

На правах рукописи



Новгородов Никита Александрович

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Научный руководитель: **Гринкруг Мирон Соломонович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» ФГБОУ ВО «КНАГУ»

Официальные оппоненты: **Силин Николай Витальевич**, доктор технических наук, доцент, профессор департамента «Энергетические системы» Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточного федерального университета»

Григорьев Николай Потапович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «Дальневосточного государственного университета путей сообщения»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д.27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», аудитория 201/3, e-mail: epapu@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного университета и на официальном сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/161 Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д.27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: epapu@knastu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 999.086.03, к.т.н., доцент



А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена высокой стоимостью электроэнергии и топлива, необходимого для ее производства, а также на оборудование системы электроснабжения: понижающих трансформаторов трансформаторных подстанций, кабелей воздушных и кабельных линий электропередач, дизель-генераторов дизельных электростанций.

В городских и сельских системах электроснабжения низкого напряжения сейчас используются способы и устройства управления, разработанные еще в советский период. Они основаны на применении устаревших устройств релейной техники, нередко управление производится в ручном режиме. Применение устаревших способов управления ведет к снижению энергоэффективности электроустановок, не говоря уже о низком экономическом эффекте от их использования.

Вопросам теории и практики проектирования систем управления элементами систем электроснабжения посвящены работы А.Ф. Дьякова, В.И. Идельчика, В.Л. Козиса, Н.И. Овчаренко, М.А. Берковича, В.Л. Гладышева, В.Л. Семенова.

Существующие способы управления никак не учитывают режимы работы элементов системы электроснабжения, их индивидуальные характеристики, состояние рабочей среды и т.п., что также ведет к снижению энергоэффективности элементов сети электроснабжения.

Работа посвящена разработке новых способов управления элементами системы электроснабжения, которые за счет подстройки под режимы работы элементов, способны повысить их энергоэффективность.

Основными негативными факторами являются несоответствие рабочих режимов элементов системы электроснабжения оптимальным режимам и переходные процессы, возникающие при коммутациях нагрузок к элементам системы электроснабжения. Недостатком существующей практики проектирования систем управления является также отсутствие четкого критерия осуществления коммутации нагрузок, учитывающего их характеристики.

Следствием указанных недостатков является постепенное ухудшение изоляции кабелей и частей элементов системы электроснабжения, а также снижение их энергоэффективности и срока службы.

Объектом исследования являются способы и алгоритмы работы систем управления для повышения энергоэффективности элементов системы электроснабжения.

Предметом исследования являются системы управления элементами системы электроснабжения, обеспечивающие снижение потерь электроэнергии, а также параметры переходных процессов в элементах системы электроснабжения при коммутации нагрузки.

Целью работы является снижение потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения за счет создания систем управления, учитывающих изменения параметров нагрузки и их влияние на

переходные процессы в ходе коммутации нагрузок элементов системы электроснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать энергетические характеристики основных элементов системы электроснабжения, нагрузок и потерь в элементах электрических сетей и существующих способов управления элементами электрических сетей.

2. Разработать принципы и алгоритмы работы системы управления элементами электрических сетей, учитывающие характеристики нагрузки.

3. Разработать технические решения для управления элементами системы электроснабжения.

4. Разработать модель и программное обеспечение для исследования переходных процессов при коммутации элементов электрических сетей и влияния изменений параметров нагрузки на процессы коммутации.

5. Сформировать критерии для осуществления эффективной коммутации элементов электрических сетей.

Методы исследования основаны на математическом моделировании процессов коммутации, программировании, теории автоматического управления и электротехники. В ходе исследования использовались современные пакеты программ MatLab, MathCAD, Visual Basic for Application.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны способы управления работой элементов системы электроснабжения и их коммутацией, позволяющие снизить потери в элементах сети электроснабжения.

2. Разработаны алгоритмы для управления элементами электрических сетей, учитывающие их состояние и состояние нагрузки в режиме реального времени.

3. Получены новые результаты исследований, отображающие влияние изменений параметров нагрузки на процессы коммутации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способы, позволяющие снизить потери электроэнергии в понижающих трансформаторных подстанциях и линиях электропередач.

2. Способы управления работой дизель-генераторов для уменьшения расхода топлива на дизельных электростанциях.

3. Алгоритмы и схемы управления работой систем управления для снижения потерь от несимметрии токов нагрузок элементов сети электроснабжения.

4. Алгоритмы переключения элементов электрических сетей, позволяющие снизить потери электрической энергии от неравномерности нагрузок понижающих трансформаторов и ЛЭП, расход топлива дизельных электростанций.

5. Результаты исследования, показывающие влияние изменений параметров нагрузки на характеристики переходных процессов при коммутации нагрузки к элементам системы электроснабжения.

Практическая значимость заключается в:

1. Разработанных программном обеспечении и моделях, позволяющих определять моменты коммутации нагрузок с целью снижения потерь энергии в элементах системы электроснабжения.
2. Разработанных алгоритмах управления коммутацией нагрузок к элементам сети электроснабжения, позволяющих снизить потери электроэнергии в них и повысить энергоэффективность их работы.
3. Разработанных технических решениях, реализующих алгоритмы управления коммутацией нагрузок к элементам системы электроснабжения.

Основные результаты работы были получены автором в ходе исследований, проведенных в рамках научно-исследовательских работ «Автономные системы децентрализованного энергообеспечения (кластерные энергосберегающие системы выработки, транспорта и преобразования тепловой и электрической энергии)», «Разработка интеллектуальных систем снижения несимметрии токов в элементах распределительных сетей низкого напряжения». Результаты научно-исследовательской работы внедрены в ООО «ЖилТЭК» п.Снежный Комсомольского района Хабаровского края и подтверждены актом внедрения.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и получили одобрение на:

- 39-й научно-технической конференции аспирантов и студентов, г.Комсомольск-на-Амуре, 2009 г.;
- Международной научно-практической конференции, г. Пенза, 2010 г.;
- Шестой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 2011 г.;
- Международной научно-практической конференции, г. Курск, 2011 г.;
- Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2016 г.

Публикации.

По теме диссертационного исследования опубликовано 15 работ, из них 5 статей в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 6 статей и тезисов в прочих изданиях. На созданные в процессе исследования программные продукты получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, были получены 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации.

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список используемой литературы и два приложения, в которых представлены

разработанные алгоритмы систем управления и акт о внедрении результатов диссертационной работы. Общий объем диссертации составляет 161 страницу машинописного текста, в том числе 144 страницы основного текста, 51 рисунок и 18 таблиц, 2 приложения на 17 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость исследования, освещены методы проведения исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены:

- 1) основные характеристики трансформаторов и трансформаторных подстанций, дизель-генераторов, кабельных и воздушных линий электропередач;
- 2) нагрузки элементов электрических сетей;
- 3) потери в элементах системы электроснабжения и факторы, влияющие на потери.

Нагрузки элементов электrorаспределительных сетей меняются в широком диапазоне. Для трансформаторов диапазон изменения нагрузки составляет $(0,038 \div 1)$, для кабельных линий – $(0,1 \div 0,6)$, для дизель-генераторов автономных энергосистем – $(0,21 \div 1)$ от максимальной нагрузки. Изменения нагрузки имеют суточные и сезонные циклические закономерности. Кроме закономерных изменений нагрузки возникают и ее флуктуации, обусловленные подключением и отключением потребителей.

