



ЭЛЕКТРО ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИЯ

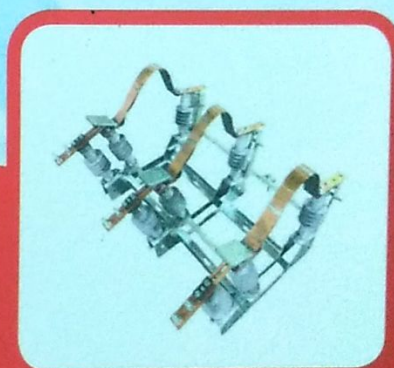
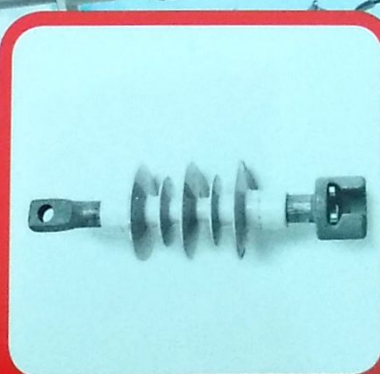
ISSN 2218-3116

№ 3 (72), май-июнь 2022



АРМАТЕХ
НИЛЭД

16+



www.n-sip.ru



ПРОИЗВОДИМ В РОССИИ

Комплексные решения
для надежности
распределителей

Инновации
от российских
производителей

Роботы
на службе
у энергетиков

Оценка уровня нелинейных искажений электроустановок на основе моделирования длительности импульса их входного тока

УДК 621.311.1:621.316

В работе осуществлено моделирование длительности входного тока электроустановок промышленной частоты и разложение его в ряд Фурье в программе PSCAD с последующим вычислением коэффициента нелинейных искажений. Построена зависимость коэффициентов нелинейных искажений и коэффициента мощности от длительности импульса входного тока в пределах от 0,04 до 10 мс. Показано, что при уменьшении длительности входного тока менее 5 мс начинается экспоненциальное увеличение эмиссии высших гармоник в электросеть.

Тукшаитов Р.Х.,
профессор кафедры
«Электрооборудование
и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Семенова О.Д.,
аспирант кафедры
«Электрооборудование
и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Новокрещенов В.В.,
аспирант кафедры
«Электрооборудование
и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Ключевые слова:

входной ток, моделирование, длительность импульса, ряд Фурье, коэффициент нелинейных искажений, коэффициент мощности

Коэффициент нелинейных искажений является одним из важных показателей, применяемых для характеристики качества электричества [1–3]. Принято считать, что увеличение уровня эмиссии высших гармоник в электросети вызвано все большим применением устройств силовой электроники. Последнее ведет к увеличению погрешности измерительных приборов (анализаторов качества электроэнергии, электросчетчиков и др.), снижению ресурса и надежности работы электрооборудования, фильтрокомпенсирующих устройств и телекоммуникационных систем.

В литературе нередко повышенный уровень коэффициента нелинейных искажений по току во входной цепи преобразователей напряжения объясняют также активным внедрением импульсных источников питания. Следует отметить, что в последних инверторы напряжения, как правило, работают на частоте 40–50 кГц, в то время как эмиссия высших гармоник (ВГ) в электросеть происходит на частотах, кратных 50 Гц. В действительности значительным источником эмиссии ВГ в преобразователях напряжения являются только входные выпрямительные цепи электронных устройств независимо от того, к каким типам

их относят — к импульсным или линейным [4, 5]. Приписывать высокую эмиссию ВГ нелинейным свойствам применяемого электрооборудования также неправомерно по той причине, что при длительности полупериодов тока, равной длительности полупериодов питающего напряжения, значение коэффициента нелинейных искажений электрооборудования (силовых трансформаторов, электродвигателей и др.) сравнительно небольшое и не выходит за пределы 50% [4], что соответствует по ГОСТ 32144-2013 нормативному значению коэффициента мощности (равному 0,90) при работе на активную нелинейную нагрузку. Значение коэффициента мощности начинает выходить за указанный предел только тогда, когда длительность входного тока в преобразователях напряжения принимает импульсный характер, а точнее, когда длительность импульса тока во входной цепи электроустановки становится меньше длительности полупериода синусоидального напряжения питания. Это явление начинает проявляться только при применении на выходе выпрямителя сглаживающего конденсатора и по мере увеличения его емкости [5].

