

На правах рукописи

Каратеев Павел Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ
СИСТЕМАХ

Специальность:

05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

Научный руководитель Степанов Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Калинин Вячеслав Федорович, доктор технических наук, профессор, проректор по кадровой и молодежной политике ФГБОУ ВПО "ТГТУ"

Фомин Андрей Васильевич, кандидат технических наук, технический руководитель проектов ЗАО «Нидек АСИ ВЭИ»

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 30.01.2015 в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.12 при Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд.9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета и на сайте <http://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного
совета
Д 212.271.12,
д.т.н., профессор



Елагин Михаил Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Система электроснабжения является подсистемой, как питающей энергосистемы, так и технологической системы. Следовательно, система электроснабжения промышленного предприятия оказывается на стыке этих двух систем, и ее режимы влияют и на первую, и на вторую. В свою очередь, питающая энергосистема и технологическая система предъявляют требования к параметрам режимов системы электроснабжения.

Технологическая система обязывает систему электроснабжения обеспечивать подачу электроэнергии в необходимом количестве и требуемого качества. То есть технология производства, во-первых, задает уровень электропотребления при номинальном напряжении на электроприемниках, а во-вторых, ограничивает допустимые пределы отклонения напряжения от номинального. Кроме того, предприятия заинтересованы в уменьшении платы за электроэнергию, то есть в уменьшении активной нагрузки системы электроснабжения.

С точки зрения питающей энергосистемы одним из основных показателей режимов работы системы электроснабжения, таким образом, является активная мощность, потребляемая в максимум нагрузки. Величина этой мощности определяется активной нагрузкой приемников и потерями мощности на передачу по элементам электросетей и цеховым трансформаторам. Снижение потребления активной мощности актуально как в период максимума, так и в остальные интервалы времени. Система электроснабжения должна также выполнять требования питающей энергосистемы к потреблению реактивной мощности.

Эффективное электропотребление при эксплуатации системы электроснабжения промышленного предприятия является актуальной научной проблемой.

До настоящего времени предлагались следующие способы регулирования потребления активной мощности предприятием: отключение части электропотребителей при возникновении дефицита мощности в энергосистеме, изменение времени начала работы потребителей-регуляторов с целью выравнивания графика нагрузки, уменьшение потерь мощности на передачу в электросетях и трансформаторах система электроснабжения, повышение эффективности использования электроэнергии в приемниках.

Эффективное распределение и потребление электрической энергии в системе электроснабжения может быть достигнуто за счет эффективного потребления и интеллектуального контроля над распределением активной мощности без нарушения установившегося технологического процесса и при соблюдении у каждого приемника электроэнергии допустимых отклонений напряжения.

Система электроснабжения должна рассматриваться как единый комплекс, включающий в себя внутривзаводские и цеховые электрические сети, конденсаторы и приемники электроэнергии. При этом оптимизация режимов в системе электроснабжения осуществляется не только с учетом потерь мощности на передачу по электрической сети, но и с учетом изменения мощности приемников электроэнергии и конденсаторов при отклонении напряжения от номинального. Мощности приемников электроэнергии и конденсаторов при реальных величинах напряжения возможно определять в соответствии с их статическими характеристиками по напряжению.

Поэтому, контроль распределения электрической энергии для повышения качества и эффективности электропотребления является актуальной научной задачей.

Цель работы. Повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах путём обоснования её рациональных режимных параметров и электротехнических устройств распределения электрической энергии, учитывающих закономерности формирования управляющих воздействий.

Для достижения поставленной цели сформулированы и должны быть решены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ конструктивных схем, методов расчёта параметров и надёжности электротехнических устройств и способов управления режимами работы электропитающих систем и условий их эксплуатации.
2. Разработка математической модели формирования топологии и управляющих воздействий в электропитающих системах, учитывающих в комплексе систему распределения электрической энергии и надёжность отдельных её элементов для определения ее рациональных параметров, на основе исследования математической модели системы.
3. Обоснование рациональных режимных параметров и гибкой динамики топологии управления электротехническими устройствами электропитающих систем для повышения качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.
4. Определение условий реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических устройств, обеспечивающих рациональные режимы работы и распределение электроэнергии электропитающих систем.
5. Разработка методики определения рациональных параметров электротехнических устройств распределения электрической энергии электропитающих систем, структуры и топологии управления её режимами работы.
6. Численные и экспериментальные исследования режимов работы электротехнических устройств и электропитающих систем при применении разработанных технических решений по управлению распределением электрической энергии.

Идея работы заключается в достижении требуемого уровня качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах путем обоснования её рациональных режимных параметров и электротехнических устройств распределения электрической энергии, учитывающих закономерности формирования управляющих воздействий.

Объектом исследования являются электротехнические устройства распределения электрической энергии электропитающих систем, учитывающих в комплексе закономерности формирования управляющих воздействий, направленных на повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.

Предметом исследования являются переходные процессы, протекающие в электротехнических устройствах и электропитающих системах, обеспечивающих распределение и эффективное использование электрической энергии.

Методы исследования, используемые в работе, основаны на применении теории автоматического управления, теории надёжности технических систем, теории электрических цепей, теории вероятности и математической статистики, численных методов и экспериментальных исследований с применением ЭВМ.

Автор защищает:

1. Математическую модель формирования топологии и управляющих воздействий в электропитающих системах, учитывающих в комплексе систему распределения электрической энергии и надёжность отдельных её элементов для определения ее рациональных параметров, на основе исследования математической модели системы.
2. Методы формирования закономерностей управляющих воздействий для управления режимами работы электротехнических устройств электропитающих систем, обеспечивающих распределение и эффективное использование электрической энергии.
3. Условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнических устройств, обеспечивающих рациональные режимы работы и распределение электроэнергии электропитающих систем.

