



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, Е.И. Грачева,
Р.М. Петрова

ОСНОВЫ АНАЛИЗА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

Казань
2024

УДК 621.311
ББК 31.21
Ш835

Рецензент:
Степанов В.М., д-р техн. наук, проф.
(Тулский государственный университет),

Шпиганович А.Н. и др.

Основы анализа отказоустойчивости сложных систем электроснабжения / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, Е.И. Грачева, Р.М. Петрова. – Казань: Отечество, 2024. – 81 с.
ISBN 978-5-9222-1801-6

Учебное пособие написано на основании многолетнего опыта преподавания в вузе и результатов анализа применения теории случайных импульсных потоков для решения практических задач. Оно состоит из двух разделов. Первый раздел посвящен устойчивости электрических систем к негативным факторам. Второй раздел отображает вероятностную связь между оборудованием и эффективностью применения средств защиты для управления безотказностью электрической системы.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг инженеров, научных работников, студентов высших учебных заведений, аспирантов, докторантов всех, кто заинтересован в безотказности работы сложных систем и его оборудования.

Печатается согласно решения НТС КГЭУ № от

УДК 621.311
ББК 31.21

ISBN 978-5-9222-1801-6

© А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович,
Е.И. Грачева, Р.М. Петрова, 2024
© Казанский государственный
энергетический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия для эффективного функционирования требуют наличия высокомошных электродвигателей и других технологических машин, питаемых электрической энергией. Ее передача от устройств генерации к потребителю осуществляется с помощью электрических систем. Системы электроснабжения большинства предприятий по своей структуре практически ничем не отличаются друг от друга, хотя и имеют свои особенности в зависимости от типа производства. Если системы электроснабжения разделить на уровни, то, в соответствии с одинаковыми напряжениями на уровнях, количество рассматриваемых уровней будет для них одним и тем же. Этот подход можно реализовывать для систем любой сложности, что расширяет возможности исследований при вероятностных анализах и одновременном использовании зависимостей наработки на отказ и длительностей устранения отказов. Обеспечение отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий на настоящее время является актуальной. Особенно это касается оценки элементного влияния вспомогательных систем с учетом их воздействия на длительность отказов электрооборудования систем, и, в конечном счете, на безотказное обеспечение электрической энергией технологических машин предприятия.

Необходимо отметить, что рассмотрение функционирования любой системы промышленного предприятия изолированно от работы других систем не позволяет использовать весь комплекс мероприятий, направленных на повышение уровня ее безотказности. Поэтому анализ отказоустойчивости системы электроснабжения следует осуществлять с учетом взаимодействия ее электрооборудования с оборудованием других систем. При этом объединяющим фактором является количество и качество выпускаемой продукции. Решение данной задачи возможно осуществить путем использования экономико-математического подхода к оценке выпускаемой продукции предприятия с анализом надежности его оборудования. В

результате можно сделать вывод, что решение данной задачи будет способствовать увеличению количества и качества выпуска продукции предприятием.

Практически все задачи, относящиеся к металлургии, машиностроению, топливно-энергетическим комплексам, строительства, а также для других отраслей невозможно решить без применения вероятностных и статистических методов. Развитие кибернетики, вычислительной и микропроцессорной техники способствует использованию прикладного значения теории вероятности. На ее основе образовался целый ряд новых наук. Это и теория информатики, теория надежности, теория случайных импульсных потоков, статистический контроль качества, планирование эксперимента и др.

Как правило, задачи теории вероятности требуют громоздких вычислений. Поэтому появление новых наук, в первую очередь, связано с упрощением решения сложных задач. В настоящем учебном пособии, для решения рассматриваемой задачи, предлагается использовать вероятностный подход, теорию случайных импульсных потоков.

1. ОЦЕНКА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. Функциональная оценка электрических систем промышленного предприятия

Основной вид энергии, используемый на промышленных предприятиях, является электрическая энергия. Подача электрической энергии к приемникам рабочих машин осуществляется, с помощью систем электроснабжения. Чем мощнее предприятие, тем сложнее схема электроснабжения, которая состоит из большого числа силовых элементов. В зависимости от технологического процесса промышленного предприятия систему электроснабжения можно представить в виде отдельных подсистем, являющихся структурно сложными и включающими в себя не только последовательное и параллельное, но и смешанное соединение электрооборудования, характерное только для рассматриваемого производства. Чтобы упростить функциональную оценку безотказности системы электроснабжения [1-3] их подразделяют на уровни. Наименьший уровень расположен у приемников электрической энергии предприятия, наибольший – состоит из электрооборудования, соединяющего схему электроснабжения предприятия со схемой энергосистемы. Такой подход позволяет в разных схемах электроснабжения для одинаковых уровней системы рассматривать однотипное электрооборудование. Подтверждение такого явления производилось на основе анализа используемого по уровням электрооборудования систем электроснабжения различных предприятий. В результате составлена таблица 1.1, отображающая возможное наименование электрооборудования уровней систем электроснабжения.

Таблица 1.1 – Наименование возможного основного электрооборудования систем электроснабжения промышленного предприятия

№ уровня	Возможное наименование электрооборудования
1	Электрические двигатели
2	Пускатель, автоматический выключатель, кабельная линия
3	Трансформатор, шинный выключатель, секция шин, разъединитель, плавкий предохранитель
4	Выключатель, кабельная линия, короткозамыкатель
5	Ограничитель перенапряжений, выключатель, трансформатор, секция шин
6	Отделитель, короткозамыкатель

Электрооборудование на однотипных уровнях электрических систем, разных промышленных предприятий, в зависимости от выпускаемой продукции, будет отличаться по типу друг от друга. Даже для одинаковых по выпускаемой продукции предприятий эксплуатационная надежность параметров одинакового по типу (марке) электрооборудования будет различаться между собой. Отличаться также будут и функции распределения наработки на отказ, а, тем более, времени восстановления отказов. Поэтому, при оценке эффективности безотказности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий, следует разработать общий подход, а полученные при этом результаты могут служить искомыми оценочными значениями, рассматриваемых параметров. Однако, подходы по управлению повышением эффективности систем электроснабжения, могут быть однотипны, так и различаться друг от друга. Используемое оборудование средств автоматики и релейной защиты как по количеству, так и по однотипным характеристикам

будут различаться между собой. Все это усложняет оценку процессов управления безотказностью систем электроснабжения промышленных предприятий. В тоже время, используя теорию случайных импульсных потоков, по функциональным распределениям наработки на отказ и времени восстановления электрооборудования, можно не только в среднем осуществлять оценку рассматриваемых задач, но и выполнять расчеты и получать результаты для конкретных производств и их систем электроснабжения.

1.2. Функционирование электрооборудования систем электроснабжения предприятий

В настоящее время при функционировании систем электроснабжения промышленных предприятий ставятся новые задачи по управлению их безотказностью, чем это было несколько лет назад [4, 5]. Если раньше оценка осуществлялась относительно отдельных единиц электрооборудования, то в настоящее время она выполняется для системы в целом, включая электрооборудование всех уровней. Особенно усложнилась задача управления, что вызвало применение более сложных по функциональным особенностям систем автоматики и релейной защиты. При этом независимо от сложности поставленных задач, в каждом конкретном случае необходимо знать исходные данные, показатели надежности электрооборудования и их функции распределения. С использованием нового электрооборудования и изменением технологического процесса предприятия, существующие данные не будут отображать истинное состояние безотказности систем электроснабжения, а тем более осуществлять их управление.

Для оценки рассматриваемой проблемы исследования осуществлялись, начиная с определения показателей заводской и производственной надежности отдельных единиц электрооборудования, а также их элементов. Частота отказов отдельных элементов системы приведена в таблице 1.2. Эти показатели надежности определены минимум 25-30 лет спустя,

настоящего времени. Исследование эксплуатационной эффективности функционирования систем в целом заняли еще меньший промежуток времени. За такой короткий период невозможно рассмотреть вопросы не только теоретические, но и практические, касающиеся электрооборудования, а тем более электрических систем в полной мере. Они должны постоянно корректироваться в процессе функционирования систем. С изменением технологического процесса, а также внедрением новых рабочих машин и электрооборудования, ранее полученные данные так же не будут отображать физическое состояние системы в отношении надежности. Этот недостаток будет ликвидирован только в случае обладания уточненной информацией о надежности и функциональных взаимосвязях электрооборудования с оборудованием других систем предприятия, а что более важно со средствами релейной защиты и автоматики.

Таблица 1.2 – Оборудование схемы электроснабжения
подверженное отказам

Уровни системы	Оборудование уровня	Частота отказов $\mu_i, \text{час}^{-1} \times 10^{-5}$	Оборудование уровня	Частота отказов $\mu_i, \text{час}^{-1} \times 10^{-5}$
1	Электрические двигатели	0,015	Технологическая машина	0,025
2	Пускатель	0,018	Автоматический выключатель	0,022
	Кабельная линия	0,02		
3	Трансформатор	0,029	Выкатная ячейка с выключателем	0,028
	Секция шин	0,001		
4	Кабельная линия	0,026	Выключатель	0,034
5	Выключатель	0,034	Секция шин	0,005
	Трансформатор	0,037		
6	Отделитель	0,02	Короткозамыкатель	0,005

Необходимо отметить, что проблеме, связанной с эффективностью функционирования систем промышленных предприятий относительно надежности, посвящены многие работы. В зависимости от поставленных целей их условно можно отнести к одному из двух направлений. Первое направление рассматривает работы, связанные с классической теорией вероятностей, базирующейся на математической статистике. Ко второму направлению относятся работы управления функциональной

безотказностью систем, что в некотором роде связано с настоящей разработкой. Основой рассматриваемого направления служат системы контроля, диагностики, прогнозирования, экспертных систем и т.д.

Для задач, связанных с оценкой рассматриваемых процессов более предпочтительно первое направление. Оно не требует использования дорогостоящей техники. Его основой служит классическая теория вероятности. Ее математический аппарат развивался многие годы. Основными научными школами в данном случае служат Московская, Петербургская, Новосибирская, Екатеринбургская и некоторые другие [5-8].

Как для первого, так и второго направлений значительную трудность составляет выбор подхода (метода) проведения исследований, что связано с обеспечением требуемой информацией. В зависимости от решаемой задачи информация должна быть максимально возможной, при этом носить ограниченный характер. Наличие параметров, характеризующих отказы оборудования, не обеспечит получение соответствующих решений по безотказному обеспечению электрической энергией рабочих машин предприятия. Электрическая энергия будет поступать на приемник рабочей машины только в том случае, когда в безотказном состоянии находится электрооборудование уровней системы. Безотказное функционирование системы может быть достигнуто при условии анализа всей цепочки взаимосвязей возникновения отказов. В результате необходима разработка таких мероприятий, которые не допускали бы возникновения отказов при эксплуатации технологических машин на каждом уровне системы электроснабжения.

Решение задач, связанных с оценкой безотказности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий и их электрооборудования в нашей стране, относится к 30-ым годам прошлого столетия. Уже в то время были определены направления, связанные с надежностью систем электроснабжения. Впервые такую оценку осуществили в работе [9]. В ней предложено за надежность электрооборудования принимать отношение наработки на

отказ к сумме наработки на отказ и времени восстановления электрооборудования. Практически такая оценка надежности осуществлялась по коэффициенту готовности, который в настоящее время довольно широко применяется в машиностроении. В процессе анализа безотказности систем электроснабжения С.А. Смит использовал в своих работах только количество повреждений электрооборудования в год. Однако, не учет времени восстановления отказов и наработки на отказ не отображает в полной мере надежность оборудования.

В работах [10,11] безотказное состояние электрооборудования оценивалось коэффициентом, отображающим режимы его функционирования. Такой подход широко используется и в настоящее время. В работе [12] для оценки надежности основными параметрами служат $\mu_i(t)$ – частота и $\lambda_i(t)$ – опасность отказов i -го элемента.

Условия и характер работы электрооборудования определяют уровень его безотказности. Их оценку авторы [13, 14] предлагают осуществлять более чем по 15 параметрам. Используемые параметры являются средними значениями. Следовательно, они могут быть применены для оценки работы, но не характеризовать функциональные зависимости процессов, происходящих в системах. Только наличие функций распределения позволяет с динамических позиций оценивать безотказность систем. Постепенно осуществлялось накопление необходимых результатов при выполнении исследований. Большинство отраслей промышленности к концу прошлого столетия уже имело свой банк данных. Однако, однотипные параметры отличались друг от друга. Наибольшее число работ приходилось на машиностроительную отрасль. Накапливание результатов [15, 16] по отраслям позволяло дальнейшее целенаправленное осуществление исследований по отраслям промышленности.

Повышение заводской надежности оборудования связано с изменением производственных расходов, которые, как правило, увеличиваются. При этом частота отказов с использованием нового электрооборудования уменьшается, производительность рабочих

машин предприятия увеличивается, величина ущерба уменьшается. Задачи относительно производственной надежности являются не только вероятностными, но и экономическими. Требуемый уровень надежности даже для однотипных, а тем более различных производств не одинаковый. Поэтому возникло множество направлений, связанных с обеспечением отказоустойчивости систем и ремонтом электрооборудования. Одной из первых в данном направлении является работа [17] по созданию подсистемы с параллельной работой силовых трансформаторов на общую нагрузку. К основному недостатку данной работы следует отнести то, что оценка осуществлялась по параметрам надежности, при этом не использовались функций распределения. По-видимому, вызвано это тем, что наработка на отказ электрооборудования составляет сотни тысяч часов. Поэтому для определения законов распределения оборудования требуются годы. Если использовать выявление законов распределения по усеченным наработкам, то это не всегда позволяет получить достоверные результаты.

Чтобы в некоторой степени предупредить возникновение отказов в системе электроснабжения, на промышленных предприятиях используют ремонтно-профилактические осмотры. С их использованием осуществляется замена не только износившихся частей или узлов электрооборудования, но и отдельных его единиц [18]. Если по данным хронометражных наблюдений установить вероятность безотказной работы, то это позволяет расчетным путем сделать рекомендации периодичности ремонтно-профилактического обслуживания.

Вопросы надежности наибольшее развитие получили в военной промышленности, ракетной, авиационной [19], радиоэлектронной [20-22], вычислительной технике [23-26]. Отдельные подходы и положения этих разработок с успехом можно использовать и для электрических систем электроснабжения. Нельзя не отметить заслуги многих академиков, которые впервые учли структуру системы, функциональную взаимосвязь между элементами и их режимы работы [28]. В настоящее время системы электроснабжения много уровневые.