Изменение нагрузок служит фактором, существенно повышающим потери в элементах электроэнергетических систем. Увеличение среднегодовых потерь энергии в трансформаторах вследствие меняющихся нагрузок составляет диапазон $(1,05725 \dots 1,09599)$ раз по сравнению с минимально возможными, в кабельных линиях – 0,15% от передаваемой энергии; увеличение среднегодовых потерь топлива на выработку электроэнергии в дизель-генераторах составляет до 16,5 % по сравнению с минимально возможными. Методы управления элементами системы электроснабжения, используемые в настоящее время, не позволяют существенно снизить потери энергии вследствие непрогнозируемых и систематических колебаний нагрузок в элементах электросетей.

Другим фактором, оказывающим влияние на потери, является несимметрия нагрузок элементов электросетей. Ее уровень также носит непрогнозируемый характер, а коэффициент несимметрии токов нагрузки может варьироваться в широких пределах: для понижающих трансформаторов городских и автономных электросетей – $(0 \div 2)$, для кабельных линий городских электросетей – $(0 \div 1)$, для дизель-генераторов автономных электрических сетей сел и поселков – $(0,03 \div 1,47)$. Существующие методы и способы снижения несимметрии токов и напряжений в электросетях не учитывают колебаний нагрузок в режиме

реального времени, их внедрение во многом экономически и технически неэффективно.

Целесообразным является создание систем управления элементами системы электроснабжения, которые позволят снизить потери от колебаний и несимметрии нагрузок элементов электрических сетей, подстраивая их характеристики под реальные режимы работы элементов с учетом данных, полученных за счет постоянного мониторинга их нагрузок и условий окружающей среды.

Во второй главе рассмотрены существующие способы управления элементами электрических сетей, их достоинства и недостатки, а также средства автоматизации и управления работой указанных элементов, их влияние на энергоэффективность работы элементов электрических сетей.

Анализ существующих способов управления работой понижающих трансформаторов подстанций показал, что при расчете и выборе времени переключения выключателей требуется учитывать внешние факторы, влияющие на их работу.

Известные способы управления несимметрией в сети неэффективны для снижения непрогнозируемой несимметрии нагрузки, когда нет возможности спрогнозировать величину тока нагрузки в конкретный момент времени. В способах управления несимметрией в сети также не учитывается время запаздывания работы элементов, осуществляющих прием, передачу и обработку информационных сигналов, от которых зависит срабатывание элементов, коммутирующих нагрузку.

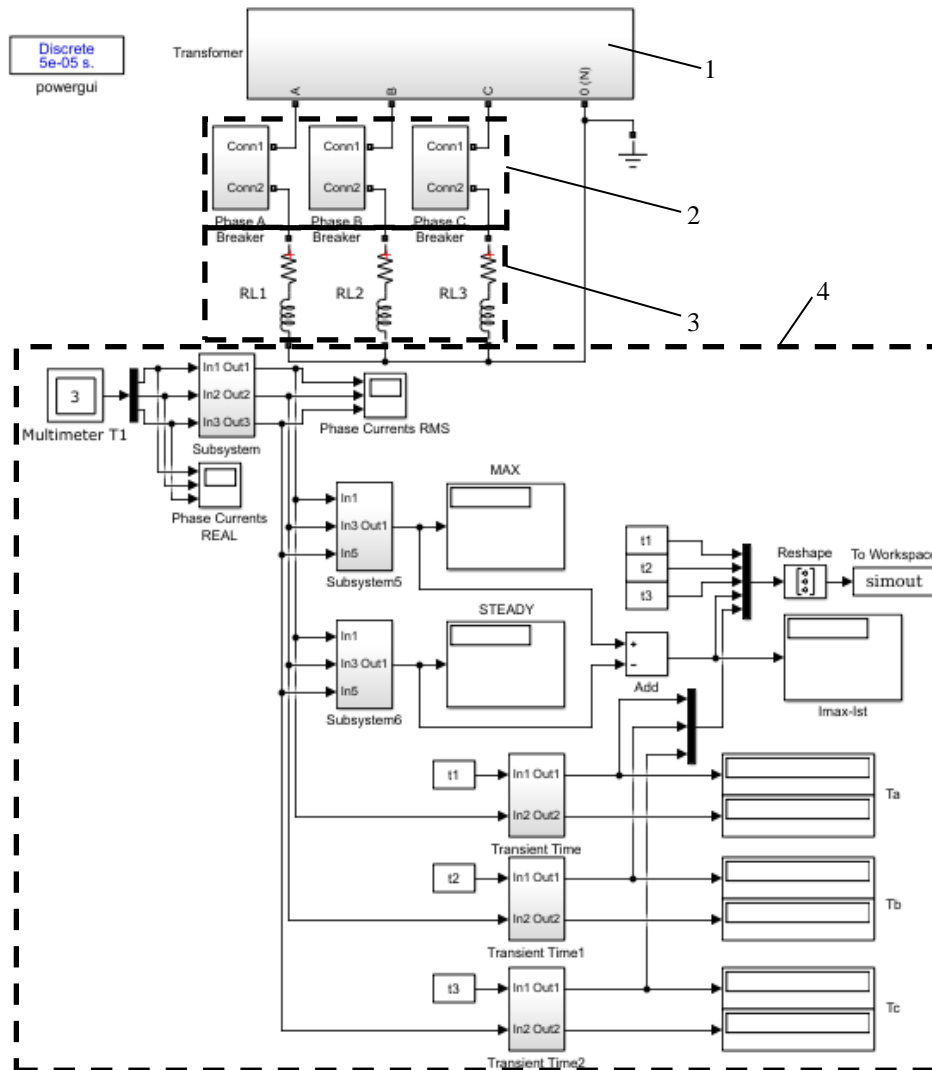
Выявлено, что:

- целесообразно разрабатывать системы управления, прогнозирующие изменения величины тока нагрузки и учитывающие изменения параметров коммутирующих элементов системы вследствие внешних воздействий окружающей среды;
- необходимо осуществлять переключения нагрузок с обеспечением минимального увеличения тока в ходе переходного процесса в момент, когда ток на вторичной стороне понижающего трансформатора и отходящих кабелях нагрузок равен нулю;
- необходимо проектировать системы управления, учитывающие уникальные рабочие характеристики элементов автоматики и телемеханики.

В третьей главе произведено исследование переходных процессов, протекающих при коммутации нагрузок к понижающему трансформатору системы электроснабжения, приведена оценка целесообразности использования устройств переключения нагрузок с целью их симметрирования.

В качестве исследуемой модели была предложена схема, созданная автором в приложении Simulink пакета программ Matlab. Схема содержит: блок сети и понижающего трансформатора со схемой соединения обмоток Y-Y0, блоки активно-индуктивных нагрузок, блоки выключателей и блоки

измерительной аппаратуры. Схема исследуемой модели приведена на рисунке 1.