Научная новизна заключается в определении рациональных параметров электротехнических устройств, обеспечивающих повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.

Она представлена следующими результатами:

1. Определены зависимости для расчета рациональных параметров электротехнических устройств повышения качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.
2. Установлены методы формирования закономерностей управляющих воздействий для управления режимами работы электротехнических устройств электропитающих систем, обеспечивающих повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.

Определена методика расчета рациональных параметров электротехнических устройств электропитающих систем, обеспечивающих повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.

3. Определены условия реализации конструкционной и функциональной надежности электротехнических устройств, обеспечивающих повышение качества и эффективности электропотребления в электропитающих системах.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечены обоснованными допущениями, адекватностью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождения между которыми не превышают 13,5%.

Практическое значение. Разработана методика расчета рациональных параметров устройств электропитающих систем, учитывающих в комплексе систему распределения электрической энергии и надежность отдельных её элементов.

Реализация результатов работы. Основные научно-практические результаты диссертационной работы использованы ОАО «Конструкторское бюро приборостроения» в Программе повышения энергоэффективности.

Результаты работы использованы в учебных курсах «Электрические аппараты», «Электрические станции и подстанции», «Электроэнергетические системы и сети», «Средства коммутации электрической энергии», «Оптимизация электроэнергетических систем» на кафедре «Электроэнергетика» Тульского государственного университета.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных молодежных научно-технических конференциях.

ТулГУ (г. Тула, 2009 - 2014 гг.) и V, VI научно-практических конференциях ТулГУ «Молодежные инновации» (г. Тула, 2011 г.), Пятой международной Школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (г. Москва, 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2012» в рамках X Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность - 2012» в рамках I Международного электроэнергетического форума «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2013» в рамках XI Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2013 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2014» в рамках XII Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке».

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, из них 5 - в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, подана заявка на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 101 наименований. Диссертация изложена на 94 страницах машинописного текста, включая 1 таблицу, 34 рисунка.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой «Электроэнергетика» Тульского государственного университета, доктору технических наук, профессору Степанову Владимиру Михайловичу за научные консультации, поддержку и помощь при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проводится обобщение и анализ научно-практической литературы по конструктивным схемам распределения электроэнергии в электропитающих системах, условиям их эксплуатации, методам моделирования переходных процессов, расчета параметров и надежности систем распределения электрической энергии.

При анализе рассмотрены схемы распределения электрической энергии низковольтные, 6(10)кВ, распределительные сети и узлы нагрузки по гексагональной схеме и схемы процесса управления мультиагентной системой. В результате анализа установлено в первом случае конструктивные схемы имеют низкую надежность без дополнительных резервных связей, отсутствует автоматизированный контроль над распределением электроэнергии и её качества. Во втором случае при ремонте одной секции распределительного пункта, потребители, питающиеся от двух секций, остаются без резерва, а нерезервированные по сети – отключаются на все время ремонта.

Одним из современных направлений являются технологии интеллектуальных электрических сетей, сформированных по гексагональной схеме, где распределительное устройство универсального узла нагрузки исполнено с интегрированным модулем управления. Использование данных схем в настоящее время, однако, требует значительных затрат на реконструкцию существующей инфраструктуры, которые включают затраты на содержание дополнительных линий. К их недостатка также относятся рост потерь электрической энергии за счет увеличения протяженности распределительной сети и отсутствие средств эффективного использования электрической энергии. Относительная независимость функционирования интегрированных модулей управления на каждом из узлов нагрузки приводит к сложно диагностируемым сбоям в работе системы и каскадному изменению режимов работы узлов распределительной сети, а также большим погрешностям, снижающим эффективность эксплуатации при возникновении параллельных и замкнутых цепи при коротких замыканиях.

Для оценки эффективности использования электрической энергии проведены экспериментальные исследования характеристик режимов работы электрических систем ОАО «Конструкторское бюро приборостроения», ОАО «Трансмаш», ЗАО «Алексинская энергосетевая компания», которые показали их отклонение от нормативных значений коэффициента нелинейных искажений, несимметрии и провалов напряжений, которые снижают качество электрической энергии.

Поэтому необходимо на данном этапе разработать новые технические решения, обеспечивающие эффективное использование электрической энергии в электропитающих системах на основе её перераспределения и требуемого качества при наименьших затратах на производство электрических устройств и адаптации в эксплуатируемых электрических сетях.

Однако в них отсутствует комплексный показатель эффективности использования электрической энергии, который обеспечил бы на основе требуемых уровней надежности технического уровня определение управляющего воздействия на управление режимами

работы электропитающих систем за счет перераспределения электрической энергии и рациональных параметров электротехнических устройств повышения качества электрической энергии.

Во второй главе для определения рациональных параметров средств коммутации для перераспределения электрической энергии и электротехнических устройств, обеспечивающих требуемое её качество, по критерию надежности установлены зависимости для расчета уровня показателей надежности и условий её реализации.

Определена зависимость для расчета коэффициента технического использования, являющегося комплексным показателем эффективности использования электрической энергии, учитывающим коэффициенты эффективности, устанавливающие прямую взаимосвязь между функциональными возможностями электроприемников с помощью амплитудно-временных параметров потоков электрической энергии.

Определение требуемого уровня надёжности основывается на техническом уровне как вводимых в эксплуатацию новых систем, так и усовершенствованием уже используемых. Из целевого назначения технической системы следует, что система уравнений существующего технического уровня рассматривается по отношению к новому техническому уровню системы по зависимостям потенциальной реализуемости, определяя соотношения уровня её разрабатываемости.

