

На правах рукописи



Шевцов Дмитрий Евгеньевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) кВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Павлюченко Дмитрий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Сальников Василий Герасимович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», г. Новосибирск, профессор кафедры электро-энергетических систем и электротехники.

Наумкин Иван Егорович, кандидат технических наук, ООО «БОЛИД», г. Новосибирск, заместитель директора по науке.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «07» июня 2017 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан « » апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Кабышев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из основных элементов электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения являются распределительные подстанции. В последнее время происходит их широкая модернизация, в первую очередь, за счет замены маломасляных выключателей на вакуумные, как обладающих лучшими эксплуатационными свойствами.

Особенностью вакуумных выключателей является их наиболее высокая дугогасящая способность и возможность отключать высокочастотные токи. Вследствие этого вакуумные коммутационные аппараты дают большее число повторных зажигания дуги по сравнению с другими типами выключателей, что сопровождается высокочастотными перенапряжениями, представляющими наибольшую опасность для витковой изоляции электрооборудования и кабелей из сшитого полиэтилена.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при коммутации любыми типами выключателей, является то, что при включении трансформаторов и конденсаторных батарей могут возникать броски тока, которые зачастую приводят к повышенным электродинамическим усилиям на токоведущие элементы.

Для снижения негативного воздействия переходных процессов традиционно применяются специальные средства ограничения. Для снижения уровня перенапряжений широкое распространение получили ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН) и RC -цепи. Однако при возникновении высокочастотных перенапряжений ОПН малоэффективны, так как не влияют на частоту воздействующего напряжения. Применение же RC -цепей позволяет эффективно снижать высокочастотные перенапряжения. В тоже время их использование может приводить к повышению токов однофазного замыкания на землю.

Для ограничения амплитуды бросков тока обычно используются постоянно включенные реакторы или предвключаемые резисторы. Применение указанных решений в большинстве случаев оказывается неэффективным или экономически не выгодным. Кроме того использование предвключаемых резисторов требует дополнительных коммутационных аппаратов.

Указанные средства ограничения не решают проблему перенапряжений и бросков тока кардинально, так как коммутация все равно может произойти в наихудшей фазе напряжения. Принципиально иным способом снижения негативного воздействия переходных процессов является использование управляемой (или синхронной) коммутации.

Идея работы состоит в применении методов управляемой коммутации для повышения качества и надежности функционирования электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию процессов управляемой коммутации посвящены работы Г.В. Буткевича, К.П. Кадомской, Л.Г. Клепарской, А.И. Лурье, Д.Ф. Алферова, Г.С. Белкина, М.В. Чалого, О.И. Червинского, *E Andersen, D. Goldsworthy*, рабочих группы WG 13.07 (A3.07) *CIGRE «Controlled Switching of HVAC Circuit-*

Breakers» и других. Несмотря на проведенные исследования и наличие аппаратов, реализующих функцию управляемого включения или отключения, на сегодняшний день процессы управляемой коммутации вакуумных выключателей в электрических сетях 6 (10) кВ недостаточно изучены. Большинство работ в данной области относятся к высоковольтным выключателям на классы напряжения 110 кВ и выше, которые эксплуатируются в электрических сетях с заземленной нейтралью, а средой дугогашения является не вакуум. Применительно же к напряжению 6 (10) кВ имеются лишь узкие исследования, посвященные управляемой коммутации отдельных реактивных элементов в электрических сетях.

Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования, затрагивающего изучение процессов коммутации, анализ эффективности и определение области применения управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения, что и определяет актуальность темы диссертационной работы.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности функционирования электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения за счет управляемой коммутации вакуумными выключателями реактивных нагрузок.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработать имитационную модель электрической сети 6 (10) кВ систем электроснабжения для исследования переходных процессов при неуправляемой и управляемой коммутации вакуумным выключателем трансформаторов, электродвигателей и конденсаторных батарей;

- исследовать влияние параметров электрической сети на характер переходных процессов, сопровождающих коммутацию реактивных нагрузок;

- разработать алгоритмы управляемой коммутации в зависимости от вида коммутируемого присоединения и определить требования к временному разбросу работы синхронного вакуумного выключателя;

- определить область эффективного применения устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения и выдвинуть рекомендации к их работе при включении и отключении трансформаторов, электродвигателей и конденсаторных батарей.