1 – сеть - трехфазный трансформатор; 2 – коммутаторы нагрузки;
3 – нагрузки фаз отходящей линии; 4 – приборы контроля параметров
Рисунок 1 – Схема модели исследования в Simulink Matlab

Входные параметры модели меняются в ходе исследования в следующих диапазонах: полная мощность трансформатора S_H – 160, 250, 400, 630 кВА; коэффициент загрузки трансформатора β – 0,1...1 с шагом 0,1; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi$ – 0,5...0,9 с шагом 0,05; коэффициент несимметрии токов нагрузки ε_I – 0...2 с шагом 0,05 в зависимости от варианта несимметрии; время коммутации нагрузки t_k – 0,1...0,11 с шагом 0,001 с.

Выходными величинами модели являются: время переходного процесса τ – время от момента непосредственного замыкания контактов каждого выключателя до момента времени, при котором значение тока в фазе равно установившемуся значению, и величина суммарного увеличения тока по фазам трансформатора ΔI_Σ . Установившееся значение тока определяется согласно неравенству:

$$\frac{I_i - I_{i-1}}{I_{i-1}} \leq 0,01,$$

где I_i – текущее значение мгновенного тока в фазе, А;

I_{i-1} – предыдущее значение мгновенного тока в фазе за время одной итерации программы, А.

Одним из основных показателей в ходе исследования является величина увеличения тока переходного процесса ΔI – разница максимального и установившегося значений тока. Далее определяется величина ΔI_Σ как сумма значений ΔI по трем фазам трансформатора. Исследования на модели показали, что разброс в моментах времени включения выключателя на 4 мс может вызвать снижение величины ΔI в 15 и более раз. Увеличение токов при переходных процессах повышает динамические усилия в основных элементах трансформатора и вызывает снижение их срока службы, а также требует сложной настройки релейной защиты трансформатора.

В ходе исследования был произведен анализ влияния моментов включения полюсов выключателя (t_A, t_B, t_C) на суммарное увеличение токов переходных процессов (рисунок 2). В каждом случае рассматривалась 121 комбинация значений моментов включения t_A, t_B, t_C .

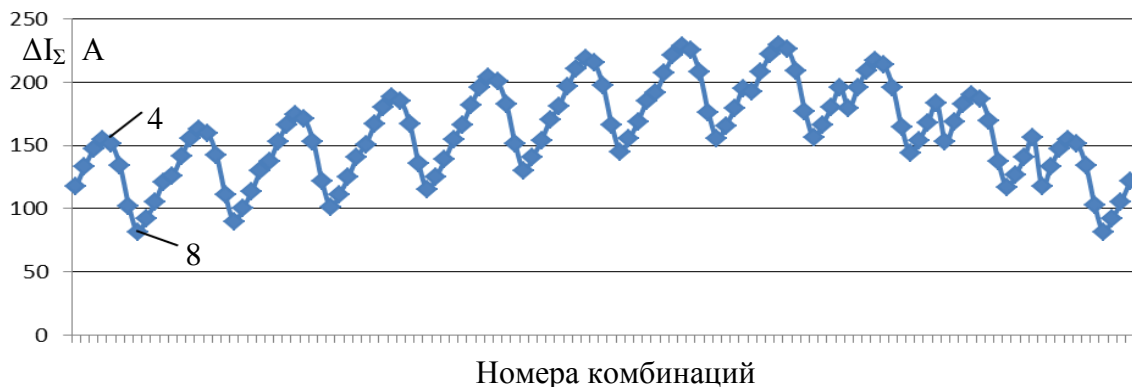


Рисунок 2 – Диаграмма изменения значения ΔI_Σ в зависимости от комбинаций моментов подключения нагрузок к фазам трансформатора мощностью 400 кВА ($t_A = 0,1$ с; $t_B = (0,1 \dots 0,11)$ с; $t_C = (0,1 \dots 0,11)$ с; $\cos\varphi = 0,5$; $\beta = 1$) (цифрами указаны номера комбинаций)

Величина суммарного увеличения токов в момент подключения нагрузки сильно зависит от величины задержки срабатывания выключателей по фазам трансформатора.

Влияние несимметрии нагрузки на увеличение токов при включении трансформатора оценивалось автором по трем вариантам несимметричного нагружения трансформатора: 1) ток нагрузки в фазе А имеет максимальное значение, а в фазах В и С – одинаковое минимальное значение ($\varepsilon_I = (0,1 \dots 2)$); 2) ток нагрузки в фазе А имеет минимальное значение, а в фазах В и С – одинаковое максимальное значение ($\varepsilon_I = (0,1 \dots 0,5)$); 3) ток нагрузки в фазе А имеет максимальное значение, в

фазе В – среднее, а в фазе С – минимальное значение соответственно ($\varepsilon_I = (0,1 \dots 1)$), где ε_I – коэффициент несимметрии токов нагрузки.

При росте уровня несимметрии токов нагрузки величина суммарного увеличения токов переходных процессов возрастает практически линейно. В качестве примера можно рассмотреть случай несимметричного нагружения понижающего трансформатора при следующих параметрах: 400 кВА; $\cos\varphi = 0,82$; $\beta = 1$ (рисунок 3).

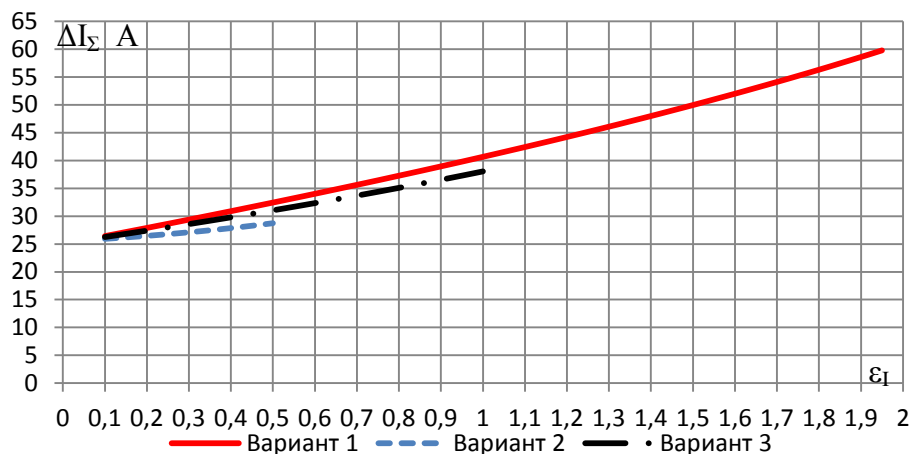


Рисунок 3 – Зависимость суммарного увеличения токов переходных процессов от коэффициента несимметрии токов для различных вариантов несимметричного нагружения трансформатора

Для первого варианта несимметричного нагружения величины суммарных ΔI увеличиваются в 2,3 раза, для второго – в 1,1 раза, для третьего – в 1,4 раза в сравнении с аналогичными значениями при наименьшем уровне несимметрии токов нагрузки ($\varepsilon_I = 0,1$). Схожие результаты были получены автором для других параметров мощности, коэффициентов мощности и загрузки.