При рассмотрении системы распределения и контроля качества электрической энергии, коэффициент технического уровня выражается не только через коэффициент готовности, но и через коэффициенты, учитывающие показатели качества электрической энергии, а также энергоёмкость технологических процессов. В общем виде коэффициент технического уровня представлен, как

$$k_y = \frac{1}{3} \left(\frac{K_{эН}}{K_{эС}} + \frac{k_{ГН}}{k_{ГС}} + \frac{\mathcal{E}_{ТН}}{\mathcal{E}_{ТС}} \right)$$

где $K_{эН}$ – коэффициент качества электрической энергии нового технического уровня; $K_{эС}$ – коэффициент качества электрической энергии существующего технического уровня; $k_{ГС}$ – коэффициент готовности существующего технического уровня; $\mathcal{E}_{ТН}$ – коэффициент энергоэффективности технологических процессов нового технического уровня; $\mathcal{E}_{ТС}$ – коэффициент энергоэффективности технологических процессов существующего технического уровня.

Вероятность отказа выражается как:

$$q_H = \frac{q_C}{k_{yH}}$$

Подставляя значение коэффициента технического уровня получим:

$$q_H = \frac{q_C}{\frac{1}{3} \left(\frac{K_{эН}}{K_{эС}} + \frac{k_{ГН}}{k_{ГС}} + \frac{\mathcal{E}_{ТН}}{\mathcal{E}_{ТС}} \right)}$$

Вероятность безотказной работы вычисляется как:

$$p_H = 1 - q_H$$

Подставляя значение для вероятности отказа:

$$p_H = 1 - \frac{q_C}{\frac{1}{3} \left(\frac{K_{эН}}{K_{эС}} + \frac{k_{ГН}}{k_{ГС}} + \frac{\mathcal{E}_{ТН}}{\mathcal{E}_{ТС}} \right)}$$

Требуемое время безотказной работы:

$$t_H = \frac{q_H}{\lambda_H}$$

где λ_H – допустимая интенсивность отказов, которая может быть выражена как

$$\lambda_H = \lambda_c \left(\frac{C_c}{C_H} \right)^{\frac{1}{k_y}}$$

где C_H – затраты на надежность нового технического уровня; C_c – затраты на надежность существующего уровня.

$$C_H = C_c \left(\frac{q_c}{q_H} \right)^{k_y} = C_c \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_H} \right)^{k_y}$$

Коэффициент готовности, выраженный через вероятность отказа для нового технического уровня

$$k_{ГН} = \frac{q_H}{q_H + \lambda_H t_{дп}}$$

где $t_{дп}$ – допустимое время простоя

$$t_{дп} = q_H T_{вн}$$

где $T_{вн}$ – требуемое среднее время восстановления.

Коэффициент технического использования рассчитан через коэффициент готовности

$$k_{ти.н} = \frac{k_{ГН}}{1 + k_{ГН} \frac{t_{дп}}{t_{бн}}}$$

С учетом выражений выше была получена формула для комплексного показателя эффективности использования электрической энергии, учитывающий коэффициенты эффективности, устанавливающие прямую взаимосвязь между функциональными возможностями электроприемников с помощью амплитудно-временных параметров потоков электрической энергии.

$$k_{ти.н} = \frac{\frac{1}{1 + \bar{\lambda} \bar{T}_B} \left[1 + \frac{1}{(1 + \bar{\lambda} \bar{T}_B)^2} \left[(\sigma_{T_B} \bar{\lambda})^2 + (\sigma_{\lambda} \bar{T}_B)^2 \right] \right]}{1 + \frac{1}{1 + \bar{\lambda} \bar{T}_B} \left[1 + \frac{1}{(1 + \bar{\lambda} \bar{T}_B)^2} \left[(\sigma_{T_B} \bar{\lambda})^2 + (\sigma_{\lambda} \bar{T}_B)^2 \right] \right] \frac{q_H T_{вн}}{t_{бн}}}$$

Коэффициент технического использования является комплексным показателем эффективности использования электрической энергии в электропитающих системах, регулирующий её перераспределение.

Получены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы конструкционных материалов электротехнических устройств коммутации и контроля качества электрической энергии и соответствием их функциональных параметров условиям эксплуатации.

Конструктивные элементы системы распределения электрической энергии работают в условиях циклической переменной нагрузки, разрушение которых происходит при равенстве произведенной внутренней работы

$$A = k_N \Delta A$$

где k_N – число циклов коммутации электротехнических устройств перераспределения электрической энергии; ΔA – внутренняя работа, совершаемая за один цикл коммутации.

Вероятность безотказной работы зависит от величины остаточного запаса энергии A_{O3} , который можно еще израсходовать при периодических нагрузках

$$P(N) = \frac{A_{O3}}{A} = \frac{A - k_N \Delta A}{A}, \quad k_{П} k_N \Delta A \leq A$$

где k_{Π} – коэффициент перегрузки, учитывающий изменение нагрузки

Внутренняя работа ΔA может быть выражена как

$$\Delta A = \pi \frac{F_{\partial}^2}{E}$$

где E – модуль деформации; F_{∂} – действующая на элементы конструкции устройств коммутации нагрузка, которая может быть выражена как

$$F_{\partial} \leq \frac{k_m k_o F_H}{k_{\Pi}}$$

где k_m – коэффициент условий работы, учитывающий изменение нагрузки; k_o – коэффициент однородности конструкционных материалов, учитывающий изменение его механических свойств; F_H – нормативная нагрузка на элементы конструкции устройств коммутации и системы распределения электрической энергии.