В выпускаемых анализаторах качества электроэнергии все

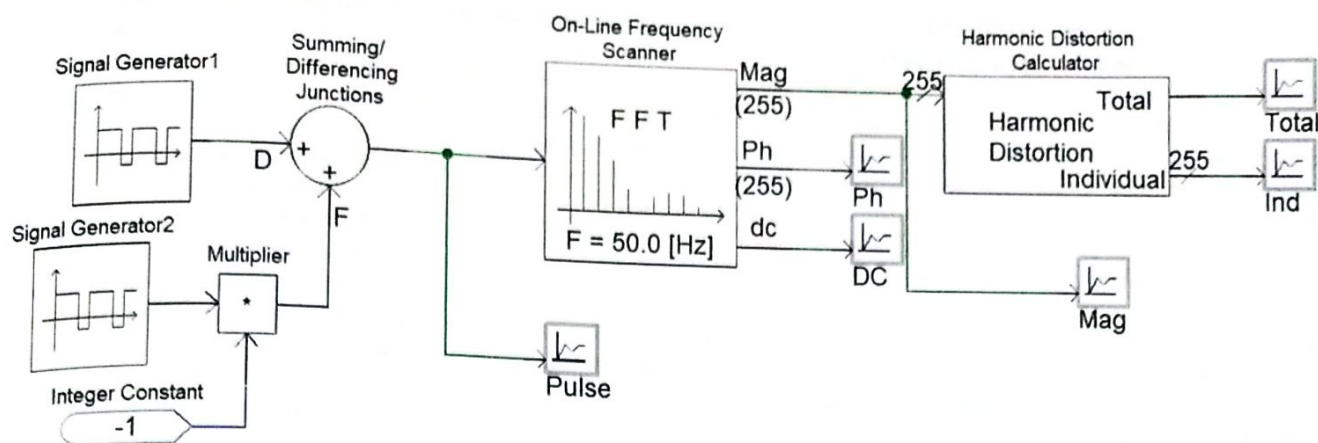


Рис. 1. Модель вычислительной установки, построенная в среде PSCAD

больше наблюдается тенденция в повышении верхнего предела измерения коэффициента нелинейных искажений по току (K_i) и даже по напряжению (K_u). Если в первых анализаторах качества электроэнергии (АКЭ) верхний предел их измерения выбирался равным 50%, то затем он был увеличен до 100%, а в отдельных и до 200%. Во многих последних моделях АКЭ (например, типа Fluke 1738) верхние пределы измерения K_i и K_u выбраны практически завышенными и равными 1000%.

В своей измерительной практике при изучении характеристик разного электрооборудования наибольшие значения K_i были получены (в частности, у светодиодных ламп) равными 200–230% [6, 7]. Более высокие его значения в технической литературе до сих пор не встречали. Что касается коэффициента K_u в низковольтных электросетях, то он характеризует качество энергии только в местах присоединения соответствующего токоприемника, и его значение находится на уровне 1,5–2,5%. В отдельных цепях оборудования нефтедобывающей промышленности он достигает 5–10% [8, 9] и только в единичных публикациях приводится равным 20% [10] и даже 50% при моделировании работы преобразователей судо-

вых электродвигателей [11]. Применение разработчиками АКЭ с верхним пределом для измерения K_i и, особенно K_u , равным 1000%, скорее является их маркетинговым приемом.

В [5] с целью пояснения места формирования ВГ и устранения имеющегося разночтения была изучена зависимость коэффициента мощности от значения емкости конденсатора, устанавливаемого на выходе преобразователей напряжения. Показано, что коэффициент мощности значительно снижается по мере повышения емкости конденсатора и, соответственно, уменьшении длительности импульса входного тока устройства. Однако количественное описание в данной работе связи между коэффициентами мощности (λ), коэффициентами нелинейных искажений и длительностью импульса входного тока электроустановок отсутствует.

В связи с этим представляет научный и практический интерес исследование характера зависимости значений коэффициентов K_i и λ от длительности импульса входного тока преобразователей напряжения промышленной частоты, имеющей место в разных электроустановках, и ее графического отображения.