В ходе исследования также было проанализировано влияние уровня нагружения понижающего трансформатора путем изменения коэффициента загрузки:

$$\beta = \frac{S_{нагр}}{S_{ном}}$$

где $S_{нагр}$ – полная мощность нагрузки, кВА;

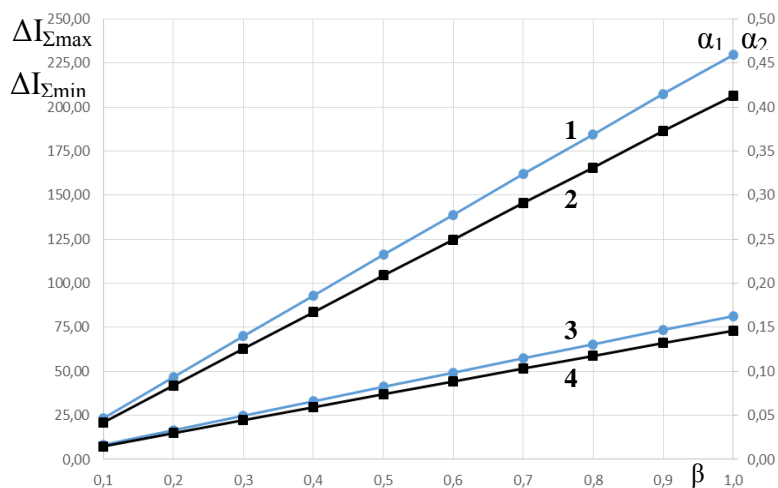
$S_{ном}$ – полная мощность трансформатора, кВА.

Значение коэффициента загрузки трансформатора в ходе исследования лежало в диапазоне $\beta = (0,1 \dots 1)$ с шагом 0,1. Результаты расчета, показанные в таблице 1 и на рисунке 4, отображают максимальную и минимальную величину суммарного увеличения токов переходных процессов в абсолютном ($\Delta I_{\Sigma max}$, $\Delta I_{\Sigma min}$) и относительном (α_1 , α_2) выражении.

Таблица 1

Максимальная $\Delta I_{\Sigma \max}$ и минимальная $\Delta I_{\Sigma \min}$ величина суммарного увеличения тока при подключении нагрузки к трансформатору (400 кВА, $\cos \varphi = 0,5$) при изменении коэффициента загрузки β

β	$\Delta I_{\Sigma \max}, A$	$\Delta I_{\Sigma \min}, A$	$\alpha_1 = \Delta I_{\Sigma \max} / I_{\text{НОМ}}$	$\alpha_2 = \Delta I_{\Sigma \min} / I_{\text{НОМ}}$
1,0	229,61	81,34	0,41	0,15
0,9	207,57	73,56	0,37	0,13
0,8	184,42	65,38	0,33	0,12
0,7	162,08	57,48	0,29	0,10
0,6	138,86	49,26	0,25	0,09
0,5	116,23	41,25	0,21	0,07
0,4	92,93	32,99	0,17	0,06
0,3	70,01	24,86	0,13	0,04
0,2	46,76	16,61	0,08	0,03
0,1	23,43	8,33	0,04	0,01



1 – зависимость $\Delta I_{\Sigma \max}(\beta)$; 2 – зависимость $\alpha_1(\beta)$;
3 – зависимость $\Delta I_{\Sigma \min}(\beta)$; 4 – зависимость $\alpha_2(\beta)$;

Рисунок 4 – Графики зависимостей максимального и минимального суммарного увеличения токов при изменении коэффициента загрузки трансформатора

Из результатов расчета автором выявлено, что при увеличении загрузки суммарное максимальное и минимальное значения увеличения токов переходных процессов коммутации нагрузки линейно растут. При росте загрузки трансформатора от 10 до 100 % от его номинальной полной мощности, наблюдается рост минимальных значений ΔI переходных процессов от 1 до 15 % от установившегося тока и максимальных значений – в диапазоне 4 – 41 %.

Было также исследовано влияние коэффициента мощности подключаемой нагрузки $\cos \varphi$ на величину суммарного увеличения токов при включении выключателей фаз трансформатора в различные моменты

времени. Значение коэффициента мощности нагрузки трансформатора в ходе исследования лежало в диапазоне $\cos\varphi = (0,5...0,9)$ с шагом 0,05. Общие результаты расчета по всему диапазону значений $\cos\varphi$ показаны в таблице 2 и на рисунке 5.

Таблица 2

Результаты расчета минимального суммарного увеличения тока $\Delta I_{\Sigma\min}$ при различных коэффициентах мощности нагрузки
(мощность – 400 кВА, $\beta = 1$)

$\cos\varphi$	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\Delta I_{\Sigma\min}, \text{ A}$	81,344	71,282	61,001	49,748	38,753	28,929	21,324	14,325	8,121

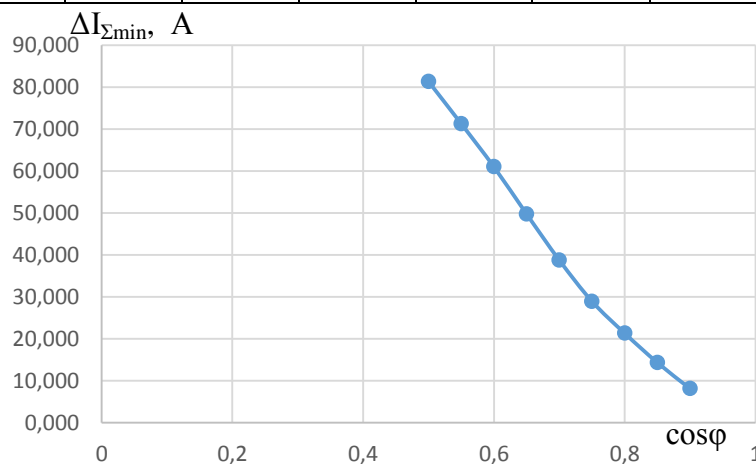


Рисунок 5 – График зависимости значений $\Delta I_{\Sigma\min}$ от изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$ при симметричном нагружении (400 кВА; $\beta = 1$)

Из результатов расчета автором величины $\Delta I_{\Sigma\min}$ в модели следует, что при снижении реактивной составляющей нагрузки минимальные суммарные ΔI переходных процессов уменьшаются. Причем, чем выше значение мощности трансформатора, тем меньше диапазон значений величины $\Delta I_{\Sigma\min}$. При мощности трансформатора 400 кВА максимальное значение величины $\Delta I_{\Sigma\min}$ превосходит его минимальное значение в 10 раз, для мощности 250 кВА – в 11 раз, 160 кВА – в 14 раз. Зависимости рисунка 5 для разных мощностей трансформатора имеют схожий вид.

Влияние изменения мощности трансформатора анализировалось на примере следующих номинальных мощностей трансформаторов: 160 кВА, 250 кВА, 400 кВА. На рисунке 6 показан пример ($\cos\varphi = 0,5$; $\beta = 1$) сравнительных диаграмм суммарного увеличения токов переходных процессов для различных комбинаций моментов включения полюсов выключателей фаз при изменении мощности трансформатора.

Анализ показал, что при росте мощности трансформатора повышается величина максимального и минимального суммарного увеличения токов переходных процессов, но отношение этих величин к соответствующим номинальным токам трансформатора остается практически постоянным. Значения ΔI_{Σ} также возрастают с ростом уровня загрузки трансформатора (рисунок 7).