$$A = k_N \pi \frac{F_{\partial}^2}{E}, \quad \frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2} F_{\partial}^2 \leq F_H^2, \quad k_{\Pi} = \frac{F_{\partial H}}{m_{F_{\partial}}}$$

где $F_{\partial H}$ – наибольшее значение действующей нагрузки; $m_{F_{\partial}}$ – математическое ожидание случайных величин действующих нагрузок, равное средней величине $F_{\partial cp}$;

$$k_m = 1 - P_{ук}(t)$$

Коэффициент запаса по конструкционному материалу:

$$K_H = \frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2}, \quad k_{N_H} = \frac{1}{\lambda_{HM}}$$

$$A_{H_{нс}} = \frac{\pi F_{\partial_{нс}}^2}{\lambda_{HM} E}, \quad m_{A_H} = \frac{\pi m_{F_{\partial}}}{\lambda_{HM} E}, \quad K_H = \frac{A_{H_{нс}}}{m_{A_H}}$$

Тогда получим

$$k_o = \sqrt{\frac{K_H k_m^2}{k_{\Pi}^3}}$$

Установлено, что случайная величина действующей нагрузки на электротехнические устройства коммутации системы распределения электрической энергии может подчиняться нормальному закону распределения.

Для законов распределения случайных величин нагрузок имеем равенство

$$P_{HM}(F_H > m_{F_{\partial}}) = 1 - q_{HM}$$

На основании чего, в общем случае

$$F_H = K_H \cdot F_{\partial_{нс}}$$

Поскольку $k \cdot N_H$ получается путём периодической нагрузки с частотой f_N , то срок службы t_N может быть выражен из следующего равенства

$$\ln F_{\partial_{H\delta}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{A_{H\delta} E}{\pi} \right) - \frac{1}{2} \ln t_N - \frac{1}{2} \ln t_{HM}$$

$$f_N = \frac{1}{q_{HM}}, \quad q_{HM} = \frac{\pi \cdot F_{\partial_{H\delta}}^2}{A_{H\delta} E} \cdot f_N \cdot t_N$$

получим

$$t_N = \frac{t_{HM}}{q_{HM}}$$

Вышеприведенные зависимости устанавливают условия реализуемости надёжности устройств коммутации и контроля качества электрической энергии, определяемые свойствами и условиями работы их конструкционных материалов.

Условие реализуемости надёжности элементов устройств коммутации и контроля качества электрической энергии, определяемое соответствием их параметров условиям эксплуатации, выражается как

$$P_{Y_T}(t) \leq q_{HM}, \quad \frac{t_{\partial_{II}} T_{OC}}{T_{OH}} \leq q_{HM}$$

Исходя из неравенств, функциональные параметры устройств коммутации и контроля качества электрической энергии определяется на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH} .

$$q_{HM} = \left(\frac{k_y c_c q_c^{ky}}{C_{y_n}} \right)^{\frac{1}{ky+1}},$$

где C – затраты на обеспечение надёжности устройств коммутации и контроля качества электрической энергии; $C_{уд}$ – допустимые затраты (потери - ущерб) от отказа устройств коммутации и контроля качества электрической энергии;

$$C_{уд_n} = C_{\partial_{II}} t_{\partial_{II}},$$

где $C_{\partial_{II}}$ – допустимые затраты в единицу времени от отказа устройств коммутации и контроля качества электрической энергии;

$$C_{\partial_{II}} = \frac{C_{\partial_{IIc}}}{k_y}, \quad C_{уд_n} = \frac{k_y c_c q_c^{ky}}{q_{HM}^{ky+1}}, \quad t_{\partial_{II}} = \frac{C_{уд_n}}{C_{\partial_{II}}}$$

На основе анализа результатов исследования моделирования переходных процессов и их обобщения были определены данные для расчета показателей надёжности.

С учетом закона распределения случайных величин нагрузок и общеизвестных формул теории вероятности и математической статистики установлен диапазон измерений k_{II} и k_{II} .

На основе анализа результатов исследования моделирования переходных процессов и их обобщения определены данные для расчета показателей надёжности.

Из законов распределения случайных величин и общеизвестных формул теории вероятности и математической статистики установлен диапазон измерений k_{II} и k_{II} , рассчитывались величины $F_{Днб}$ и $A_{Ннб}$.

На основании норм трудоемкости и стоимостных показателей по зависимостям соответственно определялись значения λ_{HM} и $t_{дп}$, в данном случае $T_{Внм} = t_{дп}$, устанавливались значения $T_{снм}$, $k_{Гнм}$ и $k_{Тнм}$, $P_y(t)$ с учетом t^{pi} .

С учетом условия

$$T_{он} \leq T_{ом}.$$

где $T_{ом}$ – максимальное время до проведения ремонтных работ; определялось значение $t_{мп}$.

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Величина k_0 и K_H определяют запас по прочности и твердости конструкционного материала, которые ограничивают интенсивность износа.

Таблица 1

Показатель надежности	$q_{нм}$	$P_{нм}$	$\lambda_{нм}, 1/ч$	$t_{нм}, ч$	$T_{онм}, ч$	$t_{дп}, ч$	$K_{Гнм}$
коммутационные элементы	0,0053	0,9936	0,0030	16,61	500,34	1,42	0,9918
электротехнические элементы	0,0059	0,9967	0,0026	17,36	621,34	1,76	0,9991

Показатель надежности	$k_{ТИнм}$	$P_y(t)$	$k_{П}$	K_H	k_m	k_0	$t_{мп}$	$k_{ММ}$
коммутационные элементы	0,96	0,01	1,45	1,53	0,995	0,64	275,664	11
электротехнические элементы	0,972	0,005	1,81	1,99	0,995	0,656	253,4	12

Определена зависимость показателей надежности $q_{нм}$, $t_{дп}$, $T_{онм}$. Получена качественная картина требуемых их изменений с учетом зависимости плотности вероятности длительности совпадений характеристик негативных факторов, снижающих эффективность использования электрической энергии в электропитающих системах рис. 1.