На правах рекламы

Разъединитель с моторным приводом

СКАДА система

Радиоканал 433 МГц

Комплект РКЗ

МЭК 60870-5-101/104

сделано в России

Лыткаринский
арматурно-изоляторный завод

Регистраторы короткого замыкания АМКА-ОЗЗ-20У и модуль управления разъединителем и приема-передачи данных АМКА-МТ-21 для применения в устройствах управляемого секционирования при цифровизации распределительных сетей

+7 495 627-78-20
1@laiz.ru | 7@laiz.ru

МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычисления коэффициента K_i для соответствующих длительностей импульса входного тока проводились в программе PSCAD, аналогичной MATLAB, но предназначенной для решения энергетических задач. Входной сигнал симметричной формы был сформирован с помощью двух генераторов импульсов прямоугольного сигнала (рисунок 1), один из которых (Generator 1) выдавал положительный полупериод, а другой (Generator 2) — отрицательный сигнал, путем умножения на минус 1 и последующего их суммирования (рисунки 2–5) посредством блока Summing/Differencing Junctions.

Форма сигналов регистрировалась с помощью осциллографа Pulse. Длительность импульса тока уменьшалась ступенчато от 10 мс до 0,04 мс. Необходимость определения спектра тока такой малой длительности вызвана использованием в анализаторах большого верхнего предела K_i , равного 1000%, а это, в свою очередь, потребовало необходимости разложения силы тока в ряд Фурье посредством блока On-Line Frequency Scanner с точностью до 255-й гармоники включительно. Осциллограф Mag реги-

стрировал значения гармоник с 1-й по 255-ю включительно. В блоке On-Line Frequency Scanner борьба с явлением Гиббса осуществлялась путем сглаживания входного сигнала и использования метода линейной интерполяции.

Вычисление коэффициента нелинейных искажений осуществлялось с помощью блока Harmonic Distortion Calculator. Результаты выводились на экран осциллографом Total. Для устранения влияния реактивности нагрузки на результаты вычисления Generator 1 и Generator 2 были нагружены только на активную линейную нагрузку. Время дискретизации в модели выбрано равным 1 мкс.

Предлагаемое решение задачи для наглядности осуществлялось применительно непосредственно к промышленной частоте питания электрооборудования, равной 50 Гц. В общем, в наиболее наглядном и первоначальном виде коэффициент мощности можно представить достаточно простым выражением:

$$\lambda = \varepsilon \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где ε — коэффициент мощности искажения, $\cos \varphi$ — сдвиг фазы первой гармоники тока относительно напряжения питания. Данная формула относительно других широко приводимых выражений наглядно поясняет механизм влияния $\cos \varphi$ и ε — на коэффициент мощности. Следует отметить, что она все еще отсутствует в 52 просмотренных учебных пособиях по ТОЭ, изданных за последние 60 лет [5]. Что касается учебника Бессонова Л.А., претерпевшего 12 изданий и используемого в ряде вузов в качестве базового пособия, то в нем, к сожалению, вообще отсутствует подраздел, посвященный изложению коэффициента мощности.

Коэффициент ε , с одной стороны, пока непосредственно не измеряется современными АКЭ, а с другой стороны, он для практики малоприменим, так как изменяется, как правило, в небольших пределах от 0,9 до 1,0. В то же время K_i , с одной стороны, — контролируемый современными АКЭ параметр, а с другой стороны, кратность его изменения достигает нескольких порядков. Поэтому формулу (1) целесообразно преобразовать и представить ее через K_i .

Для этого воспользуемся выражением K_i [12], представленным в виде:

$$K_i = 100\% \cdot \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \varphi}{\lambda}\right) - 1}. \quad (2)$$

Для упрощения преобразования K_i для получения λ примем, что нагрузка, подсоединяемая к ЭС, является активной линейной, то есть $\cos \varphi$ равен 1,0. При учете этого фактора и преобразовании (2) относительно λ , получим выражение, приведенное также в [13]:

$$\lambda = \frac{1}{K_i^2 + 1}. \quad (3)$$

В процессе моделирования импульса разной длительности в PSCAD коэффициент K_i вычислялся по общеизвестной формуле [1]:

$$K_i = 100\% \cdot \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}. \quad (4)$$

Результаты вычисления λ , выполненные на основе формулы (3), заносились в таблицу 1.