Они обладают структурной избыточностью. И.А. Ушаковым используется понятие показатель эффективности полагая, что каждый элемент вносит свою долю в общий эффект. Для технических систем этот подход хотя и является общим, но не оценивает воздействие отказов отдельного оборудования на безотказность системы в целом. Создание унифицированной структуры моделей на базе агрегатных систем пытался осуществить автор [29]. В работах [30, 31] исключено влияние элементов друг на друга, а для обеспечения соответствующего уровня надежности предлагается применять структурное резервирование и ремонтно-профилактическое обслуживание. Работы [32, 33] посвящены вопросам, связанным с обеспечением повышения ремонтпригодности оборудования, а, следовательно, его отказоустойчивости. Используя математическую модель, автор [34] оценивает связь между наработкой на отказ и временем устранения отказов. На основе моделей проводятся попытки осуществлять прогнозирование возможного изменения параметров в процессе

эксплуатации оборудования. Используя результаты статистических исследований автором [35] оцениваются возмущающие факторы, оказывающие влияние на ремонтпригодность и безотказность оборудования. В [36] определяется безотказное состояние оборудования по результатам агрегированного характера.

Все приведенные подходы можно применять для оценки отказоустойчивого состояния электрооборудования и систем электроснабжения. В общем случае задачи, связанные с экспериментальной оценкой надежности оборудования, базируются на математической статистике. Каждая из них требует отдельной оценки. Сравнение результатов, полученных разными авторами, осуществить практически невозможно. Вызвано это тем, что каждый из авторов для оценки использовал не только разные показатели надежности, но и разное их число. Происходило это потому, что перед каждым из авторов ставились свои задачи. В тоже время, использование этих результатов для оценки надежности позволило разработать ГОСТы [37, 38]. Данные ГОСТы можно применять для

оборудования разных отраслей производства, а также сравнивать результаты, полученные разными авторами.

Современные промышленные системы обладают всеми видами избыточности: структурной, нагрузочной, временной. Поэтому не каждый отказ электрооборудования системы электроснабжения приведет к прекращению подачи энергии на приемники рабочих машин. Избыточности усложняют структуру системы электроснабжения, изменяют взаимосвязи между оборудованием и рабочими машинами. Математические расчеты, в отношении таких систем по сравнению с неразветвленными, значительно возрастают. Это подтверждено на основании работ отечественных [39-67] и зарубежных [68-75] ученых.

Основным средством повышения безотказности систем в настоящее время служит резервирование, а также средства релейной защиты и автоматики. Для оценки надежности используются вероятностные методы. Предпочтение отдается или вероятности работы, или вероятности отказа. Рассчитываются эти величины по показателям надежности отдельных единиц оборудования. Примером может служить работа [76], в которой используются законы распределения длительностей отказов транспортных самолетов, когда показатели отображали время равное трем годам их эксплуатации. Автор приходит к выводу, что высокая безотказность достигается наличием структурной избыточности как отдельных элементов, так и целых подсистем. Именно использование систем релейной защиты и автоматики позволяет исключать негативные случайные отказы.

Отказоустойчивость системы электроснабжения и ее электрооборудования зависят от условий эксплуатации [77]. Отказы по отдельным единицам электрооборудования и составляющим подсистем довольно подробно приведено в [78]. Автором сделан вывод, что повышение безотказности может быть повышено посредством повышения надежности заводом изготовителем. В работе [79-81] показано увеличение ресурса узлов отдельных агрегатов использованием упрочняющей технологии ремонта и повышением их качества. Надежность может быть снижена конструктивными

дефектами [82], при этом предварительные испытания могут позволить увеличить надежность оборудования [83]. Оценка безотказности систем и его электрооборудования довольно подробно рассмотрена в [84, 85]. Автор [84] доказывает, что применение ненагруженного резерва увеличивает безотказность систем. Это справедливо и для систем с облегченным резервом. В работе [85], помимо вероятности отказов, вводится такой критерий оценки как частота отказов.

Уменьшение частоты отказов оборудования и времени его восстановления увеличивает эффективность функционирования систем. Увеличивается безотказность и при уменьшении времени между профилактическими ремонтами. Особое значение в этом случае имеет то, что безотказность систем повышается за счет уменьшения времени перехода на резервное оборудование.

Чтобы повысить эффективность проведения планово-профилактических работ, а соответственно и капитальных ремонтов, необходимо определить причины отказов оборудования, основными из которых являются рассмотренные в [86-89]. Так в [90] установлено, что число отказов и их значимость для силовых трансформаторов зависит от условий эксплуатации, класса напряжения, и их габаритов. Автором [91] проанализировано распределение отказов высоковольтной аппаратуры и причины их возникновения. В [92] определяется периодичность оптимального профилактического обслуживания, а в [93, 94] устанавливаются количественные параметры надежности безотказной работы электрических машин. На устойчивости систем электроснабжения и их электрооборудовании сказываются функциональные взаимосвязи, окружающая среда, объективные и субъективные причины, характер эксплуатации, квалификация обслуживающего персонала, культура производства и т.д., все это рассмотрено в работах [95-102]. Исследованию подлежали и технологические неразветвленные системы, которые также называют технологически жесткими системами. Они могут принимать только два состояния: работоспособное и неработоспособное [103]. Для жестких систем не могут быть использованы методы,

применяемые при оценке систем электроснабжения и их электрооборудования. Даже незначительные неисправности приводят жесткую систему из исправного состояния в неисправное. Отсутствие неисправностей обеспечивает отказоустойчивое функционирование любых систем. При этом одна и та же неисправность для разных систем может привести к отказам разного рода. Следовательно, требуется привязка дефектов к отказам, а это возможно только при систематическом анализе безотказности систем [104, 105]. Как результат – можно свести вероятность отказа отдельно взятого оборудования уровня в таблицу 1.3.

Последовательность появления отказов необходимо учитывать всегда. Особенно важным это условие является для жестких систем [106]. Для многоуровневых же систем отказоустойчивость зависит не только от отказов отдельных ее элементов. В этом случае необходимо учитывать условия промышленного предприятия, где используется система [107]. Авторы [108-110] для повышения безотказности предлагают использовать резервирование. Особенно это эффективно для систем с одинаковыми схемами понизительных подстанций [111]. Если рассматривать однотипные по выполняемым функциям схемы электроснабжения, то всегда более предпочтителен вариант с резервированием [112-116].

Таблица 1.3 – Основные причины отказов в системе электроснабжения

Уровни системы	Оборудование уровня	Причины отказа	Вер-ть отказа $\times 10^{-7}$
1	2	3	4
1	Электрические двигатели Технологическая машина	Износ подшипников качения Деформация вала ротора Пробой изоляции обмотки ротора Обрыв стержня короткозамкнутой обмотки	0,01 0,12 0,15 0,07
2	Пускатель Автоматический выключатель Кабельная линия	Замыканием между фазой и нулевым проводом Неисправность контакта Пробой изоляции	0,03 0,23 0,11
3	Трансформатор Секция шин Выкатная ячейка с выключателем	Повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции Повреждения контактных соединений Нарушения изоляции обмоток Дефект при сборке шин	0,07 0,09 0,14 0,10
4	Выключатель Кабельная линия Выключатель	Замыканием между фазой и нулевым проводом Неисправность контакта Пробой изоляции	0,05 0,12 0,10

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4
5	Выкатная ячейка с выключателем Трансформатор Секция шин.	Замыканием между фазой и нулевым проводом	0,03
		Неисправность контакта	0,14
		Пробой изоляции	0,12
		Повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции	0,07
		Повреждения контактных соединений	0,09
		Нарушения изоляции обмоток	0,14
		Дефект при сборке шин	0,10
6	Отделитель Заземление Короткозамыкатель	Неисправность контакта	0,15
		Пробой изоляции	0,13
		Несрабатывание	0,04

Аналогичным вопросам, но для систем морских портов, посвящена работа [117]. Постепенно начали появляться работы в отношении безотказности систем, базирующиеся на использовании их управления с помощью ЭВМ [118]. В работе [119] анализируется целесообразность применения противоаварийной автоматики.

Для этих целей в [120-122] предлагается применять подход корреляционного и регрессивного анализа. Показатели надежности для систем можно прогнозировать в соответствии с [123]. В данном случае используется статистическое и вероятностное моделирование [124, 125]. Логико-вероятностные методы и методы графов также применимы для оценки надежности систем [126-129]. Влияет на надежность систем и качество электроэнергии [130-134]. Повышением качества электроэнергии может служить переход с напряжения 6 кВ на напряжение 10 кВ [135]. При этом повышение напряжения увеличивает пропускную способность системы электроснабжения,

снижает уровень безотказности [136-138]. С внедрением тиристорного компенсатора реактивной мощности увеличивается отказоустойчивость высоковольтных электрических сетей [139, 140]. Большую актуальность безотказность систем приобретает при интенсификации производства с использованием более мощных машин и механизмов [141-144]. Авторы [145] предполагают, что наиболее эффективным для оценки безотказности систем служит вероятностный подход с использованием матриц. Оценку безотказности на момент исследования, предлагается выполнять с помощью распознавания образов и нечетких множеств [146]. Количественные показатели предлагается применять при проектировании систем электроснабжения [147]. Экспертные системы диагностики представлены в [148, 149].

На базе марковских случайных процессов в [150, 151] устанавливаются основные характеристики при различных соотношениях опасного и безопасного соотношения элементов систем. Нагрузки, уровни напряжения и пределы устойчивости для оценки безотказности систем являются определяющими [152]. Немаловажным фактором в данном случае служит структура системы и режимы работы ее электрооборудования. При этом обеспечение необходимого уровня отказоустойчивого состояния системы является комплексно-технологической задачей, которая решается на основании принятой теории [153].

Применение любых мероприятий, повышающих отказоустойчивость системы, требуют дополнительных затрат. Решение по их выбору должно обосновываться технико-экономически [154-157]. В [158] обеспечение рационального уровня надежности предлагается повышением коэффициента готовности электрооборудования системы. Для электрических систем технико-экономические параметры определяются в [159, 160]. Оптимизация надежности систем, как отмечают авторы [161, 162], должна осуществляться на совокупности мероприятий, позволяющих влиять на безотказность систем. Создание оптимальных в отношении надежности систем должно осуществляться на результатах оценки

множества решений [163, 164]. В [165] показано, что никакие решения не могут быть приняты без экономического обоснования. Чтобы осуществить анализ и выполнить синтез эффективности функционирования систем электроснабжения требуется комплексный подход, основой которого должен быть математический аппарат, базирующийся на достоверной информации.

Особое внимание надежности систем уделяется учеными зарубежных стран. В основном это касается оборонной, ракетной, авиационной и радиоэлектронной техники. Ими для этих целей, как и учеными нашей страны, применяются различные методы оценки, используемые в зависимости от поставленных задач.

Выполненный анализ результатов исследований, полученных в рассмотренных литературных источниках, свидетельствует, что обеспечение требуемого уровня надежности может быть осуществлено посредством использования более надежного электрооборудования, резервирования, ремонтно-профилактического обслуживания, наличия запасных частей, а также средств автоматики и релейной защиты. Таким образом, отказоустойчивость электрической системы зависит от многих факторов, а именно: от заводской надежности электрооборудования, структуры системы, взаимосвязей электрического оборудования между собой и технологическими машинами, воздействия окружающей среды, и т.д. Как правило, некоторые отдельные возмущающие факторы не учитываются, другим в тоже время уделяется больше внимания. Выбор предпочтения зависит от поставленных задач, но и в этом случае должно быть экономическое обоснование. В нашем случае, для решения поставленной задачи, предлагается использовать теорию случайных импульсных потоков, нашедшую применение в радиотехнике, многоканальных системах связи, изучении космических лучей, оценке надежности сложных систем и других областях науки и техники.

Из рассмотренных подходов для анализа систем электроснабжения, на мой взгляд, наиболее подходит теория случайных импульсных потоков, на базе которой можно представлять

математические модели состояний как отдельных единиц электрооборудования, так и систем. Они позволяют учитывать внешние и внутренние взаимосвязи оборудования. Именно установление взаимосвязей между электрическим оборудованием и технологическими машинами делает возможным оценивать влияния, характеризующие воздействие относительных показателей экономической эффективности и надежности систем на технологический процесс. При этом, оказывается возможным определение допустимого времени перерыва электроснабжения рабочих машин, создание мероприятий, обеспечивающих повышение надежности систем электроснабжения промышленных предприятий, а также поддержание эффективности систем на заданном уровне, используя средства релейной защиты и автоматики.

1.3. Оценка параметров надежности электрооборудования

Выполненные исследования и анализ многочисленных литературных источников, результатов функционирования электрооборудования электрических систем промышленных предприятий свидетельствуют о том, что закон распределения наработки на отказ в основном соответствует экспоненциальному закону. Более сложными являются законы распределения времени восстановления электрооборудования от их элементов. Зависит это в основном от организации труда на предприятии. При этом распределение может быть экспоненциальным, логарифмически-нормальным или усечено-нормальным. Когда предприятие работает безотказно, не наблюдаются сбои в его работе, то закон распределения времени восстановления экспоненциальный. Для таких предприятий среднее время восстановления отказов меньше среднего времени восстановления отказов аналогичных предприятий по отрасли. Если работа на предприятии связана со значительными перерывами при выпуске продукции, то среднее время восстановления отказов оборудования будет больше среднего значения восстановления отказов аналогичного оборудования по отрасли. То есть в

производственном отношении на наиболее отсталых предприятиях закон устранения отказов усечено-нормальный. Таким образом, электрооборудованию со значительными длительностями наработок как распределительные устройства, силовые трансформаторы, автоматические выключатели, силовые кабели, генераторы, мощные двигатели, присущ экспоненциальный закон распределения длительностей отказов.

Выполненный анализ показывает, что в распределительных устройствах систем электроснабжения чаще отказывают выключатели и разъединители. Наибольшее число отказов составляют: выход из строя контактов – 43%, повреждения дугогасительных камер – 29%, пробой изоляции – 17%, прочие отказы – 11%. Если оценивать с позиции надежности выключатели нагрузки, то на дугогасительные и рабочие контакты приходится до 41% отказов, вкладыши дугогасительных камер – 31%, на уплотнения буферных устройств – 19%, на остальные элементы – 9%. Для разъединителей основными причинами служат пробой дуговой изоляции – 48%, приваривание и подгорание силовых контактов – 17%, повреждение тяг – 11%, отказы привода – 18%, прочие – 6%. Выход из строя из-за отказов распределительных устройств в основном происходит от неудовлетворительной их эксплуатации – 57%, низкого качества ремонтов – 31%, прочих отказов – 12%.

Сказывается на работе электрического оборудования и эффективность функционирования средств автоматики и релейной защиты. Именно эти средства позволяют управлять эффективностью функционирования как отдельных единиц оборудования, так и всей системы в целом, но в тоже время средства релейной защиты и автоматики также являются не абсолютно надежными. Если сравнивать надежность силового оборудования с надежностью релейной защиты и автоматики, то у первых этот показатель в десятки-сотни раз выше. При оценке этого показателя для средств автоматики и их влияния на работу систем надо учитывать то, что элементы средств релейной защиты не подлежат ремонту, а при отказе заменяются на исправные. Необходимо также отметить, что при

расчете эффективности функционирования систем электроснабжения наряду с отказами стоит учитывать безотказность систем релейной защиты и автоматики.