Научная новизна:

- имитационная модель вакуумного выключателя 6 (10) кВ с функцией управляемой коммутации и учитывающая особенности электрических процессов в выключателях такого типа;

- алгоритмы управляемой коммутации, позволяющие исключить возникновение повторных зажиганий и уменьшить перенапряжения при отключении индуктивных нагрузок, а также снизить амплитуду бросков тока при включении трансформаторов и конденсаторных батарей;

- требования к разбросу времени размыкания или замыкания контактов синхронного вакуумного выключателя при коммутации различных реактивных элементов в электрической сети 6 (10) кВ систем электроснабжения.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии управляемой коммутации реактивных нагрузок в распределительных электрических сетях.

Практическая значимость работы:

- разработанные имитационные модели могут быть использованы при анализе переходных процессов при управляемой коммутации трансформаторов, электродвигателей, конденсаторных батарей вакуумными выключателями, что позволяет электросетевым организациям и производителям коммутационных аппаратов обоснованно определять область эффективного применения устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения;

- разработанные алгоритмы управляемой коммутации различных реактивных нагрузок и выдвинутые технические требования к работе синхронных вакуумных выключателей могут применяться при проектировании и эксплуатации устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения;

- полученные при выполнении работы результаты используются научно-производственным предприятием ООО «КЭПС» (г. Новосибирск) при настройке системы управления синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC* 6(10)-20/1000 и АО «РЭС» (г. Новосибирск) для снижения бросков тока и перенапряжений при плановых коммутациях в городских электрических сетях 6 (10) кВ г. Новосибирска.

Личный вклад автора состоит в подготовке аналитического обзора по тематике диссертационной работы, разработке имитационных моделей для исследования переходных процессов при коммутации электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения, проведении исследования переходных процессов при коммутации различных реактивных нагрузок, анализе полученных результатов и их сравнении с имеющимися экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках.

Методология диссертационного исследования

Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых в области исследования и ограничения перенапряжений, исследования переходных процессов при коммутациях в электрических сетях.

Методы диссертационного исследования

При выполнении работы использовались методы имитационного моделирования. Исследование основывалось на положениях теории нелинейных электрических цепей, теории магнитных цепей, методах структурного моделирования. Анализ и обработке подвергались экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная имитационная модель электрической сети 6 (10) кВ для исследования переходных процессов при неуправляемой и управляемой коммутации;

- разработанная имитационная модель синхронного вакуумного выключателя, учитывающая особенности электрических процессов в выключателях такого типа;
- предложенные алгоритмы управляемого включения и отключения реактивных нагрузок, позволяющие уменьшить негативное воздействие переходных процессов;
- установленные требования к точности управления синхронного вакуумного выключателя при коммутации различных реактивных элементов;
- проведенный анализ области применения управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов работы подтверждается использованием современных средств имитационного моделирования; апробацией и верификацией разработанных моделей на основе экспериментальных данных, полученных из литературных источников.

Апробация результатов

Основные результаты и положения работы обсуждались на семинарах кафедры систем электроснабжения предприятий и факультета энергетики НГТУ (2014-2016 гг.) и докладывались на следующих конференциях: на XX международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии», Томск, 2014 г.; на I международной научной конференции молодых учёных «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», Новосибирск, 2014 г.; на XXI всероссийской научно-технической конференции, г. Томск, 2015 г.; на 54-ой международной научной студенческой конференции, г. Новосибирск, 2016 г.; на XI Международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST-2016), г. Новосибирск, 2016 г.; на международной научно-практической конференции «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе», г. Тюмень, 2016 г., на Республиканской научно-практической конференции «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность», г. Душанбе, Таджикистан, 2016 г.

По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 3 статьи в других периодических изданиях; 7 работ в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Основной текст работы изложен на 147 страницах и включает 59 рисунков, 6 таблиц, список литературы, состоящий из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана характеристика области исследования и обоснована актуальность темы; сформулированы идея, цель, основные задачи и научная новизна работы; приведены основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; обоснована степень их достоверности.

В первой главе проанализированы особенности переходных процессов, возникающих при коммутации выключателями реактивных элементов электрических сетей 6 (10) кВ. Переходные процессы обусловлены, в первую очередь, перераспределением энергии между индуктивными и емкостными элементами электрической сети и определяются параметрами коммутируемого присоединения и характеристиками используемого выключателя.