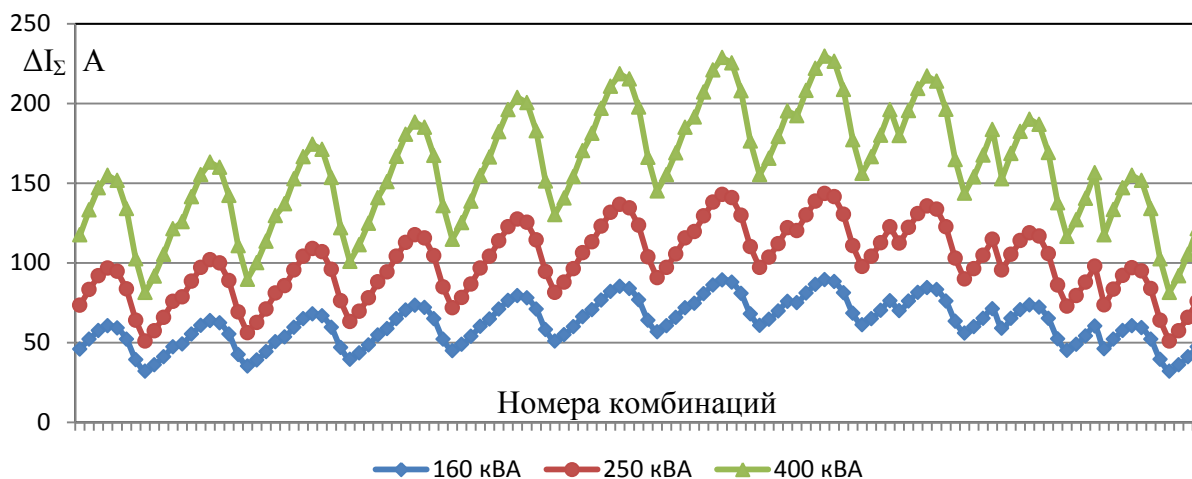


Рисунок 6 – Диаграммы суммарных ΔI переходных процессов для различных номинальных мощностей трансформатора ($t_A = 0,1$ с; $t_B = (0,1 \dots 0,11)$ с; $t_C = (0,1 \dots 0,11)$ с; $\cos\varphi = 0,5$; $\beta = 1$)

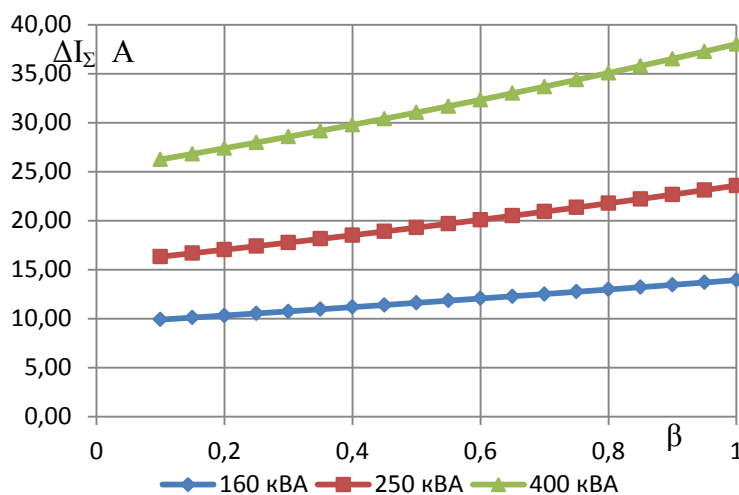


Рисунок 7 – Графики суммарных ΔI переходных процессов для различных номинальных мощностей трансформатора для случая несимметричного нагружения трансформаторов (вариант 3) ($\cos\varphi = 0,82$; $\beta = 1$)

По аналогии с исследованиями переходных процессов при включении полюсов выключателей были проведен анализ переходных процессов при отключении полюсов выключателей. Процесс выключения сопровождается перенапряжениями, которые могут во много раз превышать номинальные напряжения трансформатора. Исследования показали, что за счет регулирования моментов времени отключения выключателей возможно снизить возникающие при переходных процессах перенапряжения в диапазоне (1,1...4) раза.

Наряду с оценкой величины увеличения тока и перенапряжений, возникающих при переходных процессах коммутации, в модели (рисунок 1) автором был произведен расчет времени переходного процесса τ при изменении параметров трансформатора и нагрузки.

Результаты расчетов показали, что среднее время переходного процесса включения по трем фазам трансформатора при изменении

параметров его нагрузки одинаково и примерно равно 0,031 с, процесса отключения – 0,137 с. Таким образом, на время протекания переходного процесса тока слабо влияет изменение коэффициента загрузки трансформатора β , коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi$ и уровня несимметрии в сети.

По результатам исследования было сформулировано условие осуществления эффективного включения выключателей нагрузки. В его основу положена аппроксимация кривой переходного процесса тока нагрузки прямоугольным треугольником с основанием, равным τ и высотой, равной ΔI . Тогда условие осуществления эффективного включения выключателей нагрузки сводится к минимизации площади аппроксимирующего треугольника, т.е.

$$\frac{\Delta I_{\Sigma} \cdot \tau}{2} \rightarrow \min,$$

где ΔI_{Σ} – суммарное увеличение тока в ходе переходного процесса, А;
 τ – время переходного процесса, с.

Аналогичный критерий возможен и для процесса отключения полюсов выключателя:

$$\frac{\Delta U_{\Sigma} \cdot \tau}{2} \rightarrow \min,$$

где ΔU_{Σ} – суммарное перенапряжение в переходном процессе, В.

Причем, поскольку величина времени переходного процесса τ в ходе исследования оставалась практически постоянной, то условие включения выключателя можно свести к следующему выражению: $\Delta I_{\Sigma} \rightarrow \min$.

Четвертая глава посвящена разработке технических решений для управления элементами электрических сетей, реализующих указанные выше критерии. Дополнительные потери в системах электроснабжения возникают вследствие двух основных факторов: колебаний нагрузки и ее несимметрии. Поэтому, система управления должна управлять элементами сети электроснабжения в зависимости от перечисленных факторов и условий окружающей среды. Нагрузка элементов системы электроснабжения непредсказуемо меняется, но при этом существуют и закономерности ее изменения, которые можно учитывать. Изменение несимметрии нагрузки абсолютно непрогнозируемо.

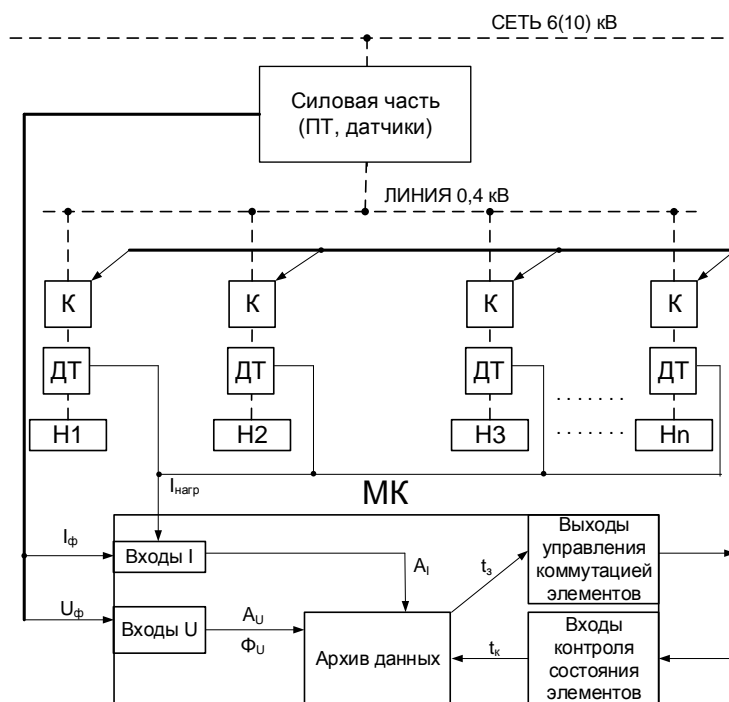
Таким образом, при создании систем управления элементами электрических сетей необходимо учитывать множество параметров, включающих в себя внешние факторы (например, величина нагрузки, температура окружающей среды), которые могут меняться как случайно, так и закономерно, и внутренние факторы (параметры элементов системы электроснабжения), которые выбираются исходя из предложенных критериев.