Основным видом электрооборудования систем электроснабжения служат силовые трансформаторы. Большая часть отказов для трансформаторов приходится на продольную и витковую изоляцию. Это составляет примерно 50-58% отказов от их общего числа. Повреждения возникают в основном от механических и усталостных процессов в обмотках, теплового старения от повышения температуры окружающей среды, аварийных перегрузок, нарушениях при изготовлении на заводах изготовителях трансформаторов. При этом заводские дефекты составляют до 37% всех повреждений, неправильная эксплуатация – 23%, не качественный ремонт – 19%, старение изоляции – 17%, прочие – 4%. Однако, в этом случае длительность устранения отказов определяется так же надежностью релейной защиты и автоматики.

Статистически самыми надежными элементами системы являются высоковольтные кабели. На их долю приходится не более 9-11% отказов. Это обусловлено конструктивными особенностями кабелей. Наибольшее число отказов для кабельных сетей связано с соединительными муфтами. Они составляют до 55% отказов. В связи с тем, что время устранения отказов кабелей значительно, по возможности их стремятся заменять шинопроводами. При том с увеличением длины кабелей (шинопроводов), их наработка на отказ уменьшается. Параметры надежности кабелей (шинопроводов) принято представлять на определенную длину. Это базисная величина, которая равна ста метрам.

Для выключателей напряжением до 1000 В. наибольшее число повреждений приходится на обгорание и износ контактов – 45%, механизм свободного расцепления и разрегулировка контактов – 18%, ослабление пружин – 19%, поломка расцепителя – 13%, прочие – 5%.

Если рассматривать магнитные пускатели, то основное число отказов приходится на их контакты – 55%, второе место занимает катушка – 35%, на нагревательные элементы теплового реле

приходятся оставшиеся – 10%.

В контакторах быстрее всего выходят из строя контакты – 47%, дугогасительные элементы – 25%, подвижная система – 17%, прочие – 11%.

Необходимо отметить, что также, как в случае с системой электроснабжения, у систем релейной защиты и автоматики могут возникать отказы. Наиболее высоким показателем отказов обладают средства индивидуальной защиты отдельно взятого оборудования – 64%, чуть менее часто отказы происходят в токовых защитах второго уровня – 27% и, как самое редко встречаемое отказы случаются в максимальной токовой защите – 9%. Такое распределение отказов релейной защиты связано в основном с потерями, вызванными несрабатыванием оборудования, где максимальная токовая защита требует наилучших показателей, так как предотвращает каскадные аварии.

Для магнитных пускателей, контакторов, автоматических выключателей, установленных на щитах управления, частота отказов уменьшается в 3-4 раза. Обусловлено это благоприятными условиями эксплуатации за счет использования отдельных помещений и сосредоточения всей аппаратуры на отдельных панелях.

Основным приемником электрической энергии на промышленных предприятиях являются асинхронные электрические двигатели. Наибольшее число (до 70%) составляют двигатели с частотой вращения 1500 об/мин. Для вентиляторов и центробежных насосов в основном применяются двигатели на 3000 об/мин. Технологические машины в основном оснащаются электрическими двигателями на 1000 об/мин [166]. До половины всех отказов в подсистемах электроснабжения составляют электрические двигатели насосных установок. Нарботка на отказ для таких двигателей примерно в 2,5 раза меньше, чем у аналогичных двигателей технологических машин, связано это с внешними воздействиями. Условия эксплуатации изменяют распределение отказов по отдельным элементам электрооборудования, в том числе, и узлам электрических двигателей. Наибольшая часть отказов в электрических двигателях

приходится на обмотку статора. Они составляют до 75-85% всех отказов двигателей, 10-15% приходится на выход из строя подшипников, прочие – 4%. Основными причинами выхода из строя трехфазных электрических двигателей является: нарушение эксплуатации – 47%, не качественный ремонт – 20%, применение не по назначению – 15%, нарушения технологии производства – 10%, старение и износ – 4%, прочие – 4%.

Таблица 1.4 – Процентное отношение отказов средств релейной защиты и автоматики в зависимости от вида защиты к надежности силового оборудования

Уровни системы	Оборудование уровня	Виды защит	Отказы автоматики $\% \times 10^{-3}$
1	2	3	4
1	Электрические двигатели Технологическая машина	Защита от междуфазных коротких замыканий;	0,91
		защита от замыканий на землю;	0,84
		Защита от двойных замыканий на землю;	0,57
		Защита от перегрузки;	0,37
		Защита от обрыва фазы;	0,90
		Ограничение количества пусков;	0,76
		Запрет пуска по времени прошедшего от предыдущего пуска;	0,59
		Защита минимального тока или мощности;	0,67
		Заклинивание или затормаживание ротора.	0,31
2	Кабельная линия	Дистанционная защита в простейшем исполнении;	0,91
		Поперечная дифференциальная токовая защита;	0,57
		Продольная дифференциальная токовая защита.	0,90

Окончание таблицы 1.4

1	2	3	4
3	Трансформатор. Секция шин	Автоматическое включение резервного трансформатора; Автоматическое отключение и включение одного из параллельно работающих трансформаторов; Автоматическое регулирование напряжения; Газовая защита.	0,91 0,57 0,37 0,80
4	Выключатель Кабельная линия.	Дистанционная защита в простейшем исполнении; Поперечная дифференциальная токовая защита; Продольная дифференциальная токовая защита.	0,71 0,37 0,90
5	Трансформатор Секция шин	Автоматическое включение резервного трансформатора; Автоматическое отключение и включение одного из параллельно работающих трансформаторов; Автоматическое регулирование напряжения; Газовая защита.	0,92 0,73 0,85 0,91
6	Отделитель Короткозамыкатель	Датчик срабатывания МТЗ.	0,91 0,84

Отказы низковольтных кабелей в основном наблюдаются из-за электрического пробоя: между токоведущими жилами, токоведущей частью и оболочкой кабеля, корпуса муфты. Большое число отказов, происходит из-за технологических машин, практически

обусловленное неправильным монтажом, эксплуатацией, ремонтом и дефектами производства.

Чтобы оценить надежность электрооборудования в полной мере, кроме параметров и закона распределения наработки на отказ, необходимо знать характеристики времени восстановления отказов. В настоящее время очень большое внимание уделяется средствам автоматики и релейной защиты, обеспечивающим процесс повышенной защиты в снабжении электрической энергией приемников. Расположение релейной защиты и ее процентное отношение отказов к надежности силового оборудования в системах электроснабжения представлено в таблице 1.4. Эти данные получены с промышленных производств.

1.4. Управление избыточностью систем

Системы электроснабжения промышленных предприятий многоуровневые. Электрооборудование высших уровней связано с большим числом электроприемников. Это объясняется тем, что наличие взаимосвязей между элементами электрической и технологической систем служит основным условием для любых промышленных производств. Развитие производственных процессов непосредственным образом связано с системой электроснабжения. В результате структура системы электроснабжения усложняется, взаимосвязи нарушаются. На включение и отключение электрооборудования влияют многочисленные факторы, определяющие из которых связаны с технологическими особенностями производства. С этих позиций все электрооборудование можно разделить на два вида. К первому виду отнесем электрооборудование, у которого моменты включения и отключения являются одновременными. Связанно это со структурой системы и требованиями технологического процесса предприятия. Ко второму виду отнесем электрооборудование, связанное с включениями и отключениями по мере необходимости. При этом включения и отключения могут быть заранее предусмотрены, а могут

происходить случайно, это зависит от программы релейной защиты и автоматики системы.

С позиций функциональных особенностей электрооборудования возможны три ситуации. Первая ситуация относится к электрооборудованию, включение и отключение которого осуществляется одновременно. Данное оборудование находится в жесткой технологической связи. Воздействие возмущений на данное оборудование со стороны технологического процесса постоянно, а степень взаимодействия оборудования друг на друга не равноценна. Все эти позиции могут быть описаны случайными импульсными потоками с учетом изменения высоты импульсов. Вторая ситуация может быть вызвана электрооборудованием, включение и отключение которого осуществляется по мере необходимости. Если сравнивать процессы функционирования электрооборудования первой и второй ситуаций, то частота отключений электрооборудования второй ситуации значительно меньше по величине частоты отключений оборудования первой ситуации.

Необходимо отметить, что моменты факторов, вызывающие отключение и включение электрооборудования первой ситуации, фиксируются как со стороны системы электроснабжения, так и технологических машин. Это выполняется по заранее разработанным программам для релейной защиты и автоматики. Для второй ситуации моменты включения и отключения фиксируются только относительно электрического оборудования. Время отключения электрооборудования по длительности неодинаково. Неодинаково оно действует и на технологический процесс. Обычно для защиты технологического процесса от воздействия возмущающих факторов необходимо использовать оценку, характеризующуюся наибольшим числом отключений за рассматриваемый промежуток времени. Это позволяет оценить воздействие возмущающих факторов между оборудованием электрической и технологической системами.

Более общим подходом является третья ситуация, когда необходимо учитывать воздействие на системы электроснабжения и технологического процесса и первой, и второй ситуации. Решение

такой задачи предлагается осуществлять методом наложения, который заключается в том, что оценка проводится сначала для первой ситуации, а затем для второй. Учитывая время, полученные результаты в виде случайных импульсных потоков накладываются друг на друга. При третьей ситуации основой служит релейная защита и автоматика, которые позволяют минимизировать время перерыва технологической машины.

Стоит учесть, что даже один случайный фактор, действующий на системы, при постоянстве остальных, вызовет случайный характер воздействия негативных возмущений. Любая работа, используемая для установления закономерностей функциональных взаимосвязей оборудования многоуровневых систем электроснабжения со средствами релейной защиты и автоматики, обеспечивающих рациональные режимы технологических машин при ограничении случайных перегрузок с повышением долговечности и снижением затрат на эксплуатацию систем в настоящее время очень необходима. Чтобы обеспечить такое достижение следует обладать решениями соответствующих задач. Основной из них служит вероятностная оценка отказоустойчивости средств релейной защиты и автоматики электрооборудования разных уровней в системах электроснабжения промышленных предприятий. Особенно необходимы аналитические выражения, связывающие отказоустойчивость релейной защиты и автоматики с параметрами, связывающими отказы электрооборудования независимо от средств и способов повышения его надежности при воздействии случайных негативных факторов. Создание программного комплекса оптимизации и рационального управления отказоустойчивостью электроснабжения приемников электрической энергии значительно упрощает определение функциональных взаимосвязей элементов систем предприятия не зависимо от их назначения, включая приемники электрической энергии технологических машин.

1.5. Выводы по главе

1. Основной вид энергии, используемый на промышленных предприятиях, является электрическая энергия. Подача электрической энергии к приемникам рабочих машин осуществляется, с помощью систем электроснабжения. Чем мощнее предприятие, тем сложнее схема электроснабжения, которая состоит из большого числа силовых элементов. В зависимости от технологического процесса промышленного предприятия систему электроснабжения можно представить в виде отдельных подсистем, являющихся структурно сложными и включающими в себя не только последовательное и параллельное, но и смешанное соединение электрооборудования, характерное только для рассматриваемого производства. Чтобы упростить функциональную оценку безотказности системы электроснабжения их подразделяют на уровни. Наименьший уровень расположен у приемников электрической энергии предприятия, наибольший – состоит из электрооборудования, соединяющего схему электроснабжения предприятия со схемой энергосистемы. Такой подход позволяет в разных схемах электроснабжения для одинаковых уровней системы рассматривать однотипное электрооборудование.

2. В настоящее время при функционировании систем электроснабжения промышленных предприятий ставятся новые задачи по управлению их безотказностью. Если раньше оценка осуществлялась относительно отдельных единиц электрооборудования, то в настоящее время она выполняется для системы в целом, включая электрооборудование всех уровней. Особенно усложнилась задача управления, что вызвало применение более сложных по функциональным особенностям систем автоматики и релейной защиты. При этом независимо от сложности поставленных задач, в каждом конкретном случае необходимо знать исходные данные, показатели надежности электрооборудования и их функции распределения. С использованием нового электрооборудования и изменением технологического процесса предприятия, существующие данные не будут отображать истинное состояние безотказности

систем электроснабжения, а тем более осуществлять их управление.

3. Выполненные исследования и анализ многочисленных литературных источников, результатов функционирования электрооборудования электрических систем промышленных предприятий свидетельствуют о том, что закон распределения наработки на отказ в основном соответствует экспоненциальному закону. Более сложными являются законы распределения времени восстановления электрооборудования от их элементов. Зависит это в основном от организации труда на предприятии. При этом распределение может быть экспоненциальным, логарифмически-нормальным или усечено-нормальным. Когда предприятие работает безотказно, не наблюдаются сбои в его работе, то закон распределения времени восстановления экспоненциальный. Для таких предприятий среднее время восстановления отказов меньше среднего времени восстановления отказов аналогичных предприятий по отрасли. Если работа на предприятии связана со значительными перерывами при выпуске продукции, то среднее время восстановления отказов оборудования будет больше среднего значения восстановления отказов аналогичного оборудования по отрасли. То есть в производственном отношении на наиболее отсталых предприятиях закон устранения отказов усечено-нормальный. Таким образом, электрооборудованию со значительными длительностями наработок как распределительные устройства, силовые трансформаторы, автоматические выключатели, силовые кабели, генераторы, мощные двигатели, присущ экспоненциальный закон распределения длительностей отказов.

4. Системы электроснабжения промышленных предприятий многоуровневые. Электрооборудование высших уровней связано с большим числом электроприемников. Это объясняется тем, что наличие взаимосвязей между элементами электрической и технологической систем служит основным условием для любых промышленных производств. Развитие производственных процессов непосредственным образом связано с системой электроснабжения. В результате структура системы электроснабжения усложняется,

взаимосвязи нарушаются. На включение и отключение электрооборудования влияют многочисленные факторы, определяющие из которых связаны с технологическими особенностями производства. С этих позиций все электрооборудование можно разделить на два вида. К первому виду отнесем электрооборудование, у которого моменты включения и отключения являются одновременными. Связанно это со структурой системы и требованиями технологического процесса предприятия. Ко второму виду отнесем электрооборудование, связанное с включениями и отключениями по мере необходимости. При этом включения и отключения могут быть заранее предусмотрены, а могут происходить случайно, это зависит от программы релейной защиты и автоматики системы.

