИС АЭК предполагает закрытие вопросов, связанных с устойчивостью внешних электрических сетей и возможностью реализации внешних управляющих воздействий на системы электропотребления предприятий с малой генерацией, в том числе ограничивающего характера. Однако это не решает проблемы устойчивости режимов работы систем электроснабжения и электропотребления самих владельцев объектов распределенной генерации. Поэтому к Постановлению Правительства РФ от 21 марта 2020 г. № 320 имеются существенные замечания, без ликвидации которых достижение поставленной цели по организации функционирования активных энергетических комплексов будет трудно достигнуть.

Литература

1. **Нюшлосс Д., Ряпин И.Ю.** Развитие распределенной генерации. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2012. 31 с.
2. **Постановление** Правительства РФ от 21 марта 2020 г. № 320 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов».
3. **Веселов Ф.В., Панкрушина Т.Г., Золотова И.Ю.** Тарифная политика в электросетевом комплексе как фактор инвестиционной привлекательности источников распределенной генерации в ЕЭС России // Промышленная энергетика. 2018. № 11. С. 2—10.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. **ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Гальперова Е.В., Мазурова О.В. Методический подход к прогнозированию спроса на электроэнергию с учетом региональных особенностей в условиях роста неопределенности 3

Гнатюк В.И. Комплексная оценка процесса электропотребления техноценоза на основе исследования рангового гиперпараметрического распределения 11

Кивчун О.Р. Управление электропотреблением энергосистемы на основе мониторинга результатов процедур рангового анализа 21

Старкова А.Ю., Чегодаев А.А., Насыров Р.Р. Перспективы развития распределенной энергетики в Российской Федерации 29

Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Избасарулы Н. Развитие электрических сетей южного региона Казахстана 36

Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х., Шилин А.Н. Анализ современного состояния аварийности силового электрооборудования трансформаторных подстанций на примере Астраханской области 43

Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г. Электромагнитный спектральный метод диагностики генераторов электростанций 50

Соснина Е.Н., Шумский Н.В., Семенов И.И. О разработке ААСУ ИРПМ для распределительных электрических сетей сложной конфигурации 57

Каракулова Ю.Ю. Выравнивание оптовых тарифов на электроэнергию по территории энергосистемы 62

Хорьков С.А. Методология принципа самоподобия в исследовании электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия 65

Исаев А.С., Фатюшина Е.Ю. Методические проблемы организации учебных курсов в СДО 72

Секция 2. **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ**

Гнатюк В.И., Иващенко А.А. Методика МС-прогнозирования в оценке эффективности расходования энергетических ресурсов организационно-технических систем западного сектора Арктики России 79

Птицын Д.В., Птицына Е.В., Кувалдин А.Б. Эффективные режимы систем обогрева 91

Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Об оптимальном управлении шунтирующими реакторами линии электропередачи 98

Андреева Е.Г., Семина И.А. Энергоэффективные магнитные системы открытого типа для обработки и управления наножидкостями 107

Кувалдин А.Б., Федин М.А., Кулешов А.О., Кондрашов С.С., Чень Б. Структурная модель высокочастотного индукционного нагревателя для синтеза нанопорошков 112

Шураханова С.Е., Жармагамбетова М.С. Энергосбережение и повышение энергоэффективности — ключи для решения проблем в электроэнергетике 118

Денисова А.Р., Савин Н.А., Афонина Н.К. Энергоэффективная система автоматического регулирования светового потока светодиодных светильников 121

Иванова Г.С., Егоров М.С. Влияние качества электрической энергии на электрические источники света 127

Саввин Н.Ю. Повышение энергоэффективности пластинчатых теплообменников в инженерном оборудовании зданий 129

Маркелова О.В., Сандаков В.Д. Сравнительный анализ электрических озонаторов для очистки газовых сред промышленных предприятий 132

Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Жмурко И.Е., Кондрашов С.С., Кислов А.П. Разработка методики расчета индукционной установки для оплавления коррозионно-стойких покрытий 139

Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Ремизов А.Е., Фетисов М.В. Особенности применения индукционного нагрева при исследованиях элементов теплообменников 146

Денисова А.Р., Сидоров А.Е., Закирова З.Р. Перспектива модернизации системы освещения в промышленных отраслях с применением светодиодных источников света 151

Володарский М.В., Семеренко А.А., Муругов И.К., Кошарная Ю.В. Интеллектуальные системы учета электроэнергии — современные требования 156

Секция 3. **РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ**

Ершов М.С., Мелик-Шахназарова И.А., Малахов А.С. Моделирование цифровой защиты промышленной электротехнической системы 160

Ершов М.С., Чернев М.Ю., Чумаченко В.В. Обзор и совершенствование анализа электромагнитной обстановки в системе электроснабжения объекта нефтепереработки 166

Крюков О.В., Саушев А.В. Методология вейвлет-преобразования при анализе автоматизированных электроприводов 174

Вахнина В.В., Горохов И.В. Оценка дополнительных потерь активной мощности в однофазном силовом автотрансформаторе при воздействии квазипостоянных токов 178

Вахнина В.В., Бычков А.В., Федяй О.В. Анализ воздействия квазипостоянного тока на блок синхронный генератор — силовой трансформатор 182

Дайнеко А.В. Анализ влияния геоиндуцированного тока на искажение синусоидальной формы кривой напряжения на шинах силового трансформатора 187

Белашов В.Ю. К вопросу о дифракции низкочастотного электромагнитного поля на проводящих объектах ЭЭС 191