Управлению подлежат следующие основные элементы:

- ПТП, в которых можно управлять мощностью, путем ступенчатого переключения ПТ и несимметрией нагрузки – путем переключения однофазных нагрузок с одной фазы трансформатора на другую;

- ДЭС, в которых также можно ступенчато управлять мощностью, путем переключения ДГ;
- низковольтные линии электропередач 0,4кВ, в которых существует возможность управлять несимметрией нагрузки, путем переключения каждой удаленной однофазной нагрузки (дома, здания и т.д.) с одной фазы трансформатора на другую.

На рисунке 8 показана один из возможных вариантов однолинейной функциональной схемы однострансформаторной ПТП и системы управления.



ПТ – понижающий трансформатор; МК – микроконтроллер;
 К – коммутаторы нагрузки; Н – однофазные или трехфазные нагрузки;
 ДТ – датчики тока

Рисунок 8 – Функциональная схема однострансформаторной ПТП

Микроконтроллер МК рисунка 8 выполняет следующие основные функции:

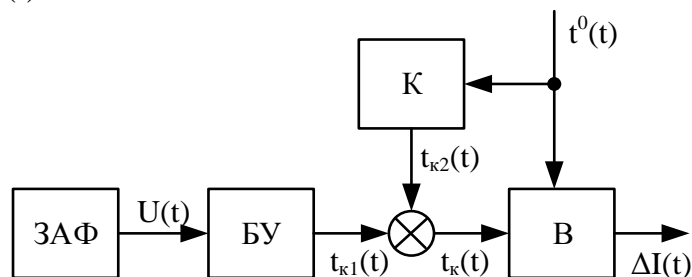
- определяет, какую нагрузку и на какую фазу ПТ необходимо переключить;
- рассчитывает момент подачи сигнала со своего выхода на модуль коммутации нагрузки, согласно указанным критериям рассчитывается время задержки сигнала на коммутацию по каждой фазе ПТ, исходя из данных по предыдущим переключениям, для обеспечения минимального увеличения тока при включении и перенапряжения при отключении.

Аналогичным образом построена работа схемы ПТП с двумя трансформаторами с добавлением системы переключения трансформаторов в зависимости от изменения мощности нагрузки. В данном случае микроконтроллер также выполняет и функцию определения того трансформатора, который в данный момент времени должен работать.

Система управления работой ДГ в ДЭС отличается тем, что микроконтроллер вносит в схему управления дополнительную задержку времени включения выключателя, необходимую для разогрева двигателя ДГ. Методика расчета данной задержки времени приведена в главе 5. Исследования показали, что для более оптимального снижения потерь от неравномерности нагрузки ДЭС целесообразно увеличивать число дизель-генераторов на электростанции до трех и более.

Система управления переключением нагрузок линий электропередач рекомендуется к применению в системах электроснабжения сельских населенных пунктов и пригородных поселков, а также там, где имеются воздушные линии электропередач 0,4кВ с присоединением к ним большого числа однофазных нагрузок. Данная система управления отличается от остальных только схемой, в которой применены специальные устройства, принимающие сигналы от датчиков тока и напряжения и передающие их в микроконтроллер. Такие устройства используются по причине большой удаленности потребителей от источников электроснабжения.

На рисунке 9 приведена типовая функциональная схема системы управления выключателями по возмущающему сигналу температуры выключателя $t^0(t)$.



ЗАФ – задатчик алгоритма функционирования; БУ – блок управления;
В – выключатель; К – компенсирующий блок

Рисунок 9 – Функциональная схема системы управления выключателями

Входными сигналами системы управления являются: величина тока по всем фазам ПТ – I_A, I_B, I_C и величина фазного напряжения. По этим данным в блоке управления вычисляется время коммутации $t_{к1}$ и сравнивается с аналогичным значением $t_{к2}$ из архива данных предыдущих коммутаций выключателя. Выходным сигналом схемы является значение роста тока переходного процесса – ΔI . В блоках функциональной схемы применяется пропорциональный закон управления.

В пятой главе автором рассмотрены алгоритмы работы указанных систем управления. Блок-схема общего алгоритма работы системы управления ПТП с двумя трансформаторами приведена на рисунке 10.

Первая подпрограмма алгоритма осуществляет прогнозирование изменения нагрузки и выбор трансформатора(ов) для ввода в работу в зависимости от величины нагрузки. Для реализации подпрограммы переключения ПТ в ПТП, необходимо рассчитывать и сравнивать

следующие параметры: $P_{нагр}$ – текущее значение мощности нагрузки каждого ПТ, рассчитываемое МК; $P_{н1}$ – суммарная мощность нагрузки, при которой равны КПД трансформаторов; $P_{н2}$ – суммарная мощность нагрузки, при которой равны потери в трансформаторе большей мощности и потери в обоих трансформаторах, работающих на одинаковую нагрузку; $P_{пр}$ – прогнозируемое значение нагрузки ПТП в зависимости от времени t .

При низкой текущей нагрузке ПТП, когда $P_{нагр} < P_{н1}$ и низкой прогнозной нагрузке $P_{пр} < P_{н1}$ в течение времени более 30 минут (согласно прогнозируемому графику), то в работу на всю нагрузку включается трансформатор $T1$ и остается под нагрузкой при кратковременном росте $P_{пр} > P_{н1}$. При увеличении мощности нагрузки в работу включается только трансформатор большей мощности $T2$ аналогично первому. При дальнейшем росте текущей и прогнозной мощности нагрузки в работу вводят оба трансформатора. Данная подпрограмма позволяет снизить потери электроэнергии путем рационального использования мощности ПТП при известном изменении мощности нагрузки.