1.6. Контрольные вопросы

1. Перечислите возможное наименование электрооборудования по уровням системы электроснабжения.
2. Перечислите основные причины отказов электрооборудования в системах электроснабжения.
3. Перечислите отказы основного электрооборудования систем электроснабжения: выключателей и разъединителей, магнитных пускателей и контакторов, электродвигателей а также трансформаторов и высоковольтных кабелей.
4. Перечислите основные отказы средств релейной защиты и автоматики в зависимости от вида защиты.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СВЯЗЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Функциональный анализ взаимосвязей электрооборудования системы электроснабжения предприятия

Если рассматривать электроснабжение приемников промышленного предприятия, то в данном процессе участвует электрооборудование системы, включенное относительно друг друга последовательно. С отказом отдельного электрооборудования произойдет вынужденная остановка технологической машины. Для оценки взаимосвязей между электрооборудованием предлагается поступить следующим образом: составить математическую модель; функционирование отдельной единицы электрооборудования представить случайным импульсным потоком с единичной высотой импульсов. Параметры и законы распределения наработки на отказ и времени устранения отказов потока принимаются известными. Для i -ой единицы оборудования, они выражаются потоком $X_i(t)$ с параметрами: τ – наработка на отказ (длительность импульса); θ – время восстановления отказов (длительность паузы); μ – частота отказов; $\alpha(\tau)$ – функция распределения длительности наработки на отказ; $\beta(\theta)$ – функция распределения длительности времени восстановления отказов. На рисунке 2.1 графически отображено построение случайного импульсного потока $Y(\tau)$, функционирования последовательного соединения электрооборудования системы электроснабжения, обеспечивающего энергией приемник электрической энергии промышленного предприятия. Параметры, характеризующие $Y(\tau)$, можно рассчитать аналитическим путем. Для этой цели необходимо знать параметры и характеристики, рассматриваемых элементарных потоков. Это средние длительности импульсов $\bar{\tau}_i$ и пауз $\bar{\theta}_i$, частоты $\bar{\mu}_i$, вероятности появления

импульсов P_i и пауз \bar{P}_i , а также законы распределения длительностей импульсов $\alpha_i(\tau)$ и законы распределения длительностей пауз $\beta_i(\theta)$.

Необходимо отметить, что случайным импульсным потоком можно описывать и не силовые элементы систем электроснабжения, например, средства релейной защиты и автоматики. Использование средств управления с высоким показателем надежности позволяет повысить отказоустойчивость электроснабжения как отдельно взятого приемника, так и системы в целом, поэтому их характеристики будут сказываться на работе системы. В итоге вероятность появления импульсов потока $Y(\tau)$, отображающего функционирование последовательного соединения оборудования, будет

$$P_{\text{пос},i} = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (2.1)$$

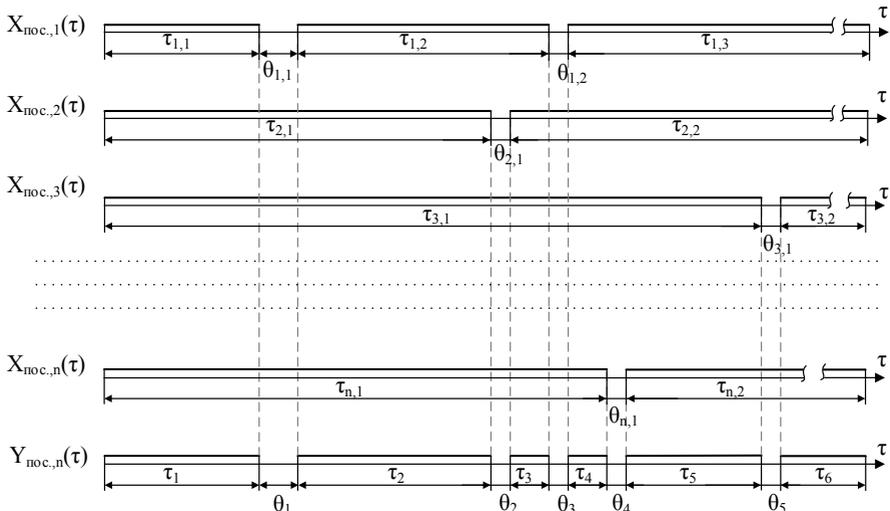


Рисунок 2.1 – Графическое представление случайным импульсным потоком $Y(\tau)$, функционирования последовательного соединения

оборудования системы электроснабжения, обеспечивающего энергией приемника электрической энергии промышленного предприятия

Среднюю длительность импульсов потока $Y(\tau)$, последовательного соединения оборудования установим по выражению

$$\overline{\tau}_{\text{пос},i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}. \quad (2.2)$$

Частота следования наработки на отказ обеспечения энергией приемников в результате равна

$$\overline{\mu}_{\text{пос},i} = \prod_{i=1}^n P_i \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right)^{-1}. \quad (2.3)$$

Вероятность пауз полученного потока $Y(\tau)$ равна противоположному событию появления импульсов. Поэтому

$$\overline{P}_{\text{пос},i} = 1 - P_{\text{пос},i}. \quad (2.4)$$

Для любого потока, в том числе и случайного, частота появления импульсов равна частоте следования пауз. Если это так, то средняя пауза время восстановления отказов будет

$$\overline{\theta}_{\text{пос},i} = \overline{P}_{\text{пос},i} (\overline{\mu}_{\text{пос},i})^{-1}. \quad (2.5)$$

В случае последовательного соединения электрооборудования отказ любой единицы оборудования приведет к отказу всей цепочки. Отказы отдельной единицы электрооборудования могут попадать как

на импульсы, так и паузы группы оборудования, то же самое относится и к релейной защите и автоматике. Когда перекрываются паузы потоков, то восстановлению должно подлежать все отказавшее электрооборудование, при этом частота отказов соединения будет меньше суммы частот отказов, рассматриваемого электрооборудования. В нашем случае наработка на отказ в сотни тысячи раз по длительности больше времени восстановления отказавшего оборудования. Если это так, то перекрывание пауз (отказов) практически не будет сказываться на параметрах искомого потока.

Если рассматривать, что

$$\overline{P}_{\text{пос},i} = \sum_{i=1}^n \overline{P}_i, \quad (2.6)$$

то при относительно большом значении n результат (2.6) может оказаться больше единицы. В действительности это совсем не так. Если полагать, что число отказов стремиться к бесконечности, а количество и наработок на отказ такое же, то в результате получается

неопределенность, которая равна отношению $\frac{\infty}{\infty}$. Раскрыв данную

неопределенность на основании, правил Лопиталья, будем иметь значение равное единице. В результате величина вероятности отказов

$\overline{P}_{\text{пос},n}$ не может быть больше единицы.

Полученные средние параметры, отображающие последовательное соединение электрооборудования с позиции надежности, не могут характеризовать его в полной мере, так как по виду законы распределения для разных соединений при одинаковых величинах средних значений и наработки на отказ, и времени восстановления отказов, могут отличаться друг от друга.

Решение данной задачи предлагается осуществлять относительно законов распределения времени восстановления

отказов. Вызвано это тем, что отказы электрооборудования практически не перекрываются друг с другом и они во много раз короче наработки на отказ. При этом по длительности наработки на отказ намного больше времени восстановления отказов, и, в тоже время, они перекрываются друг с другом. Когда анализ осуществляется относительно пауз, то плотность вероятности длительностей отказов в рассматриваемом случае будет

$$\beta_{\text{пос},n}(\theta) = \frac{1}{\mu_{\text{пос},n}} \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_{\text{пос},i} \bar{\theta}_{\text{пос},i}. \quad (2.7)$$

Установление закона распределения для длительностей времени восстановления отказов при последовательном соединении электрооборудования является задачей довольно сложной. Полученные в данном случае выражения настолько сложны, что их применение для практических целей существенно затруднено. Решение данной задачи следует осуществлять последовательно. Сначала устанавливается закон распределения для двух элементов, представляя их эквивалентным элементом. Затем, используя полученный эквивалентный элемент, заменяются три единицы эквивалентным элементом, после чего определяется закон распределения отказов для четырех единиц оборудования и т.д. По функции распределения длительностей отказов $\beta_{\text{пос},n}(\theta)$ определяется математическое ожидание длительности восстановления отказов рассматриваемого соединения:

$$\bar{\theta}_{\text{пос},n} = \int_{\theta=0}^{\infty} \theta \beta_{\text{пос},n}(\theta) d\theta. \quad (2.8)$$

Чтобы определить функцию распределения наработки на отказ последовательного соединения, предлагается использовать зависимость

$$\alpha_{\text{пос},i}(\tau) = \frac{1}{n} \prod_{i=1}^n \alpha_i(\tau). \quad (2.9)$$

По аналогии с (2.8) математическое ожидание наработки на отказ в нашем случае будет

$$\bar{\tau}_{\text{пос},n} = \int_{i=1}^n \tau_i \alpha_i(\tau) d\tau. \quad (2.10)$$

По математическим ожиданиям $\bar{\theta}_{\text{пос},n}$ и $\bar{\tau}_{\text{пос},n}$ определяется частота появления отказов в работе последовательного соединения электрооборудования

$$\bar{\mu}_{\text{пос},n} = \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{пос},n} + \bar{\theta}_{\text{пос},n}}. \quad (2.11)$$

Используя математические ожидания $\bar{\theta}_{\text{пос},n}$, $\bar{\tau}_{\text{пос},n}$ и частоту $\bar{\mu}_{\text{пос},n}$ устанавливаются вероятности появления наработки на отказ и времени восстановления отказов:

$$P_{\text{пос},n} = \bar{\tau}_{\text{пос},n} \cdot \bar{\mu}_{\text{пос},n}; \quad (2.12)$$

$$\bar{P}_{\text{пос},n} = \bar{\theta}_{\text{пос},n} \cdot \bar{\mu}_{\text{пос},n}. \quad (2.13)$$

Таблица 2.1 – Показатели надежности элементов системы электроснабжения предприятия средней мощности

Уровень системы	Элемент системы	$\bar{\tau}_i$	$\bar{\theta}_i$	$\bar{\mu}_i$	P_i	\bar{P}_i
1	2	3	4	5	6	7
1	Приемник электроэнергии	129,3333	4	0,0075	0,97	0,03
2	Пускатель	81,33333	2	0,012	0,976	0,024
	Автоматический выключатель 0,4 кВ	17,23077	2	0,052	0,896	0,104
	Кабельная линия 0,4кВ	23,58621	8	0,0317	0,7467	0,2533
3	Выкатная ячейка с выключателем 0,4 кВ	9,309278	1	0,097	0,903	0,097
	Секция шин отходная 0,4 кВ	129,3333	4	0,0075	0,97	0,03
	Шинный выключатель 0,4 кВ	21,25581	2	0,043	0,914	0,086
	Трансформатор 10 кВ	218,2222	8	0,0044	0,9646	0,0354
	Секция вводных шин 10 кВ	125,0323	4	0,0077	0,969	0,031

Окончание таблица 2.1

1	2	3	4	5	6	7
4	Вводный выключатель 10 кВ	129,3333	4	0,0075	0,97	0,03
	Кабельная линия 10 кВ	81,33333	2	0,012	0,976	0,024
	Выкатная ячейка с выключателем 10 кВ	17,23077	2	0,052	0,896	0,104
5	Секция шин отходная 10 кВ	169,3442	4	0,0058	0,9769	0,0231
	Шинный выключатель 10 кВ	9,309278	1	0,097	0,903	0,097
	Трансформатор 110 кВ	129,3333	8	0,0073	0,9417	0,0583
	Секция вводных шин 110 кВ	21,25581	2	0,043	0,914	0,086
	Выкатная ячейка с выключателем 110 кВ	218,2222	4	0,0045	0,982	0,018
6	Разъединитель	125,0323	4	0,0077	0,969	0,031

Все элементы системы в зависимости от уровня расположения, конструкционных особенностей и технологии их изготовления обладают различными показателями. Для дальнейшего анализа системы и выявления менее отказоустойчивых участков необходимо провести анализ статистических данных элементов, на предмет показателей надежности (таблица 2.1). Приведенные статистические данные показывают, что влиянию отказов наиболее подвержены продолжительные кабельные линии и высоковольтные выключатели. Также стоит отметить, что наибольший период паузы у кабельных

линий и трансформаторов. Аналогично показателям таблицы 2.1 можно представить значения для систем релейной защиты, и автоматики.

2.2. Безотказность обеспечения энергией приемников технологических машин

Обычно в системах электроснабжения промышленных предприятий для повышения отказоустойчивости обеспечения приемников электрической энергии применяют резервное электрооборудование. К сожалению, с отказом рабочего электрооборудования переход на резервное оборудование в системах электроснабжения осуществляется с задержкой времени. В результате происходит перерыв в подаче энергии на приемники рабочих машин. Длительность перерывов зависит от того, как осуществляется переход на резервное оборудование. Оно может выполняться вручную обслуживающим персоналом или автоматически с использованием средств автоматики и релейной защиты. Может оказаться, что переход осуществляется на электрооборудование, уже находящее под нагрузкой, как, например, на главных понизительных подстанциях, где обычно устанавливаются два или более силовых трансформаторов. Однако, это не исключает перерывы в обеспечении приемников электрической энергией в случае отказа силового трансформатора, осуществляющего питание отдельной группы приемников. Решение такой задачи следует осуществлять аналитически, используя теорию случайных импульсных потоков, применяя функции распределения времени восстановления отказов и наработки на отказ электрооборудования. Этот подход актуален для средств релейной защиты и автоматики.

И так, в нашем случае обеспечение электрической энергией приемников описывается случайным импульсным потоком с параметрами: P_{noc} – вероятности обеспечения электрической энергией приемников; \bar{P}_{noc} – вероятности появления отказов в

электроснабжении приемников; $\bar{\tau}_{\text{пос}}$ – математическом ожидании длительности наработки на отказ; $\bar{\theta}_{\text{пос}}$ – математическом ожидании времени восстановления отказов; $\bar{\mu}_{\text{пос}}$ – частота отказов; $\alpha_{\text{пос}}(\tau)$ – функции распределения длительности наработки на отказ; $\beta_{\text{пос}}(\theta)$ – функции распределения времени восстановления отказов. Пусть, при использовании резервного электрооборудования время остановок сокращается до $\Delta \bar{\theta}_{\text{пос}}$. Тогда

$$\Delta \bar{\theta}_{\text{пос}} = \int_0^{\Delta} \theta \beta(\theta) d\theta. \quad (2.14)$$

При любых длительностях отказов в случае включения резервного оборудования средствами защит время перерывов в электроснабжении рабочих машин остается практически постоянной величиной. Длительность значения $\bar{\theta}_{\text{пос}}$ зависит от квалификации обслуживающего персонала и сложности перехода на резерв посредством автоматики. Если использование резервного оборудования не исключает остановки рабочих машин, то частота остановок останется неизменной независимо от включения резервного оборудования. Если это так, то

$$\Delta \bar{\mu}_{\text{пос}} = \bar{\mu}_{\text{пос},\text{п}}. \quad (2.15)$$

По установленным параметрам $\Delta \bar{\theta}_{\text{пос}}$ и $\Delta \bar{\mu}_{\text{пос}}$ рассчитываются остальные значения, характеризующие безотказность последовательного соединения оборудования при использовании перехода на резервное оборудование. В данном случае расчеты

ведутся относительно остановок рабочих машин. Вероятность остановок рабочих машин станет равной

$$\Delta \bar{P}_{\text{пос}} = \Delta \bar{\theta}_{\text{пос,н}} \cdot \Delta \bar{\mu}_{\text{пос,н}}. \quad (2.16)$$

Вероятность включенного состояния рабочих машин есть противоположное значение вероятности их остановок, т.е.

$$\Delta \bar{P}_{\text{пос}} = 1 - \bar{P}_{\text{пос,н}}. \quad (2.17)$$

Математическое ожидание безотказной работы оборудования в последовательном соединении будет

$$\Delta \bar{\tau}_{\text{пос}} = \Delta \bar{P}_{\text{пос}} (\Delta \bar{\mu}_{\text{пос}})^{-1}. \quad (2.18)$$

Функция распределения наработки на отказ в данном случае практически не претерпела изменений. Она остается такой же, как и при отсутствии резервного оборудования элементов средств защиты.

$$\Delta \alpha_{\text{пос}}(\tau) \approx \Delta \alpha_{\text{пос,н}}(\tau). \quad (2.19)$$

Для пояснения, рассмотренной ситуации приведен рисунок 2.2.