Выявлено, что в настоящее время в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения применяются выключатели следующих видов: маломасляные, вакуумные, элегазовые. При этом в России и за рубежом отмечается тенденция увеличения доли вакуумных выключателей, что связано с их преимуществами по сравнению с другими типами.

Показано, что в процессе коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки могут возникать опасные для оборудования высокочастотные перенапряжения. Включение трансформаторов и конденсаторных батарей любыми типами выключателей может сопровождаться значительными бросками тока, что также представляет опасность.

Во второй главе раскрывается суть метода управляемой коммутации как способа снижения уровня перенапряжений и амплитуды бросков тока. В результате проведенного литературного обзора под управляемой коммутацией понимается коммутация электрической сети в определенный момент времени, производимая с учетом состояния сети на момент операции, позволяющая произвести включение или отключение в наиболее благоприятных для оборудования условиях. Под коммутационным аппаратом, реализующим метод управляемой коммутации (синхронный выключатель), следует понимать аппарат, контакты которого размыкаются в заданную фазу тока и (или) замыкаются в заданную фазу напряжения.

Представлен анализ современного состояния исследований в данной области, приведены примеры устройств, реализующих метод управляемой коммутации. Особенностью имеющихся исследований и существующих устройств является то, что они не являются комплексными решениями. Каждое отдельно взятое устройство предназначено для решения узкой задачи, например, только для управляемого включения конденсаторной батареи. Большинство проведенных работ относятся к электрическим сетям на классы напряжения 110 кВ и выше с заземленной нейтралью, где вакуумные выключатели используются крайне редко.

В третьей главе осуществлена разработка имитационной модели электрической сети 6 (10) кВ систем электроснабжения для исследования переходных процессов при неуправляемой и управляемой коммутации трансформаторов, электродвигателей и конденсаторных батарей.

Моделирование выполнено в программном комплексе *MatLab/Simulink*. Основными элементами модели электрической сети 6 (10) кВ (рисунок 1) являются: система в виде источника бесконечной мощности (*Three-Phase Source*); синхронный вакуумный выключатель, реализующий метод управляемой коммутации (*Circuit Breaker*); линия электропередачи, моделируемая линией с распределенными параметрами и учитывающая поверхностный эффект (*Line*);