Табл. 1. Значения K_i и λ при разных длительностях импульсного входного тока электроустановок

Относительная длительность импульса тока, %	Абсолютное значение длительности импульса, мс	Коэффициент нелинейных искажений (THD), %	Коэффициент мощности (λ)
100	10	1,0	0,9999
100	10	2,0	0,9998
100	10	3,0	0,9990
100	10	5,0	0,9986
100	10	10	0,9952
100	10	15	0,989
100	10	20	0,980
100	10	28	0,961
100	10	48	0,905
90	9,0	37	0,940
80	8,0	30	0,960
74	7,4	28	0,961
70	7,0	29	0,960
60	6,0	36	0,943
50	5,0	48	0,905
40	4,0	65	0,841
30	3,0	89	0,750
20	2,0	125	0,629
10	1,0	200	0,511
5,0	0,50	298	0,332
3,5	0,35	360	0,271
2,0	0,20	479	0,225
1,0	0,10	673	0,193
0,8	0,08	747	0,131
0,4	0,04	991	0,100

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для наглядности на рисунках 2–5 выборочно представлена форма импульсного входного тока в выпрямительном устройстве электронных преобразователей напряжения разного назначения. Обычно увеличение длительности входного тока выпрямителей напряжения происходит по мере уменьшения значения емкости его сглаживающего конденсатора [5].

На практике добиться длительности импульса входного тока менее 0,1–0,2 мс достаточно сложно, так как время заряда конденсатора определяется преимущественно емкостью конденсатора, и во многих случаях оно будет соизмеримо уже с длительностью импульса тока или даже превышать его. В силу этого действительное значение K_i будет несколько меньше расчетного, а значение λ , наоборот, несколько больше. Это склоняет к мысли, что значение K_i , равное 1000%, на практике не достижимо. Соотношение длительностей заряда и разряда будет несколько изменяться в зависимости от величины отношения реактивной нагрузки к активной (X/R), что дополнительно скажется на некотором уменьшении значений результатов измерения.

Результаты вычисления K_i и λ для длительности импульса тока от 100% длительности полупериода до 0,04% представлены в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, при уменьшении длительности импульса входного тока со 100% полупериода до 0,4% или до 0,04 мс происходит увеличение значения K_i с 47% до 991%. Коэффициент K_i при прямоугольной форме тока и длительности 74% полупериода, оказывается, имеет то же значение, что и при небольшом уровне искажения синусоидальности тока (относительная длительность — 100%) за счет совпадения их спектров. В верхней части таблицы 1 приведены данные для случаев, когда происходит постепенное повышение искажения синусоидальности формы входного тока.

Для наглядного представления характера зависимости K_i электрических установок от длительности импульса полупериода на рисунке 6 графически представлена зависимость между ними.

Из данного рисунка следует, что по мере уменьшения длительности входного тока, начиная с 50%, значение K_i экспоненциально возрастает.

Таким образом, источником повышенного уровня ВГ в электросети являются входные цепи преобразователя напряжения, когда длительность импульса

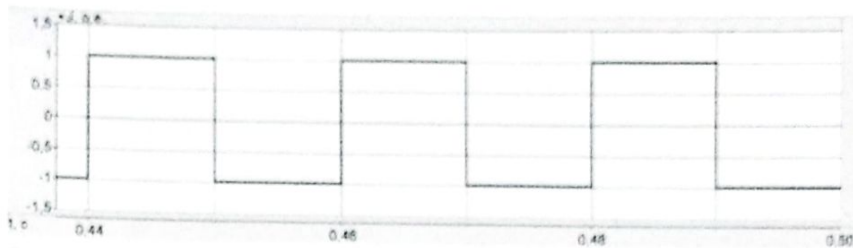


Рис. 2. Форма входного тока при 100% длительности импульса полупериода и K_i , равном 48%

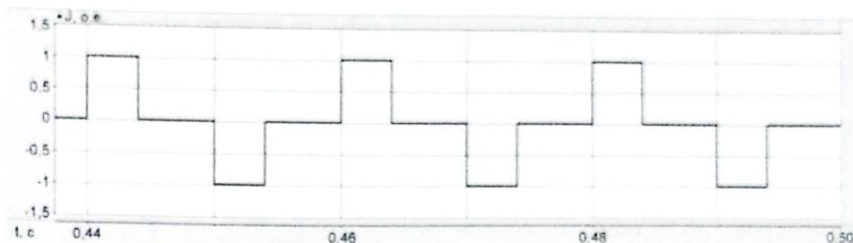


Рис. 3. Форма входного тока при 40% длительности импульса полупериода и K_i , равном 65%