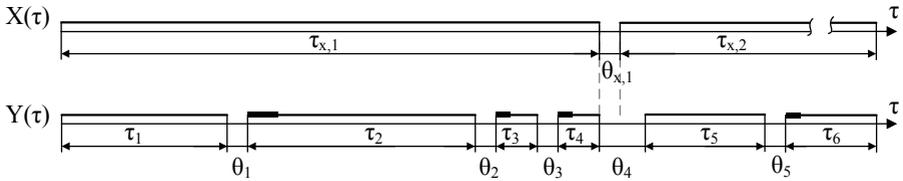


Рисунок 2.2 – Схема воздействия резервирования на длительность остановок рабочих машин при использовании дополнительного оборудования

Вообще при применении резервного оборудования для повышения безотказности системы электроснабжения возможны разные ситуации. Резервное оборудование может быть не подключено, работать параллельно с отказавшим, а возможны и случаи нахождения его на складе предприятия. Необходимо отметить, что обслуживающий персонал обладает разной квалификацией. От этого так же зависит время перехода на резерв, а, следовательно, ликвидация отказа в системе. Рассмотрим все эти ситуации. Анализ первой ситуации можно оценить по зависимостям (2.14) – (2.19). Однако, следует учитывать, что длительность отказа состоит из времени отключения отказавшего оборудования и включения нового, резервного оборудования:

$$\Delta^{(1)} = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (2.20)$$

где Δ_1 – время отключения отказавшего электрооборудования;

Δ_2 – время подключения резервного оборудования.

Когда оборудование включено и работает параллельно отказавшему оборудованию, то длительность устранения отказов будет

$$\Delta^{(2)} = \Delta_1. \quad (2.21)$$

При расчете параметров последовательного соединения оборудования следует учитывать параметры параллельно включенного оборудования. Средняя длительность для такого соединения равна

$$\bar{\tau}^{(2)} = \frac{\bar{\tau}_1 \cdot \bar{\tau}_2}{\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2}. \quad (2.22)$$

В выражении (2.22) значение $\bar{\tau}_1$ соответствует первой единице оборудования, а $\bar{\tau}_2$ равно второй единице оборудования, работающей параллельно первой. Функция распределения наработки на отказ двух единиц оборудования параллельно работающих будет

$$\alpha^{(2)}(\tau) = \alpha_1(\tau) \cdot \alpha_2(\tau). \quad (2.23)$$

Использование зависимостей (2.21) – (2.23) с применением выражений (2.14) – (2.19) позволяет в полной мере оценить безотказность последовательного соединения системы при наличии параллельно работающего оборудования на отдельных ее уровнях.

Самой нежелательной является ситуация, когда резервное оборудование к месту аварии необходимо доставлять из складских помещений. Вообще, длительность устранения отказов можно разделить на несколько составляющих: время обнаружения отказа $\theta_{об}$, организационное время $\theta_{ор}$ включающее доставку электрооборудования к месту аварии и подбора инструмента для ее устранения; времени ликвидации аварии $\theta_{л}$, время включения

установленного исправленного оборудования в работу θ_v . Все операции относительно друг друга осуществляются последовательно. При этом каждая из них не является постоянной величиной – Они переменны во времени. Если их рассматривать с позиции надежности, то для оценки можно использовать подход с применением представленных выражений (2.14) – (2.19).

В литературных источниках, при анализе функционирования обычно приводится расчетное время восстановления отказов оборудования одним электромонтером. Для того, чтобы сравнивать результаты, полученные на основании выполненных исследований по приведенному расчету, и аналогичных данных, приведенных в литературных источниках, предлагается воспользоваться тождеством

$$T_p = \frac{1}{K_p} \theta_{\text{пос,п}}, \quad (2.24)$$

где K_p – перерасчетный коэффициент, отображающий количество, участвующего ремонтного персонала в устранении отказов электрооборудования; T_p – расчетное время устранения отказов одним электромонтером.

Данное выражение (2.24) позволяет перейти от математического ожидания времени восстановления отказов электрооборудования обслуживающим персоналом к времени устранения рассматриваемых отказов одним электромонтером. В общем случае использование приведенного расчета последовательного соединения электрооборудования так же обеспечивает оценку трудоемкости устранения отказов и сравнение данных, характеризующих показатели надежности как различных литературных источников, так и производственных предприятий.

Кроме рассмотренных отказов, превышающих по длительности время перехода на резервное оборудование, возможны случаи, когда по длительности устранение отказов меньше времени перехода на

резерв. Это зависит от вида отказа и квалификации обслуживающего персонала. Устранение таких отказов не изменяет частоту отказов в системе, а средняя их длительность определяется как сумма длительностей отказов, разделенная на их число.

2.3. Обслуживание оборудования систем электроснабжения предприятий

Безотказная работа электрооборудования в системе электроснабжения промышленного предприятия зависит от многих факторов. Это и заводская надежность, где изготовлялось электрооборудование, и воздействие случайных негативных факторов, и периодичность обслуживания в процессе его эксплуатации, квалификация обслуживающего персонала, и наличие запасных частей и т.д. Отличительной особенностью факторов, воздействующих на безотказность системы, является проведение периодического ремонтно-профилактического обслуживания. Оно должно обеспечивать необходимую длительность безотказной работы оборудования. В данном случае, по сравнению с другими факторами, где оценка осуществляется путем использования длительностей, связанных с отказами, анализ должен осуществляться посредством применения наработки на отказ и отказов оборудования. Необходимо отметить, что это касается только силового оборудования и не распространяется на средства релейной защиты и автоматики. Для этой цели используются функции распределения наработки на отказ $\alpha(\tau)$ и отказов $\beta(\tau)$. Ремонтно-профилактическое обслуживание электрооборудования осуществляется через определенные промежутки времени $\tau_{рем}$, это соответствует вероятности безотказной работы оборудования. Чтобы ее определить используется функция распределения вероятности от наработки на отказ $P_{зав}(\tau)$. Строится эта функция по вероятностным параметрам завода изготовителя рассматриваемого электрооборудования. При построении такой функции длительности профилактических ремонтов

не учитываются. Если учитывать длительности принятых межремонтных периодов и профилактических ремонтов и, используя теорию случайных импульсных потоков, определять по ним параметры надежности оборудования результат будет отличаться от действительного. Разница между действительным и расчетным значениями будет увеличиваться с уменьшением длительностей межремонтных периодов. Рассмотрим эти изменения, используя рисунок 2.3. Кривая ADE отражает изменение вероятности от длительностей межремонтных периодов. Исходной величиной длительности наработки на отказ является значение τ_1 . Ему соответствует вероятность безотказной работы P_1 . С изменением длительности межремонтных периодов до величины τ_x , а значение τ_x по величине меньше τ_1 , вероятность безотказной работы увеличится. Она станет равной P_x , которая больше P_1 . В случае использования теории случайных импульсных потоков с увеличением вероятности безотказной работы вероятность появления отказов уменьшается, так как всегда выполняется условие

$$P + \bar{P} = 1. \quad (2.25)$$

С увеличением вероятности безотказной работы вероятность отказов всегда становится меньше по величине. Когда вероятность безотказной работы достигает единицы, то вероятность отказа равна нулю. А в нашем случае длительности профилактических осмотров (ремонтов) при любых условиях не равны нулю, это утверждение действительно и для средств релейной защиты и автоматики.

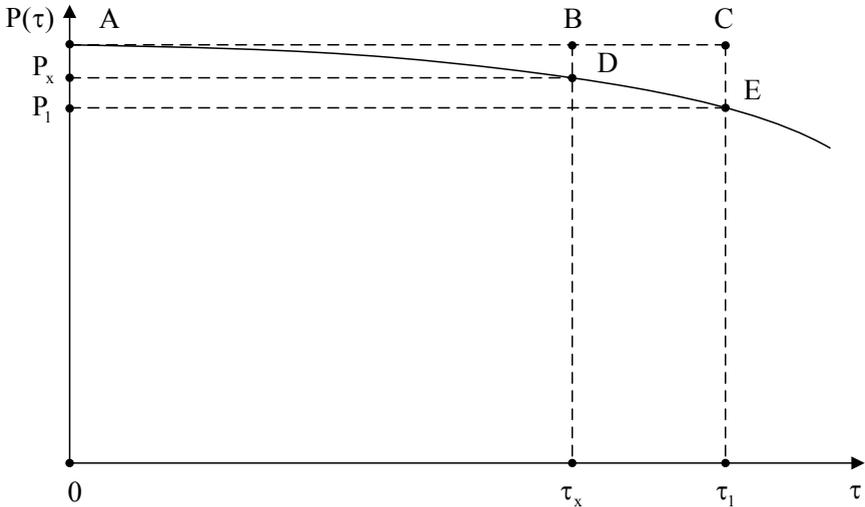


Рисунок 2.3 – Зависимость вероятности безотказной работы от наработки на отказ, характеризующая функционирование электрооборудования при применении ремонтно-профилактического обслуживания

Следовательно, когда в системе электроснабжения проводятся ремонтно-профилактические работы, их эффективность следует оценивать только, используя функцию распределения наработки на отказ. Такую оценку можно осуществлять, по графику, представленному на рисунке 2.3. В общем случае вероятность, характеризующая отказы, может быть определена как

$$\bar{P} = \frac{\bar{\theta}}{\tau + \theta}. \quad (2.26)$$

С увеличением вероятности безотказной работы P , согласно графику (рисунок 2.3), значение длительности τ уменьшается. Когда вероятность безотказной работы равна единице, то наработка на отказ будет равна нулю. А, так как длительность профилактических

ремонт не может быть равно нулю, то, согласно (2.26), вероятность отказов окажется равной единице. Естественно, это не так. Поэтому оценку в данном случае следует осуществлять, используя зависимости, характеризующие только наработки на отказ. Покажем, как это можно осуществить при помощи графика (рисунок 2.3).

Наработка на отказ электрооборудования описывается экспоненциальным законом. Величина вероятности безотказной работы составляет значения, лежащие в пределах 0,999999-0,999999999. Поэтому, кривую ADE, можно представить прямой линией AE. Тогда при изменении наработки на отказ со значения τ_1 до τ_x вероятность работы увеличится. Ее значение вместо P_1 станет равным P_x . Это значение легко определить из соотношения

$$\frac{1 - P_1}{1 - P_x} = \frac{\tau_1}{\tau_x}. \quad (2.27)$$

Тогда

$$P_x = \frac{\tau_1 - \tau_x \cdot (1 - P_1)}{\tau_1}. \quad (2.28)$$

Если необходимо оценить вероятность безотказной работы за счет проведения профилактических ремонтов не отдельной единицы электрооборудования, а целой группы, то необходимо учитывать зависимости

$$P_s = \prod_{i=1}^n P_i, \quad \tau_s = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right)^{-1}. \quad (2.29)$$

В результате, для группы оборудования, подвергнутого ремонтно-профилактическому обслуживанию, получим

$$P_{s,x} = \frac{\tau_s - \tau_{s,x} \cdot (1 - P_s)}{\tau_s}. \quad (2.30)$$

Если использовать данную зависимость, то можно выполнить оценку для электрического оборудования, установленного на любом уровне системы электроснабжения. Так же можно выполнять расчеты и для комплексных соединений электрооборудования в системе. Этот подход справедлив и для систем релейной защиты и автоматики. В качестве примера выполним оценку для разъединителя типа РНДЗ-2-110/1000, установленного на главной понизительной подстанции предприятия. Пусть вероятность работы разъединителя будет равна 0,994999, при наработке на отказ $\tau = 67 \cdot 10^5$. Через какой промежуток времени нужно проводить ремонтно-профилактическое обслуживание τ_s , чтобы обеспечить вероятность безотказной работы разъединителя равную $P_{s,x} = 0,999999$? Используя (2.30) получим

$$\tau_s = \frac{67 \cdot 10^5 \cdot (1 - 0,999999)}{1 - 0,994999} = 1339 \text{ ч} = 55,8 \text{ суток}.$$

Чтобы обеспечить требуемую безотказность работы разъединителя, его ремонтно-профилактическое обслуживание следует осуществлять через 1339 часов, 55,8 суток.

В соответствии с выполненными многочисленными расчетами получено, что для обеспечения высокой вероятности безотказной работы оборудования систем электроснабжения на действующих промышленных предприятиях требуется достаточно частое его обслуживание. Наблюдается закономерность, согласно которой оборудование, расположенное ближе к рабочей машине, необходимо

чаще обслуживать. Этот факт осложняется тем, что со снижением уровня увеличивается количество однотипного оборудования, а это требует увеличения количества ремонтного персонала. Следовательно, для повышения безотказной работы или почти полного устранения отказов, необходимо увеличивать численность ремонтного персонала или использовать электрооборудование, обладающее большей заводской надежностью. Основным выходом из данной ситуации служит автономное наблюдение не только за отдельными единицами электрооборудования, но и его узлами, а также проведение ремонтно-профилактического обслуживания, когда это необходимо.

В настоящее время решение данной задачи состоит в создании роботизированных систем. Они должны осуществлять ремонтно-профилактическое обслуживание оборудования систем электроснабжения без участия человека. Для упрощения рассматриваемой задачи следует максимально унифицировать узлы электрооборудования. Такой подход позволит значительно повысить скорость ремонта, используя устройства, базирующиеся на средствах автоматики и релейной защиты.

В общем случае отказоустойчивость систем определяется надежностью отдельных единиц оборудования, их наработкой на отказ и длительностями отказов. Нарботка на отказ зависит от заводской надежности и технологических особенностей производства, а длительность отказа - от наличия резервного оборудования и времени, затрачиваемого на восстановление ремонтным персоналом. Профилактическое обслуживание оборудования повышает безотказность оборудования, что напрямую зависит от квалификации персонала и возможностей автоматики. В последнее время определяющим фактором в устранение отказов является программное обеспечение средств релейной защиты и автоматики, но и в этом случае возможны отказы ввиду не абсолютной надежности устройств и систем автоматики. Поэтому следует, что оценку отказоустойчивости систем следует проводить по наработке на отказ и длительностям отказов.