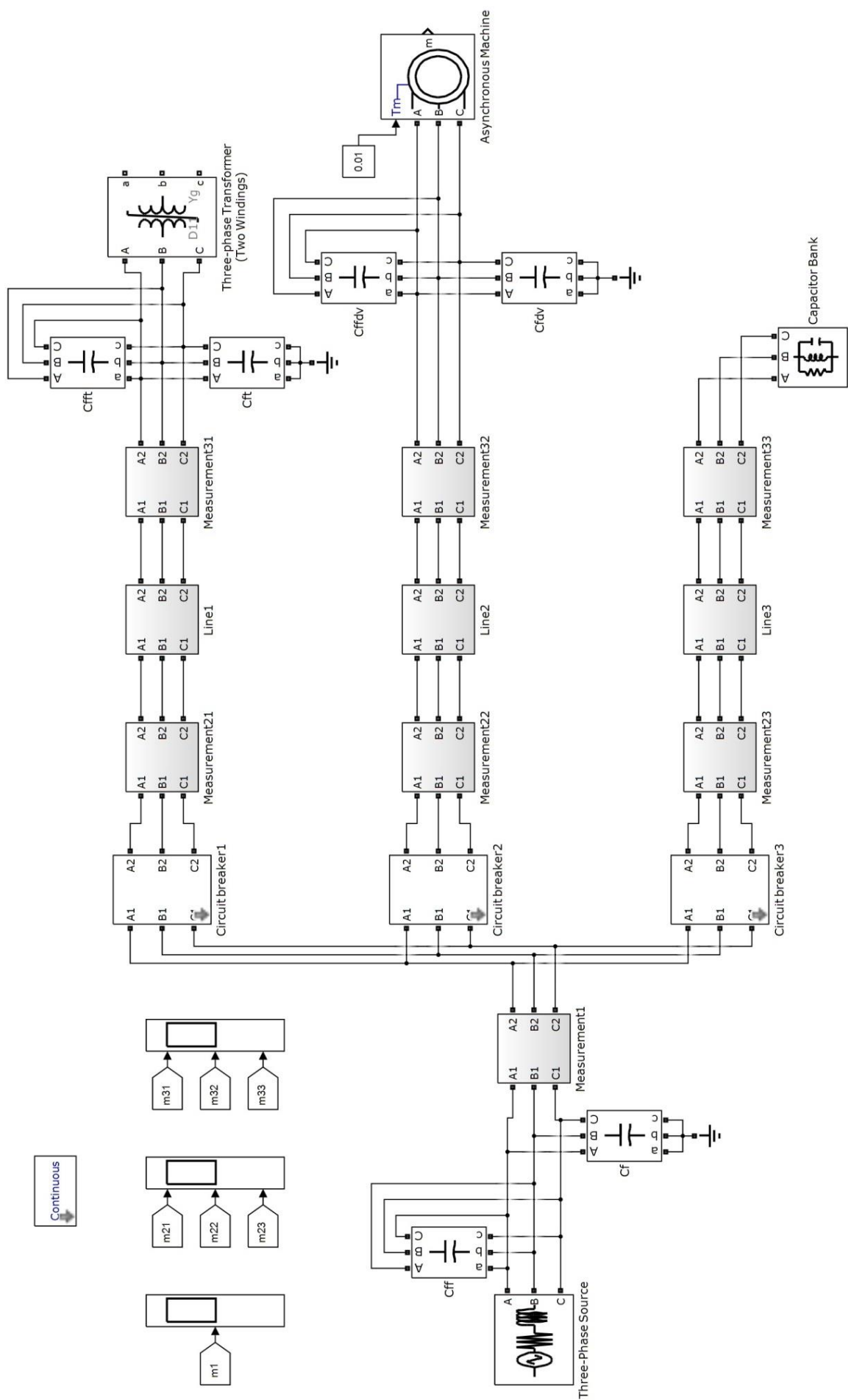


Рисунок 1 – Общий вид модели электрической сети 6 (10) кВ

трансформатор с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника (*Three-phase Transformer*); электродвигатель в пусковом режиме (*Asynchronous Machine*); конденсаторная батарея (*Capacitor Bank*). Некоторые блоки не содержат емкости между фазой и землей и между фазами. Для их учета использованы стандартные блоки *Three-Phase Parallel RLC Branch* (C_f и C_{ff} на рисунке 1).

Модель синхронного вакуумного выключателя включает следующие характеристики реальных вакуумных выключателей:

- срез тока до его естественного перехода через ноль составляет 4 – 6 А;
- электрическая прочность межконтактного промежутка описывается линейной зависимостью и изменяется со скоростью 20 – 80 кВ/мс;
- максимальная скорость перехода высокочастотного тока через ноль, при которой возможно погасание дуги, имеет значение 40 – 160 А/мкс.

В данной работе проводились исследования разбросов времени срабатывания полюсов синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производства ООО «КЭПС». Экспериментальные исследования были выполнены в лаборатории Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета в рамках проекта «Исследование характеристик синхронного вакуумного выключателя для разработки оптимальных алгоритмов коммутации электрической сети» Российского фонда фундаментальных исследований (№ проекта 15-38-51009). По результатам исследования разброс времени в работе каждого полюса выключателя составил не более 0,5 мс, что также учтено в модели синхронного вакуумного выключателя.

Кроме того, модель выключателя, способного реализовать метод управляемой коммутации, имеет возможность разновременной коммутации отдельных полюсов аппарата.

Модель синхронного вакуумного выключателя (рисунок 2 и 3) реализована для трех фаз выключателя с использованием блоков имитационного моделирования. Разновременная коммутация полюсов выключателя осуществлена с помощью блоков *Step* (рисунок 3), в которых задается момент времени коммутации каждого отдельного полюса аппарата. Силовые контакты и электрическая дуга каждого полюса выключателя моделируются блоками *IdealSwitch* (рисунок 2). В модели учитывается сопротивление дуги в виде постоянного активного сопротивления, величина которого выбирается пропорционально величине отключаемого тока.

Управление процессами включения и отключения выключателя реализовано с помощью блоков *Opening command* и *Closing command* (рисунок 2), подробный вид которых представлен на рисунке 3.