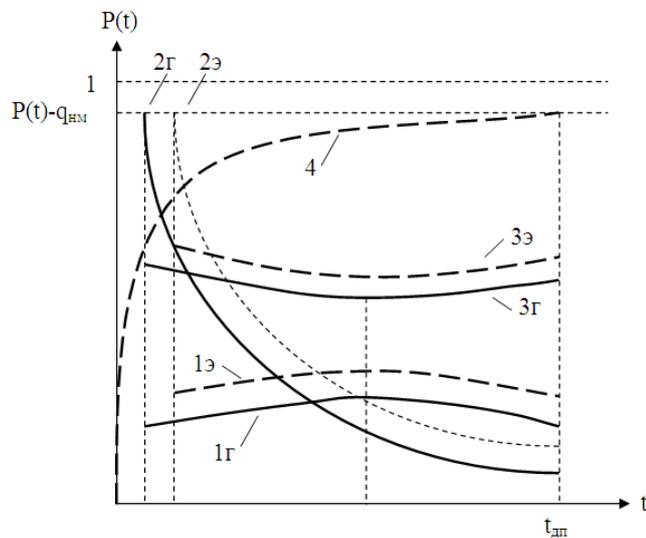


Рис. 1. 1 – $q_{нм} = f(ky)$; 2 – $t_{дп} = f(ky)$; 3 – $T_{онм} = f(q_{нм})$;
4 – совпадение большого числа негативных факторов

Точки пересечения графиков на рисунке 1 определяют требуемые значения показателей надежности.

В третьей главе разработано новое техническое решение для повышения эффективности использования и контроля качества электрической энергии, рассмотрено математическое описание взаимодействия элементов электроприемников электропитающих систем, определены рациональные конструктивные и режимные параметры системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях.

Новое техническое решение обеспечивает функциональную связь электротехнических устройств, контролирующих эффективное использование, распределение и снижение потерь электроэнергии в электропитающих системах, за счет формирования управляющих воздействий для ограничения провалов напряжений, реактивной составляющей мощности, контроля и управления эффективностью использования и распределения электрической энергии. Подана заявка на патент.

Информацию с блока базы данных – 1 счетчиков, т.е. внешней базы данных передают на блок архива данных учета – 2. С блока архива данных учета – 2, который содержит результаты учета параметров электропотребления с интервалом осреднения 30 мин., это расчетная нагрузка по группам точек поставки электроэнергии в формате промышленной ЭВМ, информацию передают на блок системы учета – 3, где формируют исходные данные для расчета параметров режима, технических потерь. Затем информация поступает на первый блок контроля качества электрической энергии – 4, на котором показатели качества электрической энергии сопоставляются с заданными значениями качества электрической энергии. Управляющее воздействие с первого блока контроля качества – 4, затем передается на первый блок электротехнических устройств управления качеством электрической энергии – 5, регулирующих показатели качества электрической энергии от электропитающей сети – 6. Информация о результатах коррекции показателей качества электрической энергии затем передается с первого выход блока электропитающей сети – 6 при помощи обратной связи на вход блока базы данных счетчиков – 1. С блока объекта потребления электрической энергии – 7, питающегося от электропитающей сети – 6, информация о влиянии нагрузки на показатели качества электрической энергии передается на второй блок контроля качества электрической энергии – 8, на котором показатели качества электрической энергии сопоставляются с заданными значениями качества электрической энергии. Управляющее воздействие со второго блока контроля качества – 8, затем передается на второй блок электротехнических устройств управления качеством электрической энергии – 9, регулирующих показатели качества электрической энергии с целью коррекции влияния нагрузки на показатели качества электрической энергии.

На рис. 2А изображена функциональная схема системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях.

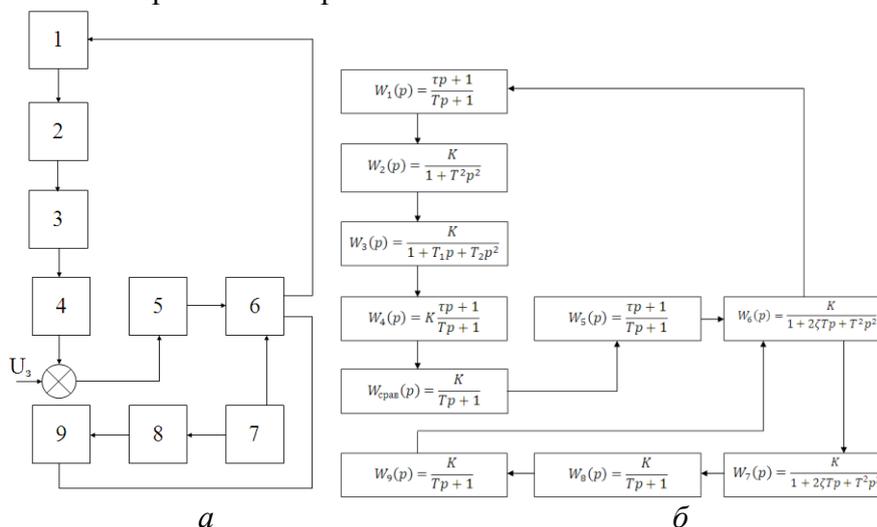


Рис. 2. А - функциональная схема системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях, Б - структурная схема для системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях

Предлагаемое техническое решение позволяет обеспечивать функциональную связь электротехнических устройств, контролирующих эффективное использование, распределение и снижение потерь электроэнергии в электропитающих системах, тем самым

снизив потери электрической энергии за счет уменьшения провалов напряжения, реактивной составляющей мощности, эффективно использовать и распределять электроэнергию в рамках электропитающей системы (блоки 1-6) и системы электроснабжения предприятия (7-9). Кроме этого, данное техническое решение обеспечивает высокий уровень масштабируемости для использования на промышленных предприятиях любого размера.