2.4. Повышение отказоустойчивости систем электроснабжения предприятия

Для обеспечения оптимального уровня системы электроснабжения, необходимо, чтобы резервное электрооборудование было предварительно подключено. Это обеспечивается временным резервированием. Если использовать структурное резервирование, то оно не обеспечивает устранение отказов оборудования в полной мере. В этом случае только уменьшаются отказы по длительности, значит, частота отказов в системе не изменяется. Используя теорию случайных импульсных потоков, оценим влияние средств автоматики и релейной защиты на отказы электрооборудования при временном резервировании. Вероятность, характеризующая уменьшение отказов в системе электроснабжения от применения релейной защиты и средств автоматики, определится равенством

$$\overline{\Delta P}_в = \overline{P}_в - \overline{P}_в \cdot \overline{P}_{р,з}, \quad (2.31)$$

где $\overline{\Delta P}_в$ – вероятность уменьшения отказов единицы электрооборудования при временном резервировании средствами релейной защиты и автоматики; $\overline{P}_в$ – вероятность отказов электрооборудования при временном резервировании; $\overline{P}_{р,з}$ – вероятность отказов средств релейной защиты и автоматики отдельной единицы электрооборудования.

Уменьшение средней длительности отказов электрооборудования при временном резервировании за счет воздействия средств релейной защиты и автоматики будет

$$\Delta \bar{\theta}_B = \bar{\theta}_B - \frac{\bar{\theta}_B \cdot \bar{\theta}_{p,3}}{\bar{\theta}_B + \bar{\theta}_{p,3}}, \quad (2.32)$$

где $\bar{\theta}_B$ – средняя длительность отказов единицы электрооборудования; $\bar{\theta}_{p,3}$ – средняя длительность отказов средств релейной защиты и автоматики единицы электрооборудования.

Уменьшение частоты отказов отдельной единицы электрооборудования при воздействии средств защиты в случае временного резервирования

$$\Delta \bar{\mu}_B = \bar{P}_B \cdot (\Delta \bar{\theta}_B)^{-1}. \quad (2.33)$$

Функция распределения уменьшения длительностей отказов при временном резервировании с воздействием релейной защиты и средств автоматики определяется выражением

$$\Delta f_B(\theta) = f_{B,3}(\theta) \cdot f_{p,3}(\theta), \quad (2.34)$$

где $f_{B,3}(\theta)$ – функция распределения длительностей отказов электрооборудования при временном резервировании; $f_{p,3}(\theta)$ – функция распределения длительностей отказов элементов релейной защиты и средств автоматики.

На отдельных уровнях систем электроснабжения оборудование между собой может соединяться параллельно, но возможны и случаи смешанного соединения. Когда на уровне электрооборудование соединено параллельно, то параметры надежности таких соединений с

учетом средств релейной защиты и автоматики выразятся выражениями

$$\Delta \bar{P}_{п,в,у} = \left(\bar{P}_{1,в,у} - \bar{P}_{1,в,у} \cdot \bar{P}_{1,р,з} \right) \cdot \left(\bar{P}_{2,в,у} - \bar{P}_{2,в,у} \cdot \bar{P}_{2,р,з} \right); \quad (2.35)$$

$$\Delta \bar{\theta}_{п,в,у} = \frac{\left(\frac{\bar{\theta}_{1,в,у} - \frac{\bar{\theta}_{1,в,у} \cdot \bar{\theta}_{1,р,з}}{\bar{\theta}_{1,в,у} + \bar{\theta}_{1,р,з}} \right) \cdot \left(\frac{\bar{\theta}_{2,в,у} - \frac{\bar{\theta}_{2,в,у} \cdot \bar{\theta}_{2,р,з}}{\bar{\theta}_{2,в,у} + \bar{\theta}_{2,р,з}} \right)}{\left(\frac{\bar{\theta}_{1,в,у} - \frac{\bar{\theta}_{1,в,у} \cdot \bar{\theta}_{1,р,з}}{\bar{\theta}_{1,в,у} + \bar{\theta}_{1,р,з}} \right) + \left(\frac{\bar{\theta}_{2,в,у} - \frac{\bar{\theta}_{2,в,у} \cdot \bar{\theta}_{2,р,з}}{\bar{\theta}_{2,в,у} + \bar{\theta}_{2,р,з}} \right)}, \quad (2.36)$$

$$\Delta \bar{\mu}_{п,в,у} = \Delta \bar{P}_{п,в,у} \left(\Delta \bar{\theta}_{п,в,у} \right)^{-1}; \quad (2.37)$$

$$\Delta f_{п,в,у}(\theta) = \left(f_{1,в,у}(\theta) \cdot f_{1,р,з}(\theta) \right) \cdot \left(f_{2,в,у}(\theta) \cdot f_{2,р,з}(\theta) \right), \quad (2.38)$$

где $\Delta \bar{P}_{п,в,у}$, $\Delta \bar{\theta}_{п,в,у}$, $\Delta \bar{\mu}_{п,в,у}$ и $\Delta f_{п,в,у}(\theta)$ –

уменьшение вероятности, средней длительности, частоты и изменение функции распределения уменьшения длительностей отказов параллельного соединения электрооборудования уровня при воздействии средств релейной защиты и автоматики.

Более общим является смешанное соединение электрооборудования уровня в случае воздействия на него средств релейной защиты и автоматики. Для решения такой задачи следует поступить следующим образом. Сначала параллельное соединение электрооборудования заменяется одним эквивалентным элементом, в результате образуется последовательное соединение на уровне. Затем последовательное соединение представляется одним элементом, для которого и устанавливаются искомые вероятностные параметры оборудования уровня с воздействием на его отказы средств релейной защиты и автоматики. Как правило, в системах электроснабжения наблюдается не более трех единиц электрооборудования, хотя

предложенный подход позволяет вести оценку для любого числа единиц оборудования. При этом

$$\begin{aligned} \overline{\Delta P}_{\Sigma, п, в, у} = & \left(\overline{P}_{1, в, у} - \overline{P}_{1, в, у} \cdot \overline{P}_{1, п, з} \right) \cdot \left(\overline{P}_{2, в, у} - \overline{P}_{2, в, у} \cdot \overline{P}_{2, п, з} \right) \cdot \dots \\ & \dots \cdot \left(\overline{P}_{n-1, в, у} - \overline{P}_{n-1, в, у} \cdot \overline{P}_{n-1, п, з} \right) \left(\overline{P}_{n, в, у} - \overline{P}_{n, в, у} \cdot \overline{P}_{n, п, з} \right). \end{aligned} \quad (2.39)$$

Средняя длительность отказов определяется из выражения

$$\begin{aligned} \frac{1}{\overline{\Delta \theta}_{\Sigma, п, в, у}} = & \frac{1}{\overline{\theta}_{1, в, у} - \frac{\overline{\theta}_{1, в, у} \cdot \overline{\theta}_{1, п, з}}{\overline{\theta}_{1, в, у} + \overline{\theta}_{1, п, з}}} + \frac{1}{\overline{\theta}_{2, в, у} - \frac{\overline{\theta}_{2, в, у} \cdot \overline{\theta}_{2, п, з}}{\overline{\theta}_{2, в, у} + \overline{\theta}_{2, п, з}}} + \dots \\ & \dots + \frac{1}{\overline{\theta}_{n-1, в, у} - \frac{\overline{\theta}_{n-1, в, у} \cdot \overline{\theta}_{n-1, п, з}}{\overline{\theta}_{n-1, в, у} + \overline{\theta}_{n-1, п, з}}} + \frac{1}{\overline{\theta}_{n, в, у} - \frac{\overline{\theta}_{n, в, у} \cdot \overline{\theta}_{n, п, з}}{\overline{\theta}_{n, в, у} + \overline{\theta}_{n, п, з}}}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Если использовать значения $\overline{\Delta P}_{\Sigma, п, в, у}$ и $\overline{\Delta \theta}_{\Sigma, п, в, у}$, то $\overline{\Delta \mu}_{\Sigma, п, в, у}$ и $\overline{\Delta f}_{п, в, у}(\theta)$ определяются из равенств

$$\overline{\Delta \mu}_{\Sigma, п, в, у} = \overline{\Delta P}_{\Sigma, п, в, у} \cdot \left(\overline{\Delta \theta}_{\Sigma, п, в, у} \right)^{-1}. \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \overline{\Delta f}_{п, в, у}(\theta) = & \left[f_{1, в, у}(\theta) f_{1, п, з}(\theta) \right] \cdot \left[f_{2, в, у}(\theta) f_{2, п, з}(\theta) \right] \cdot \dots \\ & \dots \cdot \left[f_{n-1, в, у}(\theta) f_{n-1, п, з}(\theta) \right] \cdot \left[f_{n, в, у}(\theta) f_{n, п, з}(\theta) \right]. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Если на уровне несколько параллельных соединений электрооборудования, то для каждого из соединений определяется эквивалентный элемент. В результате образуется последовательное соединение, для которого, в конечном счете, и оценивается влияние средств релейной защиты и автоматики на параметры надежности

оборудования уровня, используются для оценки выражения аналогичные (2.7) – (2.10). В остальном расчеты сводятся к анализу аналогичному при оценке влияния защит, когда в системе осуществляется структурное резервирование.

Выполненные в представленной работе научные разработки относятся к области отказоустойчивости систем электроснабжения. Они служат основой при оценке надежности электрооборудования электрических систем промышленных предприятий. Это, в первую очередь, способы оценки отказоустойчивости средств релейной защиты и автоматики электрического оборудования уровней систем электроснабжения промышленных предприятий. В результате получены простые аналитические выражения, связывающие воздействие средств релейной защиты и автоматики на длительность отказов электрооборудования, независимо от средств и способов повышения его надежности при наличии в системе случайных негативных факторов. Для упрощения получения результатов надежности систем и их электрооборудования установленные зависимости позволяют создать программный комплекс оценки повышения отказоустойчивости систем электроснабжения. Это осуществляется за счет выбора их наиболее оптимальных конфигураций электрических систем на основе критерия частоты отказов электрооборудования с учетом стоимости систем релейной защиты и автоматики. Также на основе полученных сведений можно для упрощения расчетов можно создавать математические модели уровней систем электроснабжения, отличающиеся учетом структур их соединений. Простые алгебраические уравнения, существенно упрощают процесс анализа взаимосвязи между электрооборудованием уровней системы электроснабжения. При этом следует отметить, что решение задач по минимизации длительностей отказов в системе электроснабжения, позволяет обеспечивать повышенный выпуск продукции предприятием с уменьшением потерь потребляемой энергии.

2.5. Выводы по главе

1. Если рассматривать электроснабжение приемников промышленного предприятия, то в данном процессе участвует электрооборудование системы, включенное относительно друг друга последовательно. С отказом отдельного электрооборудования произойдет вынужденная остановка технологической машины. Для оценки взаимосвязей между электрооборудованием предлагается поступить следующим образом: составить математическую модель; функционирование отдельной единицы электрооборудования представить случайным импульсным потоком с единичной высотой импульсов. Параметры и законы распределения наработки на отказ и времени устранения отказов потока принимаются известными. Необходимо отметить, что случайным импульсным потоком можно описывать и не силовые элементы систем электроснабжения, например, средства релейной защиты и автоматики. Использование средств управления с высоким показателем надежности позволяет повысить отказоустойчивость электроснабжения как отдельно взятого приемника, так и системы в целом, поэтому их характеристики будут сказываться на работе системы.

2. Обычно в системах электроснабжения промышленных предприятий для повышения отказоустойчивости обеспечения приемников электрической энергии применяют резервное электрооборудование. К сожалению, с отказом рабочего электрооборудования переход на резервное оборудование в системах электроснабжения осуществляется с задержкой времени. В результате происходит перерыв в подаче энергии на приемники рабочих машин. Длительность перерывов зависит от того, как осуществляется переход на резервное оборудование. Оно может выполняться вручную обслуживающим персоналом или автоматически с использованием средств автоматики и релейной защиты. Может оказаться, что переход осуществляется на электрооборудование, уже находящее под нагрузкой, как, например, на главных понизительных подстанциях, где обычно устанавливаются два или более силовых трансформаторов.

Однако, это не исключает перерывы в обеспечении приемников электрической энергией в случае отказа силового трансформатора, осуществляющего питание отдельной группы приемников. Решение такой задачи следует осуществлять аналитически, используя теорию случайных импульсных потоков, применяя функции распределения времени восстановления отказов и наработки на отказ электрооборудования. Этот подход актуален для средств релейной защиты и автоматики.

3. Безотказная работа электрооборудования в системе электроснабжения промышленного предприятия зависит от многих факторов. Это и заводская надежность, где изготовлялось электрооборудование, и воздействие случайных негативных факторов, и периодичность обслуживания в процессе его эксплуатации, квалификация обслуживающего персонала, и наличие запасных частей и т.д. Отличительной особенностью факторов, воздействующих на безотказность системы, является проведение периодического ремонтно-профилактического обслуживания. Оно должно обеспечивать необходимую длительность безотказной работы оборудования. В данном случае, по сравнению с другими факторами, где оценка осуществляется путем использования длительностей, связанных с отказами, анализ должен осуществляться посредством применения наработки на отказ и отказов оборудования. Необходимо отметить, что это касается только силового оборудования и не распространяется на средства релейной защиты и автоматики.

4. Для обеспечения оптимального уровня системы электроснабжения, необходимо, чтобы резервное электрооборудование было предварительно подключено. Это обеспечивается временным резервированием. Если использовать структурное резервирование, то оно не обеспечивает устранение отказов оборудования в полной мере. В этом случае только уменьшаются отказы по длительности, значит, частота отказов в системе не изменяется. Используя теорию случайных импульсных потоков, оценим влияние средств автоматики и релейной защиты на отказы электрооборудования при временном резервировании.

2.6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение вероятности появления импульсов потока, графическое представление случайным импульсным потоком.
2. Как определяются следующие величины?
 - вероятность появления импульсов потока,
 - средняя длительность импульсов потока последовательного соединения оборудования,
 - частота следования наработки на отказ обеспечения энергией приемников,
 - вероятность пауз полученного потока,
 - плотность вероятности длительностей отказов.
3. Как определяются следующие величины?
 - математическое ожидание длительности восстановления отказов,
 - функция распределения наработки на отказ последовательного соединения,
 - математическое ожидание наработки на отказ,
 - частота появления отказов в работе последовательного соединения,
 - вероятность появления наработки на отказ и времени восстановления отказов.
4. Как рассчитываются значения, характеризующие безотказность последовательного соединения оборудования при использовании перехода на резервное оборудование?
5. Приведите зависимость вероятности безотказной работы от наработки на отказ.
6. Как определяется вероятность, характеризующая уменьшение отказов в системе электроснабжения от применения релейной защиты и средств автоматики?
7. Как определяется средняя длительность отказов?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Функциональные задачи АСУ электроснабжением. Оценка надежности и оперативный расчет режимов систем электроснабжения / М.С. Ершов, Г.Н. Малиновская, А.А. Трифонов // Главный энергетик. 2011. № 3. С. 44-47.
2. Оценка функционального состояния системы электроснабжения с учетом схемно-режимных параметров / С.А. Дмитриев, А.И. Хальясмаа, А.С. Семериков // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2016. Т. 1. С. 180-185.
3. Афонин, В. А. Основы теории надежности: учебное пособие / под ред. И.И. Ладыгина // М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 208 с.
4. Системы электроснабжения - подсистемы электроэнергетических систем / А.А. Глазунов, В.А. Строев, Ю.В. Шаров // Электричество. 2007. № 9. С. 5-9.
5. Оценка эффективности сооружения собственных электростанций на промышленном предприятии / М.А. Короткевич, А.Л. Старжинский // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 5. С. 80-85.
6. Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса / О.А. Григорьева, Т.В. Кривенко, В.А. Тремясов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 2 (243). С. 45-52.
7. Сравнительный анализ систем активного и пассивного отвода тепла активной зоны реактора ВВЭР-1000 в условиях обесточивания / Р.З. Аминов, В.Е. Юрин, А.Н. Егоров, Д.О. Башлыков // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 3. С. 62-69.
8. Оценка оборудования по уровню надежности на примере систем электроснабжения сталеплавильных производств / Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Зацепин Е.П. // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2017. № 1 (47). С. 38-46.