Срез тока моделируется во всех отключаемых фазах при первом погасании электрической дуги (рисунок 3, а). Ток в фазах измеряется при помощи блоков *Current1–3* и далее сравнивается с заданным током среза. В случае выполнения неравенства блоками *EnabledSubsystem7–9* подается команда на гашение дуги между контактами. В дальнейшем возможны только виртуальные срезы тока.

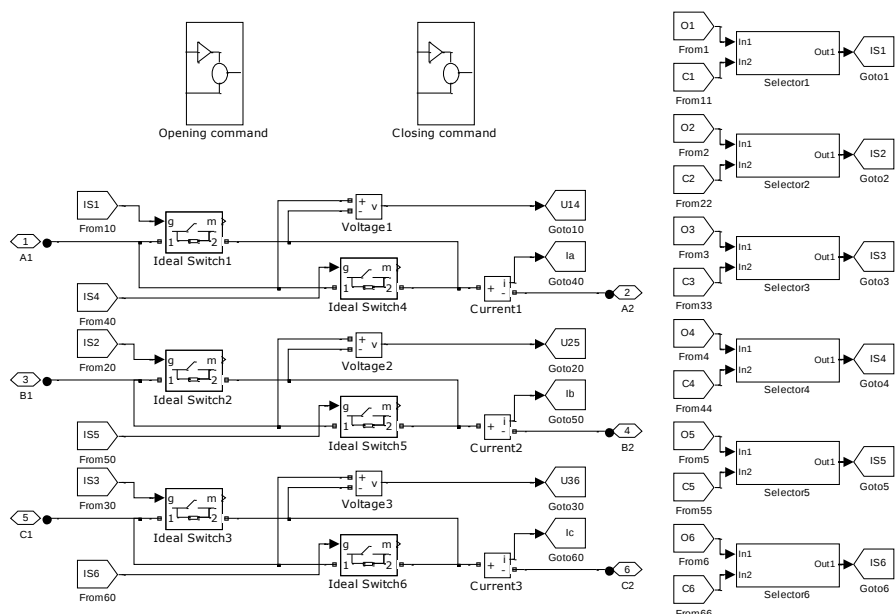


Рисунок 2 – Укрупненная модель синхронного вакуумного выключателя

Повторные зажигания дуги могут возникать во всех трех фазах выключателя при недостаточной электрической прочности межконтактного промежутка. Электрическая прочность начинает возрастать с момента начала расхождения контактов для каждого полюса и моделируется блоками *Integrator4–6*. Восстанавливающееся напряжение между контактами выключателя измеряется блоками *Voltage1–3*. При выполнении условия неравенства формируется управляющий сигнал блоками *EnabledSubsystem4–6* на повторное зажигание дуги.