На основе функциональной схемы системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях и анализа систем управления составлена структурная схема (рис. 2 Б).

Составлена общая передаточная функция структурной схемы функциональных связей электротехнической системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях

$$W = \frac{(\tau_1 p + 1)(\tau_4 p + 1)(\tau_5 p + 1)K_2 K_3 K_4 K_{cp} K_6}{(T_1 p + 1)(1 + T_2^2 p^2)(1 + T_{13} p + T_{23} p^2)(T_4 p + 1)(T_{cp} p + 1)(T_5 p + 1)(1 + 2\zeta_6 T_6 p + T_6^2 p^2)} + \frac{K_7 K_9 K_9}{(T_8 p + 1)(T_9 p + 1)(1 + 2\zeta_7 T_7 p + T_7^2 p^2)}$$

Система контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях является замкнутой автоматической системой, динамические качества и устойчивость должны быть определены исходя из условий её эксплуатации, учитывающих схемы электроснабжения промышленных приемников от двух и более независимых источников с использованием средств автоматики (АПВ, АВР) и имеют двустороннее действие на секционном шиносоединительном выключателе в распределительных устройствах 6, 10, 35кВ с минимальным временем работы 0,4 – 0,5с. С целью упрощения нелинейно системы учитываются только области малых отклонений – линеаризация.

Решение методом Рунге-Кутты – конечно-разностная аппроксимирующая производных, используется для определения рациональных параметров новых технических решений для повышения эффективности использования электрической энергии, устанавливая порядком их точности, которая прямо пропорционально числу ее элементов. Формула Рунге получена из метода Рунге-Ромберга

$$F(x) \approx f(x, h) + \frac{f(x, h) - f(x, kh)}{k^{p-q_n-1}} + \Delta^m O(x)^{p+k_y+1}$$

позволяющая по результатам двух расчетов значений производной $f(x, h)$ и $f(x, kh)$ (шаг h и kh) с порядком точности p рассчитать рациональные параметры системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях, где $f(x, h)$ – конечно-разностная аппроксимация уравнений движения – производной с шагом h ; k – коэффициент, и, с порядком точности их значения с точностью $p+1$.

$\Delta^m O(x)^{p+1}$ – разности нуля, являющиеся конечными разностями при $x^k, x=0, m \leq h$.

Поскольку расчет рациональных параметров системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях функционально связан с ее коэффициентом технического уровня k_y и требуемым уровнем надежности q_n , то порядок точности p позволит определить их уточненное значение с точностью порядка

$$k = p + k_y + 1$$

Причем для k^{p+1} должен учитываться требуемый уровень надежности k^{p-q_n-1} .

Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения элементов системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях в "Matlab", наиболее распространенном и удобном языке для технических вычислений, который реализован методом Дорманда-Принса.

Определив общую передаточную функцию структурной схемы функциональных связей электротехнической системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях составлено её характеристическое уравнение и подставляя в него $p = j\Omega$ получаем характеристическое уравнение в частотной области в виде

$$X A_s, \Omega + Y A_s, \Omega j = 0$$

Решаем совместно систему

$$\begin{cases} X A_s, \Omega = 0; \\ Y A_s, \Omega = 0; \end{cases}$$

рассчитываем график областей устойчивости системы, который представлен на рис. 3 в виде границы устойчивости как функции двух параметров: амплитуды автоколебаний A_s и коэффициента добротности K_D .

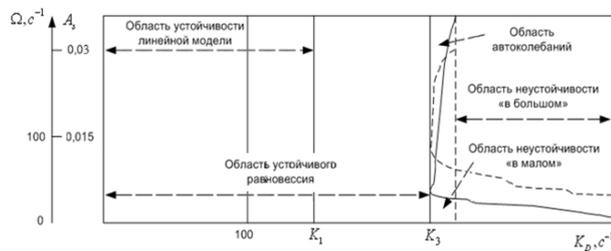


Рис. 3. Области устойчивости структурной схемы функциональных связей электротехнических устройств контроля качества и эффективности электропотребления

Для данных условий определены рациональные параметры электротехнических устройств контроля качества и эффективности использования электрической энергии и условий их устойчивости рис. 4.