9. Показатели и методы расчета надежности в энергетическом хозяйстве / Б.М. Якуб // Электричество. 1934. № 18. С. 1-13.
10. Основы нормирования потребления электроэнергии в промышленности СССР / Е.А. Руссаковский // Электричество. 1938. №2. С. 4-11.
11. Рациональное электропотребление в промышленности / Е.А. Руссаковский // Электричество. 1939. №5. С. 10-16.
12. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры: Справочное руководство / В.А. Луцкий // Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 148 с.
13. Экономика долговечности и надежности машин / Л.Я. Шухгальтер // М.: Изд-во экономической литературы, 1963. 148 с.
14. Основы эксплуатации вычислительной техники. Вопросы надежности и контроля работы ЦВМ: Учебное пособие. Л.: ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1964. 178 с.
15. Надежность горных машин и комплексов / А.В. Топчиев, П. Гетопанов, В.И. Солод, И.А. Шпильберг // М.: Недра, 1968. 88 с.
16. Вероятностные методы расчета надежности, профилактики и резерва горных машин / Г.С. Рахутин // М.: Недра, 1970. 204 с.
17. Определение математического числа ожидания аварийных отключений систем электроснабжения / Ю.Б. Гук, Р.М. Рудакова // Электричество. 1970. №7. С. 71-74.
18. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин // Л.: Энергия. 1976. 248 с.
19. Надежность летательных аппаратов / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич // М.: Высшая школа. 1975. 296 с.
20. Оценка эффективности сложных систем / И. А. Ушаков // Надежность радиоаппаратуры. М.: Советское радио. 1960. 197 с.
21. Надежность сложных информационно-управляющих систем / В.А. Гадасин, И.А. Ушаков // М.: Советское радио. 1975. 192 с.
22. Вопросы надежности радиоаппаратуры при механических нагрузках / Ю. К. Коненков, И. А. Ушаков // М.: Советское радио. 1975. 144 с.

23. Основы теории надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б. С. Сотсков // М.: Энергия. 1970. 285 с.

24. Об однолинейной системе массового обслуживания с потерями / О.И. Бронштейн, А.Л. Райкин, В.В. Рыков // Изв. АН ССР. Техническая кибернетика. 1965. № 4. С. 97-105.

25. Об одной управляемой системе обслуживания / О.И. Бронштейн, Е.Б. Веклеров // Изв. АН ССР. Техническая кибернетика. 1967. № 5. С. 43-47.

26. Об оптимальных приоритетах в системах обслуживания / О.И. Бронштейн, В. В. Рыков // Изв. АН ССР. Техническая кибернетика. 1965. № 6. С. 52-58.

27. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев // М.: Наука. 1965. 524 с.

28. Инженерные методы расчета надежности / И. А. Ушаков // М.: Знание. 1970. 242 с.

29. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. - М.: Наука. 1978. 400 с.

30. Элементы теории надежности технических систем / А.Л. Райкин // М.: Советское радио. 1978. 280 с.

31. Таблицы для расчета надежности и оптимального резерва / А.Л. Райкин, О.С. Кравцов, В.С. Пенин // М.: Советское радио. 1971. 278 с.

32. Entwicklung der Produktionsvorbereitung-Hauptweg zur Intensivierung des Instandhaltungsprozesses / D. Marx // Energietechnik 30 (1980). №3. P. 81-84.

33. Die wissenschaftliche Arbeitsorganisation (WAO) bei der technologischen Vorbereitung in der Instandhaltung und die Beziehmigen Technologie- Nomi-Lohn / T. Rudolf // Energietechnik 30 (1980). № 3. P. 84-89.

34. Математическая модель для анализа надежности генераторов с учетом развития дефектов / В.А. Цветков // Электричество. 1992. № 11. С. 64-66.

35. К вопросу оптимизации периодичности предупредительных

замен и ремонтов электрооборудования / В.А. Володарский // Промышленная энергетика. 1988. № 8. С. 34-36.

36. О группировании восстанавливаемого оборудования по надежности на основе ретроспективных данных / В.А. Цветков // Электричество. 1994. № 7. С. 1-6.

37. ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов. 1985. 14 с.

38. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Изд-во Стандартиформ. 2016. 23 с.

39. Адаптивная математическая модель надежности системы электроснабжения города / В.Л. Бузовкин, И.Е. Васильев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2005. № 5. С. 19-22.

40. Прогнозирование отказов и неблагоприятных событий в электротехнических системах электроснабжения / А.А. Жуковский // В сборнике: Инновации и инновационные технологии в науке. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2016. С. 9-11.

41. Оценка показателей надежности схем электроснабжения с учетом времени наработки на отказ / Н.П. Бадалян, Г.В. Квашнина, Е.А. Чащин // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2016. № 2. С. 56-65.

42. Количественное определение и сравнительная оценка надежности энергетических массивов / В.Я. Хорольский, А.Б. Ершов, А.В. Ефанов // Электротехника. 2017. № 8. С. 19-22.

43. О надежности резервирования систем при периодическом обслуживании / А.Д. Малев // Известия АН СССР. Телемеханика и кибернетика. 1964. № 3. С. 75-83.

44. Построение высоконадежных систем / И.А. Ушаков // М.: Знание. 1974. 64 с.

45. Качественная оценка надежности распределительных систем электроснабжения / Л.Я. Бессарабов, М.Н. Комбаров // Энергетика: Сб. на-уч. трудов КазПТИ. Ама-Ата. 1974. Вып. 4. С. 113-

120.

46. Ущерб, надежность, резерв / Н.С. Афонин // Промышленная энергетика. 1966. № 1. С. 27-29.

47. Методы решения простейших задач оптимального резервирования при ограничениях / И.А. Ушаков // М.: Советское радио. 1969. 176 с.

48. Надежность электроснабжения и электрические нагрузки / Р.Я. Федосенко // М.: Энергия. 1967. 147 с.

49. Оптимизация проектирования систем электроснабжения с учетом возможных ситуаций и вероятностных параметров надежности / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. 2017. № 2(48). С. 22-26.

50. Надежность технических систем / Л.П. Леонтьев. // Рига: Знание. 1969. 266 с.

51. Повышение эффективности системы электроснабжения энергонасыщенного производства / А. М. Вдовин // Казань: Изд-во КГЭУ. 2012. 226 с.

52. Расчет надежности электроснабжения при ограниченном резервировании / Е.М. Червонный // Промышленная энергетика. 1977. № 6. С. 29-32.

53. Патент RU 2208890 С1, МПК H02J 3/28, H02J 15/00. Способ бесперебойного электроснабжения потребителей электроэнергетической системы, работающей на возобновляемых источниках энергии / Дмитриев В.С., Куролес В.К., Савчук В.Д., Трусов В.Н. (RU); патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие Государственное машиностроительное конструкторское бюро "Радуга" (RU) – 2002102794/09; Заяв. 06.02.2002; Оpubл. 20.07.2003, Бюл. № 20.

54. Оценка надежности резервированных систем электроснабжения / В.В. Михайлов // Промышленная энергетика. 1968. № 10. С. 24-27.

55. Оптимизация развития и управление большими системами энергетики / Л. А. Мелентьев // М.: Высшая школа. 1976. 336 с.

56. Пути повышения надежности энергоснабжения страны /

- А.Ф. Дьяков // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 3. С. 214.
57. Об основных направлениях теории надежности / Н. Г. Бруевич, М. В. Грабовецкий // М.: Приборостроение. 1963. № 8. С. 45-47.
58. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Методы исследования / Ю. Н. Руденко, М. Б. Челыцов // Новосибирск: Сиб. Изд-во. 1974. 263 с.
59. Расчет надежности схем электрических соединений / Ф.И. Синьчуков // М.: Энергия. 1971. 245 с.
60. Определение расчетных нагрузок элементов систем электроснабжения с учетом их функциональной надежности / Ю.А. Фокин, Д. Мунасингха // Электричество. 1974. № 7. С. 9-14.
61. Некоторые вопросы надежности электроэнергетических систем электроснабжения / Ю.А. Фокин // Электричество. 1975. №5. С. 2-12.
62. Статическая оценка показателей надежности электрооборудования / Е.М. Червонный // Электричество. 1975. №6. С. 17-21.
63. К оценке надежности и эффективности работы распределительных сетей с автоматическим секционированием / Н.М. Зуль // Электричество. 1966. № 2. С. 19-23.
64. О применении методов линейного программирования для решения некоторых задач теории надежности / А.А. Алатырцев // Стандартизация. 1963. № 5. С. 28-32.
65. Математические методы оптимального управления / В.Г. Голтянский // М.: Наука. 1969. 197 с.
66. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г.Н. Черкессов // М.: Советское радио. 1974. 296 с.
67. Надежность сложных систем электроснабжения / В.В. Михайлов, В.И. Эдельман // Электричество. 1976. №1. С. 31-34.
68. Importance of Reliability Criterion in Power System Expansion Planning, Goran Slipac, Mladen Zeljko and Damir Šljivac, in Energies 2019. Issue 12. P. 1714.

69. Cznaznecki and M. Lindmayer. «Influence of contact material properties on the behavior of vacuum arcs around current zero», in Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Applications, 1986. Nagoya, Japan. P. 895-902.

70. J. Kosmac, P. Zunko. A Statistical Vacuum Circuit Breaker model for simulator of Transient Overvoltages. IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. Vol. 10, № 1. Vol. 10. P. 294-300.

71. Somani A. K., Ritcey J. A., Au S. H. L. Computationally efficient phasedmission reliability analysis for systems with variable configurations, TREE Trans. Reliab. R-41. 1992. P. 504-510.

72. Who Kee Chung, Reliability and availability analysis of cold standby system with repair and multiple non-critical and critical errors, Microelectron. Reliab. 1994. Volume 34. Issue 12. P. 1891-1896.

73. Барлоу Р., Хантер Л., Прошан Ф. Оптимальная избыточность при двух типах отказов элементов / Под ред. И. А. Ушакова // М.: Изд -во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. 1968. С. 118-129.

74. Reliability and durability of mining electrical switchgear (Niezawodnose i trwałosc maszyn elektrycznych do wydobycia węgla kamiennego) / G. Wolny, W. Siwek // Zeszyty Naukowe politechniki slaskiej 1978. № 590. 187-194 p.

75. Time to failure and availability of paralleled systems with repair / D. P. Gawer // Trans. YRE. PGRQC. 1963. 30-38 p.

76. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин / Под ред. Д.Н. Решетова // М.: Высшая школа. 1988. 238 с.

77. Условия эксплуатации и надежность автомобилей / Е.С. Кузнецов, Ю.В. Андрианов // Автомобильная промышленность, 1981, № 1. С. 8-9.

78. Надежность двигателей грузовых, автомобилей в эксплуатации / Е.А. Индикт, А.В. Галицкий, Г.Л. Дрибинский // Автомобильная промышленность. 1978. № 11. С. 7-10.

79. Развитие конструкции тракторов / Н. Н. Маркелов // Тракторы и сельхозмашины. 1978. № 8. С. 9-13.

80. Эксплуатационная надежность электросетей

сельскохозяйственного назначения / Р.Я. Федосенко, А.Я. Мельников // М.: Энергия, 1977. 320 с.

81. Выбор уровня эксплуатационной надежности электровоза / Д.А. Палей, В.Ч. Озембловский, М.А. Факторович // Вест. ВНИИЖТ. 1981. № 4, С. 22-26.

82. Altmann W. Sanierung städtischer Gasrohrleitungen / W. Altmann // Energieelektronik 40 (1990). № 7. P. 243-247.

83. Испытания и надежность радиоэлектронных комплексов / А. Я. Резиновский // М.: Радио и связь. 1985. 168 с.

84. Расчет электрических сетей угольных предприятий / В. П. Муравьев // М.: Недра. 1975. 184 с.

85. Муравьев В. П. Определение показателей надежности дублированных цепей систем электроснабжения: Записки ЛГИ. 1975. Т. 67 Вып. 1. С. 277-284.

86. Исследование комплексных показателей надежности ремонтпригодности центробежных насосов / Б.Н. Башуров // Промышленная энергетика. 1986. № 8. С. 55-57.

87. Об определении предельных сроков эксплуатации энергооборудования / А.Н. Шишов, Н.Г. Бухаринов // Промышленная энергетика. 1987. № 11. С. 18-20.

88. Белых Б. П. Анализ отказов элементов систем электроснабжения железорудных карьеров / Б.П. Белых, Б.И. Заславец // Промышленная энергетика. 1971. № 9. С. 29-33.

89. К вопросу о надежности электрической части АЭС / И.Я. Емельянов, А.И. Клемин // Изв. АН СССР . Энергетика и транспорт. 1979. №6. С. 65-71.

90. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях / Я.А. Цирель, В.С. Поляков // Л.: Энергоатомиздат. 1985. 245 с.

91. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю.Б. Гук // Л.: Энергоатомиздат. 1988. 224 с.

92. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Н. Руденко // М.: Энергоатомиздат. 1983. 33 с.

93. Определение количественных характеристик надежности и закона распределения времени безотказной работы некоторых типов электрических машин / А.С. Леневич // Электротехника. 1965. № 6. С. 9-14.

94. О законе распределения времени безотказной работы электродвигателей / А.С. Леневич // Электромеханика. 1967. № 8. С. 858-863.

95. Обеспечение надежности электроснабжения потребителей при автоматическом проектировании электрических сетей нефтяных месторождений / Ю.Б. Новоселов // Промышленная энергетика. 1987. № 8. С. 14-16.

96. Оценка надежности систем электроснабжения с учетом природно-климатических условий / В.А. Яшков // Промышленная энергетика. 1987. № 4. С. 17-18.

97. Воздушные линии электропередачи: допросы эксплуатации и надежности / И.Г. Берг, В.И. Эдельман. // - М.: Энергоатомиздат. 1985. 147 с.

98. Анализ взаимодействия окружающей среды на электроустановки / И. И. Красовский // Кишинев: Штинца. 1984. 143 с.

99. Проблемы надежности и механики воздушных линий / Л.М. Кесельман // Электричество. 1991. № 10. С. 23-29.

100. Анализ надежности при планировании развития основных и распределительных сетей / В.Р. Ник // Электричество. 1994. № 11. С. 1-5.