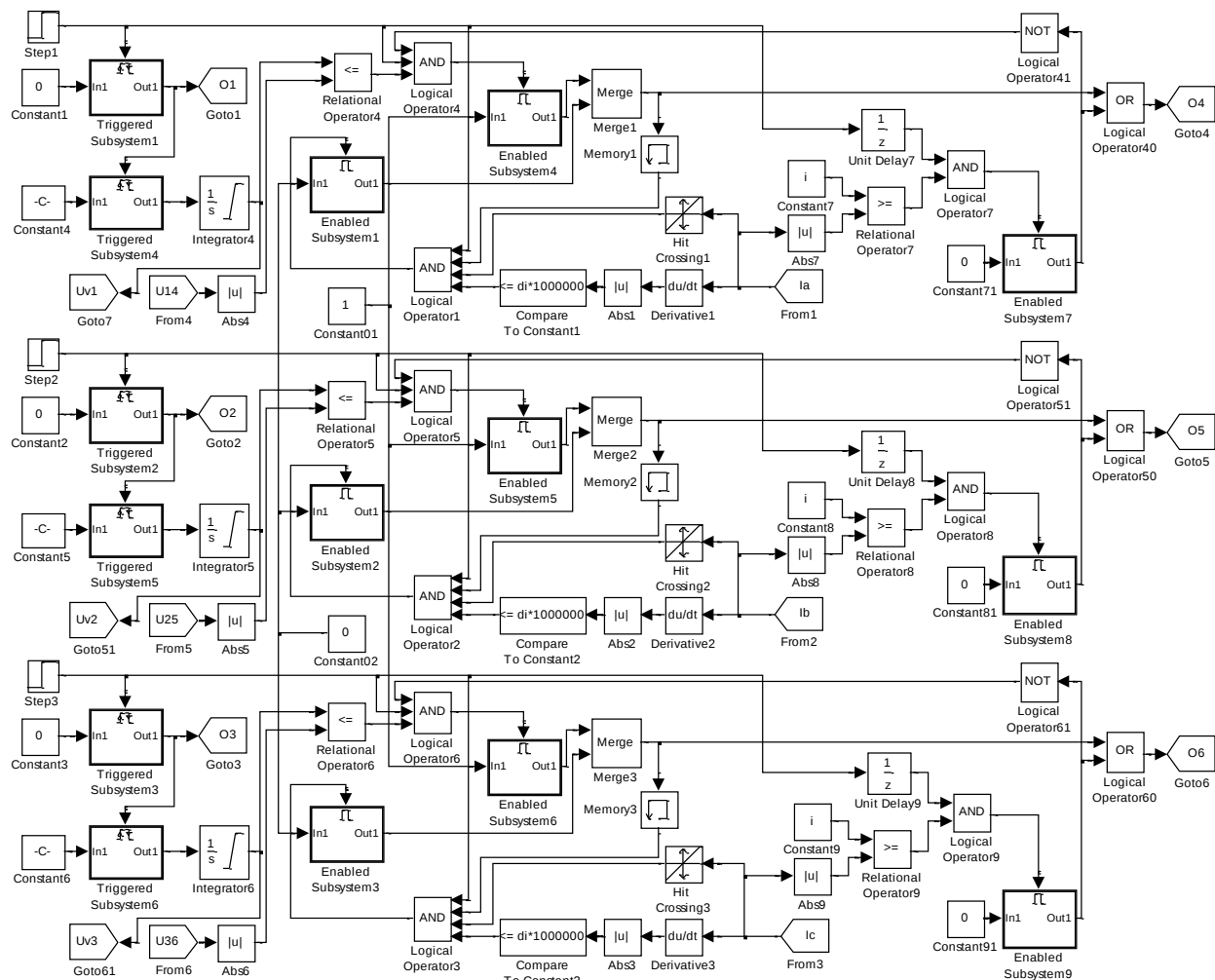
Электрическая дуга гаснет при прохождении кривой тока через ноль в случае не превышения заданной скорости тока, при которой возможно гашение дуги. Блоки *EnabledSubsystem1–3* формируют сигнал на погасание дуги. Процесс зажигания и погасания дуги может повторяться несколько раз в зависимости от характеристик отключаемой сети.

При подаче команды на включение (рисунок 3, б) электрическая прочность межконтактного промежутка начинает снижаться, что реализовано с помощью блоков *Integrator4–6* для каждого отдельного полюса выключателя. Команда на зажигание электрической дуги формируется блоками *EnabledSubsystem4–6*. Сигнал на погасание электрической дуги создается блоками *EnabledSubsystem1–3*. Далее процесс зажигания и погасания дуги может повторяться несколько раз до смыкания контактов выключателя.

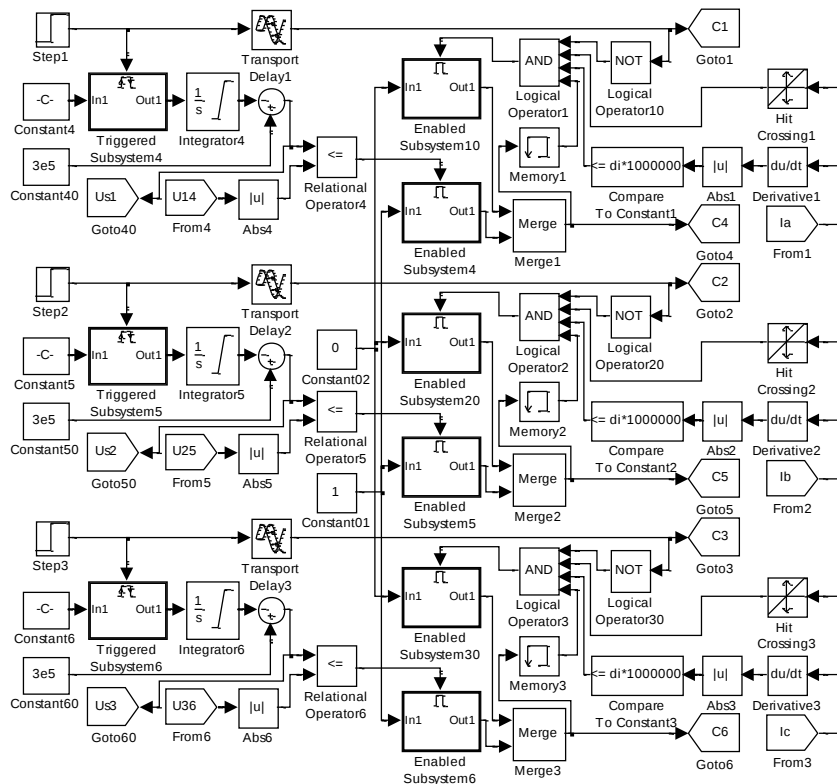
Разработанные модели элементов электрической сети были проверены на работоспособность и адекватность при коммутации трансформаторов, электродвигателей и конденсаторных батарей. Результаты, полученные по предложенным моделям, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными, представленными в литературных источниках.