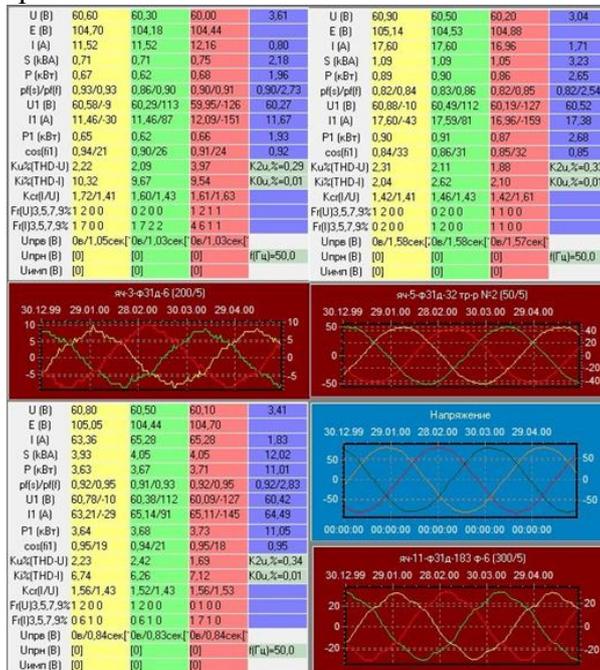


Рис. 4. Показатели качества электрической энергии, форма токов и напряжений при работе системы контроля и управления качеством электрической энергии (ЗАО «Алексинская электросетевая компания»)

Из рис. 4 установлено, что эффективность, достигнутая за счет рациональных, конструктивных и режимных параметров новых технических решений составила 30% что соответствует требуемому уровню надежности.

В четвертой главе проведено планирование эксперимента, выбор методики и аппаратуры исследования.

Для проведения экспериментальных исследований за базовый вариант использована аппаратура АСКУ ЭР APLM, которая была использована на трансформаторной подстанции №113 ЗАО «Алексинская электросетевая компания».

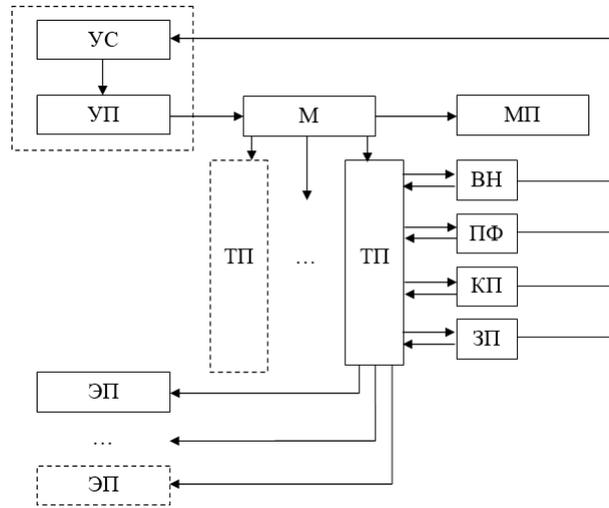


Рис. 5. Блок схема АСКУ ЭР APLM

В качестве устройств, обеспечивающих эффективное использование электрической энергии применены технические решения: устройство управления перераспределением электрической энергии, устройство восстановления напряжения, устройство защиты от перекоса фаз, устройство компенсации перенапряжений, устройство защиты от перенапряжений. Параметры устройств и моделей выбирались в соответствии с условиями эксплуатации и конкретными токоприемниками ТП-113. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 6, 7, 8, 9.



Рис. 6. Показатели качества электроэнергии, формы токов и напряжений ТП-113 (Алексин); красный фон – кривые токов; голубой фон – кривые напряжений

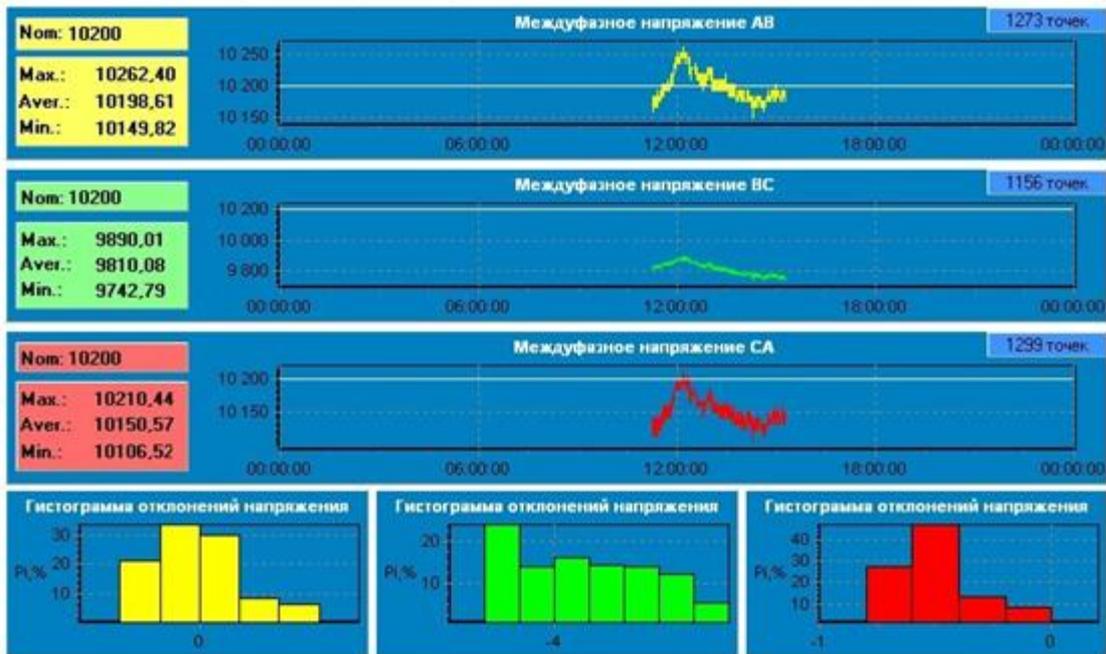


Рис. 7. Графики параметров качества напряжения ТП-113 (Алексин);