101. Оценка надежности при проектировании электрических сетей / Н.И. Хаубрих // Изв. АН Энергетика. 1994. № 6. С. 38-43.

102. Анализ надежности питающих электрических сетей при вероятностно-определенных условиях изменения параметров режима и структуры / Ю.Н. Кучеров // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. Вып. 2. № 7. С. 15-18.

103. Беляев Ю.К. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. Под ред. И. А. Ушакова. // М.: Радио и связь. 1985. 608 с.

104. Особенности расчета показателей надежности схем

электрических сетей / В.В. Зорин, В.В. Тисленко // Энергетика. 1973. № 6. С. 15-21.

105. Оптимизация надежности электроэнергетических систем / Г. А. Волков // М.: Наука. 1986. 116 с.

106. К вопросу обеспечения надежности систем электроснабжения / В.А. Яшков // Промышленная энергетика. 1987. № 5. С. 2-22.

107. Надежность и резервирование в электрических системах / Ю.Н. Руденко, М.Б. Чельцов // Новосибирск: Наука. 1974. 263 с.

108. Проблемы повышения эффективности использования трансформаторов систем электроснабжения промышленных предприятий / В.В. Шевченко, В.В. Менчик // Промышленная энергетика. 1987. № 9. С. 27-30.

109. Резервирование в сетях электроэнергетических систем / В.И. Свешников, Ю.А. Фокин // Электричество. 1994. № 5. С. 12-16.

110. Электроснабжение городов / В.А. Козлов // Л.: Электроатомиздат. 1988. 268 с.

111. Надежность систем электроснабжения / В.В. Зорин, Ф. Клеппель, В.В. Тисленко и др. // Киев: Виша школа. 1984. 192 с.

112. Обоснование объема резервирования для электроприемников / Э.А. Лосев, В.Г. Завадский // Промышленная энергетика. 1985. № 2. 12-14 с.

113. Оценка оптимальности систем промышленного электроснабжения / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. 1994. № 2. С. 12-14.

114. О технико-экономической оценке вариантов систем электроснабжения промышленных предприятий / В.Н. Усихин // Электричество. 1994. № 11. С. 17-21.

115. Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок шахт / В.П. Муравьев, Г.И. Разгильдеев // М.: Недра. 1970. 144 с.

116. Автоматизированное управление системой электроснабжения предприятия / А. Н. Гужов, А. Е. Куликов // Промышленная энергетика. 1987. № 11. С. 36-39.

117. Некоторые вопросы надежности и экономичности электроснабжения морских портов / М.И. Хариф // Промышленная энергетика 1987. № 3. С. 25-29.

118. Вопросы повышения надежности автоматического диспетчерского управления системами электроснабжения / Ю.С. Акиншин, М.Ю. Виноградов // Промышленная энергетика. 1987. № 11. С. 49-51.

119. ДООптимизация режимов работы энергосистемы и оценки эффективности системной противоаварийной автоматики / Ф.И. Синьчугов, С.Ф. Макаров // Изв. АН. Энергетика. 1993. № 2. С. 41-49.

120. Повышение качества планирования электропотребления на основе статистического анализа / В.В. Суднова, М.Е. Якимов // Электричество. 1992. № 5. С. 12-16.

121. Использование экономико-математических методов при решении задач управления промышленной энергетикой / А.А. Пиковский // Промышленная энергетика. 1987. № 5. С. 9-11.

122. Техничко-экономические расчеты в энергетике при неопределенности / А.А. Пиковский, В.А. Тататин. // Л.: ЛГУ. 1981. 196 с.

123. Совершенствование технико-экономических расчетов в промышленной энергетике / Г.Л. Багиев // Промышленная энергетика. 1987. № 5. С. 6-10.

124. Алгоритм и программа вычисления показателей надежности электроэнергетических систем методом статистического моделирования (программа «Поток») / В. В. Могирев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетикой. Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1975. Вып. 4. С. 25-36.

125. Вероятностные модели резервирования мощности объединенных энергосистем с ограниченной пропускной способностью межсистемных связей / В.П. Обоскалов // Электричество. 1991. № 1. С. 13-18.

126. Надежность автоматизированных систем / Г.В. Дружинин. // М.: Энергия. 1977. 536 с.

127. Оценка надежности систем электроснабжения / А.П.

Ковалев // Горные машины и автоматика. 1976. № 4. С. 27-28.

128. Логико-математическая модель функционирования электрической системы шахты / М.А. Гольдин // Горный журнал. Известия ВУЗОВ. 1968. № 4. С. 39-45.

129. Надежность при оптимизации систем электроснабжения / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович // Киев: Горная электромеханика и автоматика. 1979. № 35. С. 3-5.

130. Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергии / В. А. Веников, М. С. Липкинд, Б. А. Константинов // Электричество. 1974. № 5. С. 1-4.

131. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко // М.: Энергия. 1977. 125 с.

132. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий / Б.А. Константинов, И.В. Жежеленко, А.М. Липский и др. // Электричество. 1977. № 3. С. 3-7.

133. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Электричество. 1992. № 5. С. 6-12.

134. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ф.А. Зыкин // Электричество. 1992. № 11. С. 13-19.

135. Вопросы оптимальных параметров в электроснабжении промышленных предприятий / Г.Р. Миллер // Опыт проектирования и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Л.: Энергия. 1972. С. 20-26.

136. О влиянии режима напряжения в цеховых электрических сетях на удельные расходы электроэнергии промышленных предприятий / Б.И. Кудрин, В.В. Прокопчик, Г.А. Елисеев // Промышленная энергетика. 1987. № 2. С. 33-35.

137. Электроснабжение угольных шахт / С.А. Волотковский, Ю.Г. Разумный, Г.Г. Пивняк и др. // М.: Недра. 1984. 376 с.

138. Анализ надежности электроснабжения потребителей при вероятностном задании напряжения в узлах сети / В. И. Свешников,

Ю. А. Фокин // Электричество. 1994. № 11. С. 12-16.

139. Результаты внедрения тиристорного компенсатора реактивной мощности в систему электроснабжения металлургического предприятия / В.А. Пономарев, А.Л. Шитов, С.Н. Черевань // Промышленная энергетика. 1987. № 4. С. 51-54.

140. Повышение экономичности электроснабжения угольных шахт при помощи статистических тиристорных компенсаторов / А.В. Жураховский, В.Н. Перхач // Промышленная энергетика. 1987. № 8. С. 34-35.

141. Определение показателя расчетной надежности электроснабжения в узлах электроэнергетического объединения / Ю.Н. Вахлаков, А.Т. Шевченко, А.В. Шунтов // Изв. АН РАН Энергетика. 1994. № 2. С. 57-65.

142. Задачи исследований надежности электроэнергетических систем / В. А. Веников, Ю. Н. Руденков, С. А. Совалов // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1973. № 5. С. 12-14.

143. Некоторые вопросы надежности электроэнергетических систем / В.А. Веников, Е.В. Путятин, В.А. Туфанов, Ю.Л. Фокин // Электричество. 1975. № 5. С. 1-12.

144. Состояние и пути надежности электроснабжения промышленных предприятий / Г.Л. Багиев // Промышленная энергетика. 1991. № 5. С. 22-25.

145. Уплотнение матриц обобщенных параметров сети при оценке недоотпуска электроэнергии / Ю.А. Фокин, Т.П. Харченко // Изв. ВУЗОВ. Энергетика. 1987. № 1. С. 10-14.

146. К вопросу оценки и обеспечения надежности крупных энергообъединений / Л.Л. Богатырев // Электричество. 1990. № 5. С. 1-9.

147. Применение теории подобия при проектировании систем цехового электроснабжения промышленных предприятий / В.Н. Усихин // Электричество. 1992. № 5. С. 42-45.

148. Экспертные системы диагностики электрооборудования / В.Н. Надточий // Электричество. 1991. № 8. С. 9-16.

149. Hartlepp H., Stahl F. KI-Systeme oder Expertensysteme in der

Energiewirtschaft eine Enformig // *Energietechnik* 39 (1989) № 3. P. 415-419.

150. Проблемы промышленной безопасности объектов энергетики / В.П. Васин, В.А. Скопинцев // *Изв. Энергетика*. 1994. № 5. С. 3-18.

151. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов / А.П. Ковалев // *Электричество*. 1991. № 8. С. 50-55.

152. Методы оценки надежности сложных электрических систем / И.И. Карташев, Ю.А. Фокин // *Электричество*. 1991. № 6. С. 1-6.

153. Управление надежностью электроэнергетических объектов / В.И. Пампура // *Электричество*. 1991. № 2. С. 15-21.

154. Оценка удельного ущерба от нарушений электроснабжения промышленных предприятий / Б. В. Папков // *Промышленная энергетика*. 1992. № 3. С. 29-32.

155. Учет надежности энергосистемы при формировании тарифов на электроэнергию / Ф.А. Кушнарев, В.К. Хлебников // *Изв. ВУЗОВ Электромеханика*. 1993. № 6. С. 30-33.

156. Экономические проблемы оценки и повышения надежности энергоснабжения / Г.З. Зайцев, А.А. Пиковский // *Промышленная энергетика*. 1991. № 6. С. 4-5.

157. Оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических сетях 6-20 кВ с учетом вероятностных характеристик / А.А. Глазунов, В.П. Кравченко, И.Н. Пыхтина // *Электричество*. 1992. № 7. С. 20-22.

158. Эффективность ремонтных работ под напряжением на линиях системообразующей сети / А. И. Васильчиков, В. П. Дикий, Н. М. Коротков и др. // *Электричество*. 1992. № 5. С. 57-58.

159. Техничко-экономический анализ работы промышленных предприятий при использовании электроэнергии пониженной частоты / Г.Л. Багиев, А.Н. Шишов, В.Г. Еловенко и др. // *Промышленная энергетика*. 1985. № 6. С. 5-6.

160. Анализ экономических последствий работы энергетического оборудования ТЭС промышленных предприятий при снижении частоты сети / В. Р. Огороков, Т. И. Поликарпов //

Промышленная энергетика. 1985. № 1. С. 24-26.

161. О надежности электроснабжения заводов синтетического каучука / Ю.П. Кулаков, П.И. Петунии, П.С. Селиверов // Промышленная энергетика. 1971. № 1. С. 26-28.

162. Оценка надежности народнохозяйственного ущерба от перерыва электроснабжения бурения нефтяных скважин / Э.М. Эпштейн, А. А. Спирин // Промышленная энергетика. 1971. № 4. С. 15-18.

163. Техничко-экономические расчеты в энергетике / В.И. Денисов. // М.: Энергоатомиздат. 1985. 216 с.

164. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л. М. Зельцбург // М.: Высшая школа. 1973. 273 с.

165. Учет фактора надежности при определении приведенных затрат на электроэнергетический объект / Э. П. Смирнов // Электричество. 1991. № 2. С. 16-22.

166. Systems theory: mathematical foundations / M. Mesorovic, Y. Tarahara // Academic Press. New York - San Francisco – London. 1975. 311 p.

167. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э., Петрова Р.М., Синюкова Т.В. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.

168. Абдуллазянов, Э.Ю., Грачева, Е.И., Горлов, А.Н., Шакурова, З.М. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. Т.23. – №3. С. 3-13.

169. Абдуллазянов, Э.Ю., Грачева, Е.И., Альзаккар, А., Низамиев, М.Ф., Шумихина, О.А., Valtchev, S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

170. Грачева, Е.И., Наумов, О.В., Горлов, А.Н., Шакурова, З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутривзаводского электроснабжения// Проблемы энергетики. – 2021. №1. С. 93-104.

171. Грачева, Е.И., Сафин, А.Р. Оценка потерь электроэнергии в радиальных электрических сетях низкого напряжения с помощью алгоритмов нечеткого регрессионного анализа// Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. Т.12. №4(48). С. 116-125.

172. Задачи надежности современного электроснабжения: монография/ Б.В. Папков, А.Л. Куликов, П.В. Илюшин. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 260 с.

173. Петрова Р. М. и др. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

174. Петрова Р.М, Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. No1 (57). С. 93-105.

175. Petrova, R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. Vestnik of MSTU, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

176. Петров А. Р., Грачева Е. И. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

177. Петров А. Р., Грачева Е. И. Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов // Электрические станции. 2023. № 11, С. 29-36. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/10.34831/EP.2023.1108.11.004>.

178. Петров А. Р., Грачева Е. И., S. Valtchev Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4.

C. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>.

179. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Ibatullin EE, Petrova P.M, Sinyukova TV. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):93-108.

180. Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913.

181. Gracheva, E.I., Naumov, O.V., Gorlov, A.N. Influence of value resistance contact units of switching devices on losses of the electric power in shop networks of low tension// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019. – 2019. P. 012060.

182. Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913.

183. E. Gracheva, R. M. Petrova, S. Valtchev and T. Sinyukova, "Study of Probability Characteristics of the Reliability of Electrical Equipment in Internal Power Supply Systems," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 460-465, doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175821.

184. E. I. Gracheva, R. M. Petrova, T. Sinyukova, S. Valtchev, R. Miceli and M. Caruso, "Reliability and Overload Capacity of Power Transformers," 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 684-689, doi: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247425.

185. Petrova RM, Abdullazyanov EYu, Grachieva EI, Valtchev S, Yousef Ibragim. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):93-105.

186. Petrova R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability

of in-shop power supply. Vestnik of MSTU, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

187. R. M. Petrova and E. Gracheva, "Reliability Parameters of Low-Voltage Switchgear and Cable Lines of Workshop-Floor Network Schemes," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1049-1055, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349643.

188. R. M. Petrova and E. Gracheva, "Comparison Of Methods Of Calculation Of The Electrical System Of In-Plant Power Supply," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1056-1061, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349401.

189. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical load calculation// Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021. 3. – 2021. P. 9388018.

190. Tabachnikova, T.V., Gracheva, E.I., Naumov, O.V., Gorlov, A.N. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Advances in Energy Industry and Power Generation, AdvEnGen 2020". – 2020. P. 012014.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОЦЕНКА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	5
1.1. Функциональная оценка электрических систем промышленного предприятия	5
1.2. Функционирование электрооборудования систем электроснабжения предприятий.....	7
1.3. Оценка параметров надежности электрооборудования.....	21
1.4. Управление избыточностью систем	28
1.5. Выводы по главе	31
1.6. Контрольные вопросы.....	33
2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СВЯЗЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	34
2.1. Функциональный анализ взаимосвязей электрооборудования системы электроснабжения предприятия.....	34
2.2. Безотказность обеспечения энергией приемников технологических машин	42
2.3. Обслуживание оборудования систем электроснабжения предприятий	48
2.4. Повышение отказоустойчивости систем электроснабжения предприятия	54
2.5. Выводы по главе	59
2.6. Контрольные вопросы.....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	62

Шпиганович Александр Николаевич
Шпиганович Алла Александровна
Грачева Елена Ивановна
Петрова Рената Маратовна

ОСНОВЫ АНАЛИЗА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

Издательство «Отечество»
420032 г.Казань, ул. Шоссейная, 22А

Подписано в печать 21.02.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5. Тираж 500. Заказ № 2102/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