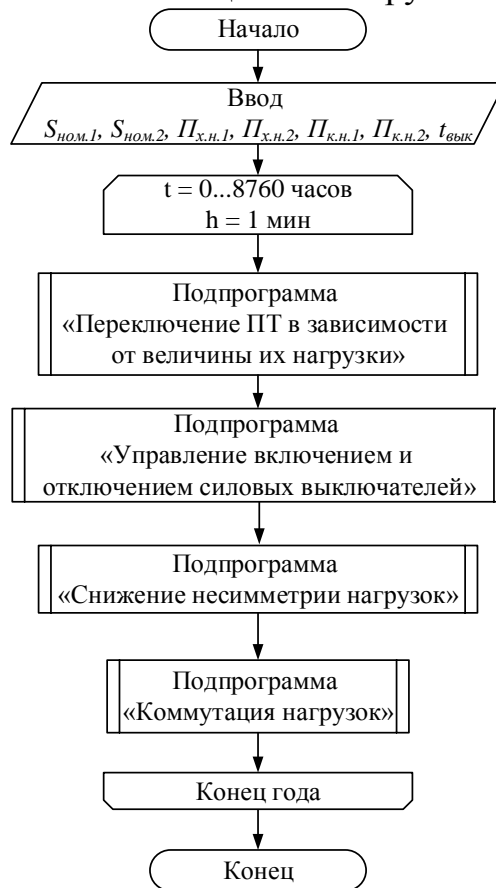


Рисунок 10 – Блок-схема общего алгоритма системы управления работой ПТП с двумя ПТ

Подпрограмма управления коммутацией силовых выключателей обеспечивает минимальную амплитуду тока переходного процесса при замыкании выключателя, повышая энергоэффективность его работы за счет управления моментами включения и выключения. Она также реализует прогнозирование параметров текущего замыкания за счет

сохранения в архиве данных параметров предыдущих замыканий и их дальнейшего использования для расчета и введения регулируемой временной задержки t_3 на срабатывание выключателя.

Подпрограмма работает следующим образом:

1) МК по алгоритму переключения трансформаторов, изложенному выше, определяет какие силовые выключатели в данный момент должны быть включены, а какие отключены;

2) на аналоговые входы МК поступает сигнал величины текущей температуры каждого из выключателей схемы $t_{\text{вык.тек}}^0$ с соответствующих датчиков температуры;

3) из архива данных по коммутациям выключателей происходит загрузка параметра $\Delta t_{\text{вкл}}$, $\Delta t_{\text{откл}}$ предыдущих включений и отключений указанных МК выключателей для температуры $t_{\text{вык.тек}}^0$;

4) микроконтроллер рассчитывает значение времени $t_{3.\text{вкл}}$ задержки подачи сигнала на включение выключателя по формуле, с:

$$t_{3.\text{вкл}} = \Delta t_{\text{вкл}} - \Delta t_{\text{откл}} + \frac{0,02 \cdot \Delta \varphi_{u.j}}{2 \cdot \pi};$$

5) так как время включения выключателя превышает время его отключения, то МК сначала подает управляющий сигнал на включение одного силового выключателя с временной задержкой $t_{3.\text{вкл}}$, а потом сигнал на отключение другого выключателя (если это требуется по алгоритму) без временной задержки.

Подпрограмма снижения несимметрии токов нагрузок по фазам ПТ осуществляет выравнивание нагрузок по фазам, снижая потери от несимметрии нагрузок и повышая энергоэффективность работы трансформатора. В начале алгоритма подпрограммы на входы МК поступают значения токов фаз трансформатора и однофазных нагрузок. Далее определяется среднее значение тока $I_{\text{ср}}$ по фазам ПТ, а токи нагрузок образуют массив данных в порядке убывания их значений. На следующей стадии определяется коэффициент несимметрии токов нагрузки ε_I , если значение $\varepsilon_I < 40\%$ – переключение нагрузок не требуется, т.к. величина возрастания потерь от несимметрии нагрузок ПТ невелика. Если же $\varepsilon_I > 40\%$ – необходимо выравнивать нагрузки по фазам посредством переключения однофазных нагрузок с одной фазы трансформатора на другую.

Условием окончания процедуры такого переключения нагрузок (выход из цикла) является равенство: $I_{\phi.i} \approx I_{\text{ср}}$, где $I_{\phi.i}$ – значение тока в i -й фазе ПТ, $I_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое всех токов по фазам ПТ. При достижении указанного условия переключаемая (при необходимости) на другую фазу нагрузка выбирается так, чтобы выполнялось условие: $|I_{\phi.i} - I_{\text{ср}}| = \min$.

Целесообразность переключения нагрузок с целью их выравнивания по фазам ПТ определяется разработанной автором программой, оценивающей увеличение потерь от несимметрии нагрузок ПТ.

Подпрограмма коммутации нагрузок определяет время задержки замыкания контактов выключателя или быстродействующего транзисторного модуля ТМ с использованием вышеописанных критериев коммутации нагрузок:

$$t_{з.к} = t_{откл} + \frac{0,02 \cdot \Delta\varphi_{u.j}}{2 \cdot \pi},$$

где $t_{откл}$ – время задержки отключения используемых коммутаторов нагрузки (паспортные данные).

Алгоритм системы управления работой ПТП с одним ПТ отличается от предыдущей отсутствием подпрограмм переключения ПТ и управления силовыми выключателями.

Отличительной особенностью алгоритма системы управления работой ДЭС с двумя ДГ от перечисленных является наличие подпрограммы переключения ДГ в ДЭС. Данная подпрограмма работает аналогично подпрограмме переключения ПТ в ПТП. Время коммутации выключателей определяется с учетом времени разогрева ДГ с использованием данных за первый год работы ДЭС по ее текущей мощности нагрузки:

$$t_p = (t_d - t_{мек}) \cdot \left(1 - \frac{t_{\phi}^0}{\Delta t_{норм}^0} \right),$$

где t_p – время разогрева двигателя ДГ, с; t_{ϕ}^0 – фактическая температура ДГ, °С; $\Delta t_{норм}^0$ – нормативное изменение температуры ДГ во время разогрева, определяется согласно нормативам по эксплуатации ДГ, °С.

Время t_d должно сравниваться и быть больше суммы времени, требуемого для разогрева t_p и пуска t_n ДГ.

Алгоритм системы управления переключением нагрузок ЛЭП учитывает удаленность нагрузок от источника электроснабжения за счет использования приемо-передающих устройств, направляющих сигналы от датчиков удаленных нагрузок к МК, и от МК на устройства коммутации. Алгоритм позволяет снижать потери от несимметрии нагрузок за счет их выравнивания по фазам линии электропередач. Алгоритм включает в себя подпрограмму снижения потерь от несимметрии нагрузок по фазам ЛЭП и подпрограмму коммутации нагрузок, аналогичную системе управления ПТП. Условием окончания процедуры переключения нагрузок с одной фазы трансформатора на другую (выход из цикла) является равенство: $I_{\phi.i} \approx I_{ср.л}$, где $I_{ср.л}$ – среднее значение тока по фазам линий электропередач 0,4 кВ.

В случае, когда $I_{\phi.i} \approx I_{ср.л}$ и МК согласно алгоритму, должен подключить или отключить дополнительную нагрузку, она должна быть выбрана с учетом условия:

$$|I_{\phi.i} - I_{ср.л}| = \min.$$

В конце главы была произведена оценка экономической целесообразности применения разработанных систем управления ПТП с

одним и двумя ПТ, системы управления ДЭС. Оценка производилась путем сравнения стоимости затрат на изготовление и монтаж устройств систем управления C_y и экономии электроэнергии от использования системы управления в рублях – C_3 . Использование разработанных систем управления экономически выгодно в случае, когда $C_3 \geq C_y$.