В четвертой главе представлены результаты исследования переходных процессов при неуправляемой и управляемой коммутации реактивных нагрузок в электрических сетях 6 (10) кВ.

При отключении трансформаторов наиболее вероятно появление опасных перенапряжений в случае коммутации его токов холостого хода. Выявлено, что практически каждое размыкание фаз ненагруженного трансформатора сопро-



a



б

Рисунок 3 – Блок управления процессом отключения (а) и включения (б) выключателя

возбуждается множественными повторными зажиганиями, и, соответственно, высокочастотными перенапряжениями. Таким образом, при разработке алгоритмов управляемого отключения трансформаторов необходимо исключить появление повторных зажиганий дуги и минимизировать перенапряжения.

Разработка наилучшего алгоритма отключения ненагруженного трансформатора осуществлялась путем перебора всех возможных комбинаций порядка размыкания полюсов выключателя: одна относится к одновременному размыканию трех полюсов, шесть – к одновременному размыканию двух полюсов, шесть – к разновременному размыканию полюсов выключателя. Учитывая аналогичность развития переходных процессов при использовании некоторых комбинаций коммутации, представлены две последовательности коммутации полюсов выключателя, на основе которых возможна реализация оптимальных алгоритмов отключения трансформаторов: *A-B-C*, *A-C-B*.

Поиск оптимального алгоритма отключения трансформаторов осуществлялся варьированием времени коммутации полюсов выключателя. На рисунке 4

представлены уровни перенапряжений и количество повторных зажиганий дуги при размыкании полюсов аппарата в разные моменты времени. Отключение первой фазы ($T_A = var$, T_A – момент времени коммутации фазы *A*) в большинстве случаев сопровождается повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями, однако имеются временные промежутки, при коммутации в которых повторные зажигания дуги не возникают. Временная зона, коммутации в которой характеризуются наименьшими перенапряжениями и не сопровождаются повторными зажиганиями дуги, соответствует наименьшим значениям тока трансформатора.