Старкова А.Ю., Тульский В.Н. Разработка аппаратно-программного комплекса «Система оценки надежности воздушных линий электропередачи» 199

Сергеева М.М., Самойлов А.А. Устройство повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи за счет учета термической нагрузки 205

Младзиевский Е.П., Рыжкова Е.Н. Применение комбинированного заземления нейтрали как способ борьбы с перенапряжениями при больших расстройках компенсации 208

Золин Д.С. Анализ перспектив внедрения средств автоматизации в области управления системами заземления нейтрали в сетях среднего напряжения 215

Лыков Ю.Ф. Сеть 0,4 кВ с изолированной нейтралью для питания собственных нужд подстанций 222

Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н. Функциональные схемы электротехнических устройств на основе катушки-конденсатора (каткона) 228

Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н. Проектирование электротехнических устройств на основе каткона 241

Белогловский А.А., Белоусов С.В., Таратонкина К.И. Изучение лавинно-стримерных переходов в воздухе средствами математического моделирования. Часть I: Оценка критического числа электронов в лавинах 255

Белогловский А.А., Глушкова А.Е., Галимова А.В. Изучение лавинно-стримерных переходов в воздухе средствами математического моделирования. Часть II: Исследование процесса перехода 263

Белова О.С., Темников А.Г., Черненский Л.Л. Исследование радиальной стримерной короны разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей. Электрические характеристики 270

Белова О.С., Темников А.Г., Черненский Л.Л. Исследование влияния радиальной стримерной короны на спектральные характеристики разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей 278

Немировский А.Е., Кичигина Г.А., Сергиевская И.Ю., Мищенко Д.Н. Устройство электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований 285

Денисова А.Р., Фархутдинов А.Р. Внедрение систем АСКУЭ на подстанциях ПАО «Татнефть» с использованием устройства i-TOR 290

Татевосян А.А. Расчет и проектирование тихоходного синхронного магнитоэлектрического двигателя в составе привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора 294

Жабборов Т.К., Исмоилов И.К. Анализ статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем с использованием системы математического моделирования и описание исследуемого объекта в среде Simulink 302

Гараев И.З., Иванова В.Р. Технические аспекты применения частотных преобразователей 303

Абубякярова Д.И., Сандаков В.Д. Сравнительный анализ линейных шаговых двигателей для промышленных предприятий 308

Тимонин А.С. Способ защиты систем электроснабжения TN—C—S путем трансформации в систему TT с помощью защитного вводного разнономинального коммутационного аппарата 315

Булычева Е.А., Янченко С.А. Генератор троичной импульсной последовательности для определения источников несинусоидальности в электрических сетях 319

Мейсам И. Предпосылки для использования электропередач постоянного тока в Сирии 325

Кузнецова А.М., Вихров М.Е. Классификация приемников электроэнергии по характеру функционирования на постоянном токе 326

Записочный Е.Д., Кулага М.А. Мероприятия по улучшению качества электроэнергии в сети объекта с дуговыми сталеплавительными печами 328

Кутейников П.Д., Кулешова Г.С. Уточнение значений поправочного коэффициента при выборе сечений проводников 336

Секция 4. **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Анисимова Н.А., Варганова А.В. Прогнозирование оптимальных режимов работы промышленных энергоузлов с собственными тепловыми электростанциями и потреблением мощности из энергосистемы 341

Газизова О.В., Соколов А.П. Особенности регулирования напряжения на промышленных электростанциях при различной реактивной загрузке генератора 346

Хорьков С.А., Преснухин В.К., Зарипов Т.Ф. Исследование структурной надежности схемы выдачи мощности блоком ПГУ-230 351

Костюков В.Д., Кретов Д.А. Технико-экономический анализ периода окупаемости газотурбинных установок 359

Аверьянов Д.А., Бурмейстер М.В., Булатов Р.В., Ильин С.В. Влияние мобильных газотурбинных электрических станций на условия динамической устойчивости энергообъединения 367

Ковалев А.А., Панченко В.А. Комбинированное использование возобновляемых источников энергии для производства энергоносителей 371

Зиновьев В.В., Бартенев О.А. Модельно-экспериментальное исследование солнечных фотоэлектрических преобразователей на основе W-функции Ламберта для прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики 378

Шестакова В.В. Изучение последствий производства и эксплуатации солнечных фотоэлектрических панелей 387

Рудаков А.И., Спиридонов Р.Р., Киселев И.Н. Современное состояние и перспективы развития двигателей внешнего сгорания (машин Стирлинга) 392

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д., Калашников Д.А., Рощубкин П.В., Сингатулин Р.С., Сапрыка В.А. Перспективы использования ротора Савониуса при создании компактных генераторных установок 398

Сангов Х.С., Исмоилов Ф.О. Обеспечение электроэнергией труднодоступных, малонаселенных и удаленных регионов Республики Таджикистан 403

Титова Г.Р., Байбиченков А.Р. Применение гибридных электротехнических комплексов для электроснабжения инфраструктуры Крайнего Севера 413

Эльбазуров А.Р., Титова Г.Р. Критерии оценки использования ветроэнергетики в системе электроснабжения в селе Каргалинская Чеченской Республики 419

Шалухо А.В., Эрдили Н.И., Власов А.С. Разработка мультиагентного подхода для управления системой с распределенной генерацией 425

Семеренко А.А., Муругов И.К., Володарский М.В., Кошарная Ю.В. Оценка условий функционирования активных энергетических комплексов 428