Экономия энергии при снижении потерь от несимметрии нагрузок однострансформаторной ПТП за год эксплуатации системы управления для большинства случаев несимметричного нагружения составляет в среднем 0,3% (при максимальном значении около 1%). Экономия при снижении потерь энергии от неравномерности нагрузки в двухтрансформаторной ПТП составляет от 0,11 до 0,71 % для симметричного режима нагружения, с учетом снижения потерь от несимметрии нагрузки экономия увеличится в среднем на 0,3 %. Экономия топлива от внедрения системы управления переключением ДГ в ДЭС составляет (4,4 – 119,7) тонн в год. Величина срока окупаемости внедрения разработанных систем управления лежит в диапазоне (1 – 4,7) года и возрастает при уменьшении мощности нагрузки ПТП и ДЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании выполненных в диссертационной работе исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ характеристик, нагрузок и потерь элементов системы электроснабжения. В результате анализа нагрузок был выявлен широкий диапазон их изменения, который носит закономерный (суточный и сезонный) и непрогнозируемый характер, обусловленный коммутацией потребителей. Изменение нагрузок и их несимметрия по фазам вызывает увеличение среднегодовых потерь энергии во всех элементах системы электроснабжения. Существующие методы и способы не позволяют существенно снизить потери от колебаний и несимметрии нагрузок. Выявлено, что целесообразным является построение систем управления работой элементов системы электроснабжения, позволяющих адаптировать их характеристики под реальные режимы работы с учетом изменения нагрузок элементов и условий окружающей среды.

2. Разработана модель и программное обеспечение, которые позволили произвести исследования влияния параметров нагрузки и трансформатора на увеличение токов переходных процессов, которые снижают энергоэффективность работы трансформатора. Величина суммарного увеличения токов в момент подключения нагрузки: сильно зависит от величины задержки срабатывания выключателей по фазам трансформатора; практически линейно возрастает при росте уровня несимметрии токов нагрузки; линейно возрастает при росте загрузки трансформатора, от 1 до 15 % от установившегося тока (минимальные значения), от 4 до 41 % (максимальные значения); увеличиваются с уменьшением коэффициента мощности нагрузки и полной мощности

трансформатора. В результате исследований на модели были сформированы критерии осуществления коммутации элементов электрических сетей с целью снижения потерь энергии в них за счет уменьшения величины ΔI_{Σ} и перенапряжений в ходе переходных процессов.

3. Разработаны новые технические решения, для систем управления ПТП и ЛЭП с использованием условий осуществления коммутации, при которых снижается суммарное увеличение токов переходных процессов коммутации нагрузок и повышается энергоэффективность работы элементов электросетей.

4. Разработаны алгоритмы работы систем управления, учитывающие как внутренние параметры элементов сети электроснабжения, так и внешние характеристики изменяющейся нагрузки и окружающей среды.

5. Оценена экономическая целесообразность применения разработанных систем управления ПТП с одним и двумя ПТ, системы управления ДЭС. Снижение потерь в годовом исчислении составляет: для однострансформаторной ПТП – в среднем 0,3 % для большинства несимметричных режимов нагружения (максимальное значение составляет около 1%); для двухтрансформаторной ПТП – (0,11...0,71)% для симметричного режима нагружения, с учетом снижения потерь от несимметрии – (0,41...1)%; для ДЭС – (4,4...119,7) тонн дизельного топлива, в зависимости от мощности нагрузки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Повышение надежности работы элементов электрических распределительных сетей низкого напряжения при коммутации нагрузок, г. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012г., Ст.179–185.

2. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Целесообразность использования устройства переключения нагрузок при симметрировании токов в понижающих трансформаторных подстанциях 10(6)/0,4кВ, г. Воронеж: Электротехнические комплексы и системы управления, 2013г., 80 с. Ст.61–65.

3. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Управление дизель-генераторами дизельных электростанций с учётом изменения нагрузки электростанции, г. Казань: Известия вузов. Проблемы энергетики, 2014г., 155 с. Ст.45–50.

4. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С. Разработка алгоритма работы системы управления дизельными электростанциями с учётом

неравномерности её нагрузки, г. Комсомольск-на-Амуре: Ученые записки КнАГТУ, 2020г., № VII-1 (47). 128 с. Ст. 42–47.

5. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Исследование влияния характеристик нагрузки на коммутацию понижающих трансформаторов 6(10)/0.4 кВ, г. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2020г. – № 12. – С. 118–121.

В других изданиях

6. Новгородов Н.А., Митин А.И., Гринкруг М.С. Исследование влияния несимметрии нагрузок на показатели работы трансформатора с соединением «Звезда-звезда с нулем». Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 39-й науч.-тех. конф. аспирантов и студентов, г.Комсомольск-на-Амуре, 2009г., в 3ч. Ч.1, 299 с. Ст.261–263.

7. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Повышение надежности работы трансформатора при снижении коэффициента несимметрии токов за счет рационального выбора моментов включения и отключения нагрузок. Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сборник статей междунар. науч.-практ. конф., г.Пенза: Приволжский дом знаний, 2010г., 104 с. Ст.25–27.

8. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Исследование амплитуд токов переходных процессов при подключении однофазных нагрузок к понижающему трансформатору. Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов, т.1 Электроэнергетика, г.Благовещенск: ГОУВПО «Амурский государственный университет», сборник трудов шестой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 25–27 мая 2011 г., 508 с. Ст.200–203.

9. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Исследование процессов коммутации однофазных нагрузок в распределительных сетях низкого напряжения. Применение инновационных технологий в научных исследованиях, г.Курск: ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 2011г., 284 с. Ст.99–104.

10. Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Управление работой элементов электрических сетей низкого напряжения / М.С. Гринкруг, Н.А. Новгородов, Ю.И. Ткачева. – LAMBERT, 2016. – 117 с.

11. Новгородов Н.А. Адаптивная система управления работой элементов электрических сетей низкого напряжения, г. Томск: Сборник научных трудов Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 2016г., 4 с.

Свидетельства

12. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613798. Программа для ЭВМ «Расчет несимметричных

режимов работы трансформатора» // Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А. – заявка № 2011612062, зарег. в реестре прогр. для ЭВМ г. Москва 16.05.2011г. – 8 с.

13. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660620. Программа для ЭВМ «Программа для определения целесообразности переключения однофазных нагрузок в трансформаторных подстанциях» // Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А. – заявка № 2012618659, зарег. в реестре прогр. для ЭВМ г. Москва 26.11.2012г. – 15 с.

Патенты

14. Патент RU 2432658 С1 РФ, МПК Н 02 J 3/00. Способ повышения надежности работы понижающей трансформаторной подстанции в распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ / Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А. Заяв. и патентообл. ГОУВПО «КНАГТУ» № 2010139826/07; Заяв. 28.09.2010; Оpubл. 27.10.2011, Бюл. №30. – 9 с.

15. Патент RU 2432657 С1 РФ, МПК Н 02 J 3/00. Способ повышения надежности работы системы электроснабжения / Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А. Заяв. и патентообл. ГОУВПО «КНАГТУ» № 2010139825/07; Заяв. 28.09.2010; Оpubл. 27.10.2011, Бюл. №30. – 7 с.

Новгородов Никита Александрович

Способы и алгоритмы управления элементами электрических сетей с целью увеличения их энергоэффективности

Автореферат

Подписано в печать

Формат 60 x 84 1/16. Бум. тип. № 3. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Уч. – изд. л. 1,35. Тираж ___ экз. Заказ ___