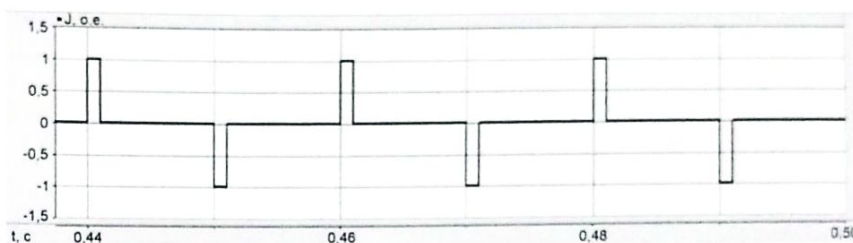


Рис. 4. Форма входного тока при 10% длительности импульса полупериода и K_i , равном 196%

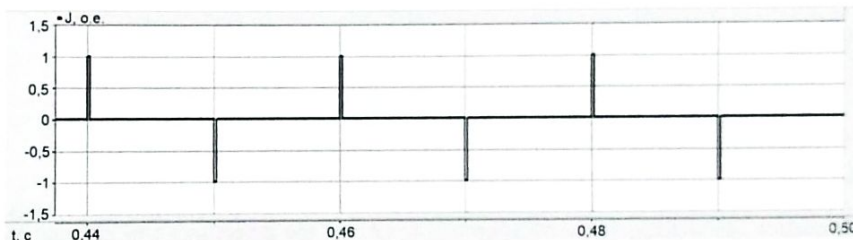


Рис. 5. Форма входного тока при 2% длительности импульса полупериода и K_i , равном 479%

входного тока становится меньше длительности его полупериода. Коэффициент нелинейных искажений напряжения электросети, как правило, меньше коэффициента нелинейных искажений входного тока электроустановок. ❄

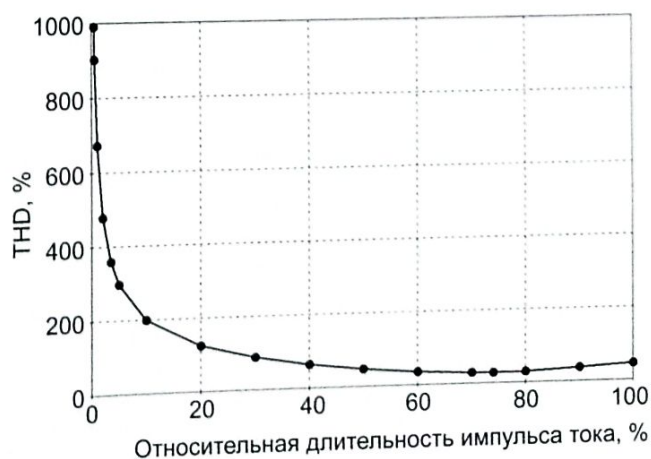


Рис. 6. Зависимость значения коэффициента нелинейных искажений от длительности импульса входного тока преобразователей