	Нормативное значение (уставка) $\delta U_y, \%$	Результаты измерений $\delta U_y, \%$								Соответствие норме
		$\delta U_y, \%$	$T_1, \%$		$T_2, \%$		$T_{1(\Sigma)}, \%$	$T_{2(\Sigma)}, \%$		
			$T_{1(+)}$	$T_{1(-)}$	$T_{2(+)}$	$T_{2(-)}$				
Напр АВ	Норм. верхн.	5	95 %	0,45	0,00				0,00	ДА
	Норм. доп. нижн.	-5	95 %	-0,36		0,00				
	Пред. наиб.	10	наиб.	0,61			0,00			
	Пред. доп. наим.	-10	наим.	-0,49				0,00		
Напр ВС	Норм. верхн.	5	95 %	-3,12	0,00				0,00	ДА
	Норм. доп. нижн.	-5	95 %	-4,42		0,00				
	Пред. наиб.	10	наиб.	-3,04			0,00			
	Пред. доп. наим.	-10	наим.	-4,48				0,00		
Напр СА	Норм. верхн.	5	95 %	-0,07	0,00				0,00	ДА
	Норм. доп. нижн.	-5	95 %	-0,79		0,00				
	Пред. наиб.	10	наиб.	0,10			0,00			
	Пред. доп. наим.	-10	наим.	-0,92				0,00		
Скидка (надбавка), %		0%	Усреднение $T_{1(\Sigma)}$ и $T_{2(\Sigma)}, \%$		0,00	0,00				

Рис. 8. Установившиеся отклонения напряжения ТП-113 (Алексин)

Фаза А	Фаза В	Фаза С
0	0	0

Нормативное значение $K_U, \%$	Результаты измерений $K_U, \%$									Соответствие норме
	Напряжение АВ			Напряжение ВС			Напряжение СА			
	$K_U, \%$	$T_1, \%$	$T_2, \%$	$K_U, \%$	$T_1, \%$	$T_2, \%$	$K_U, \%$	$T_1, \%$	$T_2, \%$	
Норм. 5	95 %	2,39	0,00	95 %	4,03	0,00	95 %	2,43	0,00	ДА
Пред. 8	наиб.	2,51	0,00	наиб.	4,19	0,00	наиб.	2,56	0,00	
Скидка (надбавка) к тарифу, %		0%	Усреднение T_1 и $T_2, \%$		0,00	0,00				

Рис. 9. Количество провалов и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения ТП-113 (Алексин)

Из рис. 6, 7, 8, 9, видно, что расхождение значений теоретических и экспериментальных исследований не превышают 13,5%, что допустимо в инженерных расчетах. Достигнутый эффект повышения эффективности потребления электрической

энергии составляет 25-30%, что подтверждает эффективность применения системы контроля и управления качеством электрической энергии в электрических сетях.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность теоретических и экспериментальных исследований, и, разработанных технических решений по повышению эффективности потребления электрической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональной структуры и параметров электротехнической системы контроля и управления эффективностью использования электрической энергии в электрических сетях.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Определены зависимости для расчета уровня показателей надежности электротехнических устройств контроля и коммутации для управления эффективностью использования электрической энергии в электропитающих системах на основе функциональной связи с коэффициентом их технического уровня, учитывающего качество электрической энергии, коэффициент готовности и энергоэффективность электроприемников технологического процесса.
2. Установлена зависимость для расчета коэффициента технического использования, являющегося комплексным показателем эффективности использования электрической энергии, учитывающим коэффициенты эффективности, устанавливающие прямую взаимосвязь между функциональными возможностями электроприемников с помощью амплитудно-временных параметров потоков электрической энергии.
3. Моделированием переходных процессов в электротехнических устройствах перераспределения и рационального использования электрической энергии установлены закономерности формирования топологии и управляющих воздействий в электропитающих системах для управления их режимами работы.
4. Установлены условия реализуемости результатов моделирования переходных процессов в электротехнических устройствах перераспределения и рационального использования электрической энергии в электропитающих системах и надежности, определяемые свойствами и условиями работы конструкционных материалов, взаимодействием электроприемников и совместного функционирования любого числа электропотребителей в реальных условиях эксплуатации для расчета их рациональных параметров.
5. Определены параметры электротехнической системы контроля и управления эффективностью использования электрической энергии в электрических сетях, обеспечивающие её требуемую работоспособность на основе исследований устойчивости её работы в конкретных условиях эксплуатации.
6. Проведены численные и экспериментальные исследования электротехнических устройств контроля и управления эффективностью использования электрической энергии в электропитающих системах, которые показали, что расхождение между результатами теоретических и экспериментальных исследований составило 13,5%, что допустимо при инженерных расчетах, а эффективность их работы повысилась на 25-30%.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Каратеев П. Ю. Оценка эффективности использования и распределения электрической энергии в системе электроснабжения промышленного предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: Издательство ТулГУ, 2013. — Т. 12-2. — С. 103-106.
2. Степанов В. М., Косырихин С. В., Каратеев П. Ю., Базыль И. М. Контроль и управление качеством электрической энергии систем электроснабжения предприятий //

- Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: Издательство ТулГУ, 2013. — Т. 12-2. — С. 106-110.
3. Степанов В. М., Каратеев П. Ю. Определение работоспособности электротехнических устройств, обеспечивающих эффективное использование и распределения электроэнергии в электропитающих системах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: Издательство ТулГУ, 2013. — Т. 12-2. — С. 99-102
 4. Каратеев П. Ю. Функциональная надежность топологии систем электроснабжения и электрических подстанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: Издательство ТулГУ, 2012. — Т. 12-3. — С. 113-116.
 5. Каратеев П. Ю. Повышение эффективности использования электроэнергии предприятиями для повышения надежности электропотребителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: Издательство ТулГУ, 2012. — Т. 12-3. — С. 62-64.