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>.
2. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии. Уч. пос. под ред. Ю.В. Шарова, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 347 с.
3. Ершов М.С., Чернев М.Ю., Пфафенрот Е.В. Общие принципы нормирования несинусоидальности тока и напряжения в системе электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий / Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 40–49.
4. Хруслов Л.Л., Ростовиков М.В., Шишов В.А., Киреев В.А. Высшие гармоники в сетях низкого напряжения с элементами силовой электроники. Опыт непрерывного мониторинга / Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2018. С. 181–186.
5. Тукшаитов Р.Х. О коэффициенте мощности и $\cos \varphi$ выпрямительного устройства при разных активном-емкостных нагрузках и уровне эмиссии в электросеть высших гармоник // Практическая силовая электроника, 2019, № 3(75). С. 53–55.
6. Тукшаитов Р.Х., Абдуллазянов Э.Ю., Нигматуллин Р.М., Айхайти Исыха-кефу. О коэффициенте мощности светодиодных ламп (в связи с требованиями ГОСТ Р 55705-2013 // Светотехника, 2018, № 1. С. 49–51.
7. Тукшаитов Р.Х., Ширiev Р.Р. Определение уровня нелинейных искажений входного тока разных типов нагрузок на основе измерения коэффициента мощности и его множителя $\cos \varphi$ // Практическая силовая электроника, 2018, № 4(72). С. 30–36.
8. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2015, № 1. С. 24–29.
9. Вахнина В.В., Дайнеко А.В. Анализ искажения синусоидальной формы кривой напряжения силового трансформатора при насыщении стали магнитопровода и при работе силового трансформатора на трехфазный мостовой выпрямитель / Материалы VI Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». В 2-х томах. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. С. 412–416.
10. Шандрыгин Д.А., Довгун В.П., Шишкин З.А. Компенсация искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой / Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 20–28.
11. Свиридов С.Г. Анализ частотного электропривода системы электродвижения судна // Практическая силовая электроника, 2021, № 3(83). С. 45–48.
12. Айхайти Исыха-кефу. Метод комплексного контроля качества светодиодных осветительных приборов на основе исследования их характеристик. Автореферат дисс. на соис. уч. степ. канд. технич. наук. Казань: КГЭУ, 2018. 16 с.
13. Карев А. О коэффициенте мощности светодиодных светильников // Современная светотехника, 2020, № 2(64). С. 16–17.
1. State Standard GOST 32144-2013. Power quality limits in public power supply systems. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>.
2. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Shamov R.G. and others. Energy quality control. Study guide edited by Sharov Yu.V., edition 3, revised. Moscow, MPEI Publ., 2019. 347 p. (In Russian)
3. Ershov M.S., Chernov M.Yu., Pfafenrot E.V. General principles of current and voltage unsinusoidality rating in the power supply system of refineries / Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii" [Proc. of International scientific-practical conference "Energy Quality Control"]. Moscow, Center of print services "Raduga", 2020, pp. 40–49. (In Russian)
4. Khruslov L.L., Rostovikov M.V., Shishov V.A., Kireev V.A. Higher harmonics in LV networks with power electronic components. Experience of continuous monitoring / Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii" [Proc. of International scientific-practical conference "Energy Quality Control"]. Moscow, Center of print services "Raduga", 2018, pp. 181–186. (In Russian)
5. Tukshaitov R.Kh. About the power factor and $\cos \varphi$ of a rectifier in different active-capacitive load conditions and the level of higher harmonic emission into the electrical network // Prakticheskaya silovaya elektronika [Applicative power electronics], 2019, no. 3(75), pp. 53–55. (In Russian)
6. Tukshaitov R.Kh., Abdullazyanov E.Yu., Nigmatullin R.M., Aykhayti Isykhakefu. About the power factor of LED lamps (with regard to requirements of the state standard GOST R 55705-2013 // Svetotekhnika [Light engineering], 2018, no. 1, pp. 49–51. (In Russian)
7. Tukshaitov R.Kh., Shiriev R.R. Determination of the level of input current non-linear distortions of different load types based on the measurement of the power factor and its co-factor $\cos \varphi$ // Prakticheskaya silovaya elektronika [Applicative power electronics], 2018, no. 4(72), pp. 30–36. (In Russian)
8. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovskiy Yu.B. Investigation of the voltage harmonic composition of a frequency converter // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo State Power University], 2015, no. 1, pp. 24–29. (In Russian)
9. Vakhnina V.V., Dayneko A.V. Study of sine curve distortion of a power transformer voltage in conditions of magnetic core steel saturation and of power transformer operation for a three-phase bridge rectifier / Materialy VI Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Priborostroyeniye i avtomatizirovanniy elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve" [Proc. of the VIth National scientific-practical conference "Instrumentation and automated electric drive in the fuel & energy complex and the housing & utilities sector]. Two volumes. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2020, pp. 412–416. (In Russian)
10. Shandrygin D.A., Dovgun V.P., Shishkin Z.A. Compensation of voltage distortions in power supply systems with traction load / Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii" [Proc. of International scientific-practical conference "Energy Quality Control"]. Moscow, Center of print services "Raduga", 2020, pp. 20–28. (In Russian)
11. Sviridov S.G. Analysis of a variable-frequency drive in the ship propulsion system // Prakticheskaya silovaya elektronika [Applicative power electronics], 2021, no. 3(83), pp. 45–48. (In Russian)
12. Aykhayti Isykhakefu. The method of complex quality control of LED lighting devices based on their characteristics analysis. Abstract of Ph.D. thesis in Engineering Science. Kazan, KSPEU, 2018. 16 p. (In Russian)
13. Karev A. About the power factor of LED fixtures // Sovremennaya svetotekhnika [Contemporary lighting engineering], 2020, no. 2(64), pp. 16–17. (In Russian)