Таким образом, наилучшим алгоритмом

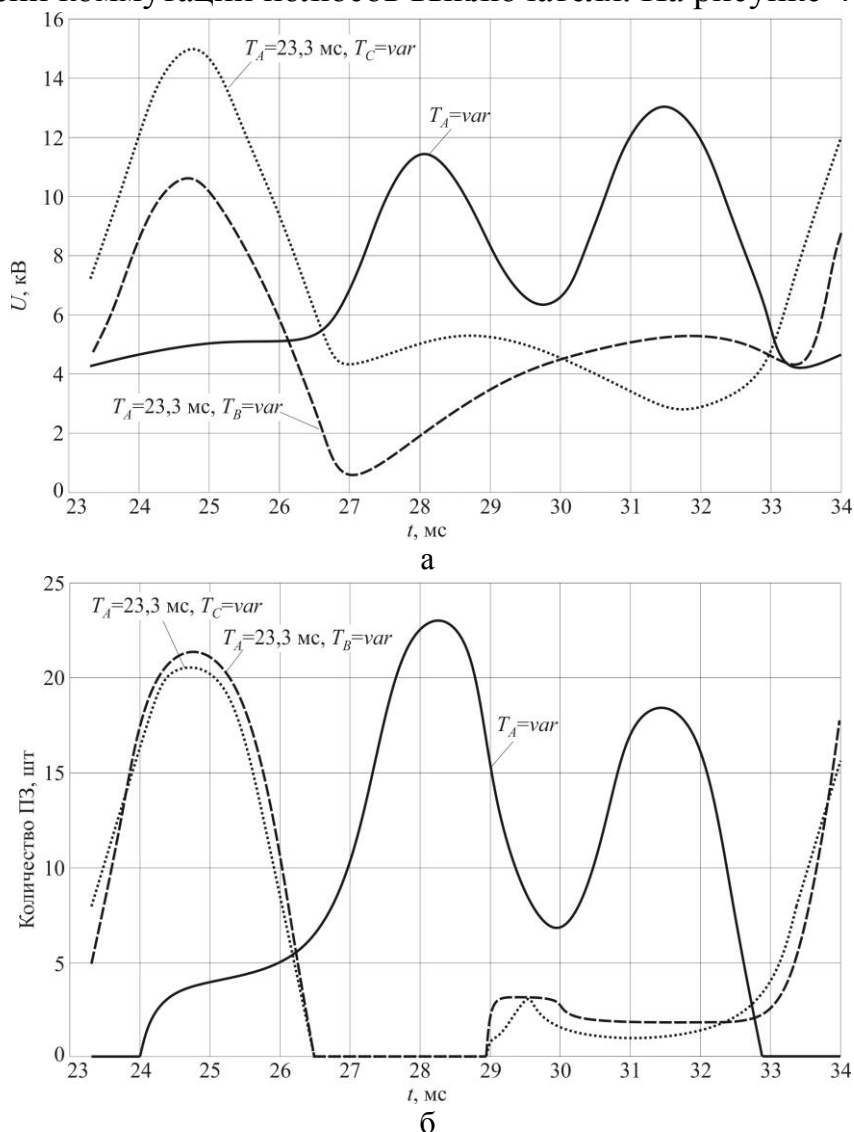


Рисунок 4 – Зависимость напряжения (а) и количества повторных зажиганий дуги (б) от момента отключения тока холостого хода трансформатора 1000 кВА: T_A , T_B , T_C – моменты времени коммутации фаз *A*, *B*, *C* соответственно

отключения ненагруженного трансформатора является последовательность $A-B-C$, при которой отключение первых двух фаз происходит при переходе тока через ноль, третьей фазы после окончания переходных процессов во второй фазе (рисунок 5).

Наиболее высокие требования к точности управления предъявляются при отключении трансформаторов большей мощностью (рисунок 6, а). Увеличение длины питающей линии ведет к снижению требований к точности срабатывания полюсов выключателя.

С ростом скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка наблюдается снижение требований к точности срабатывания полюсов выключателя (рисунок 6, б), при этом происходит значительное увеличение допустимого разброса момента отключения второго полюса.

При включении силовых трансформаторов в электрическую сеть могут возникать значительные броски тока намагничивания, величина которых в 6-10 раз превышает номинальный ток трансформатора. Основными

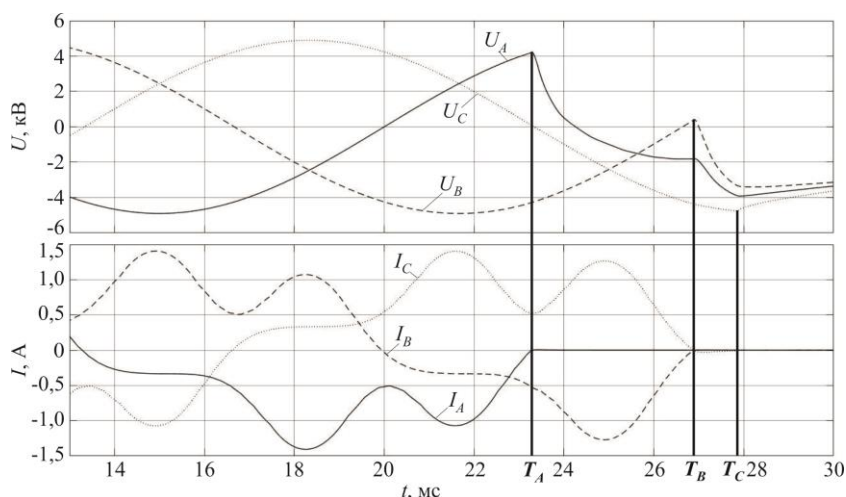


Рисунок 5 –Управляемое отключение ненагруженного трансформатора 1000 кВА по алгоритму $A-B-C$

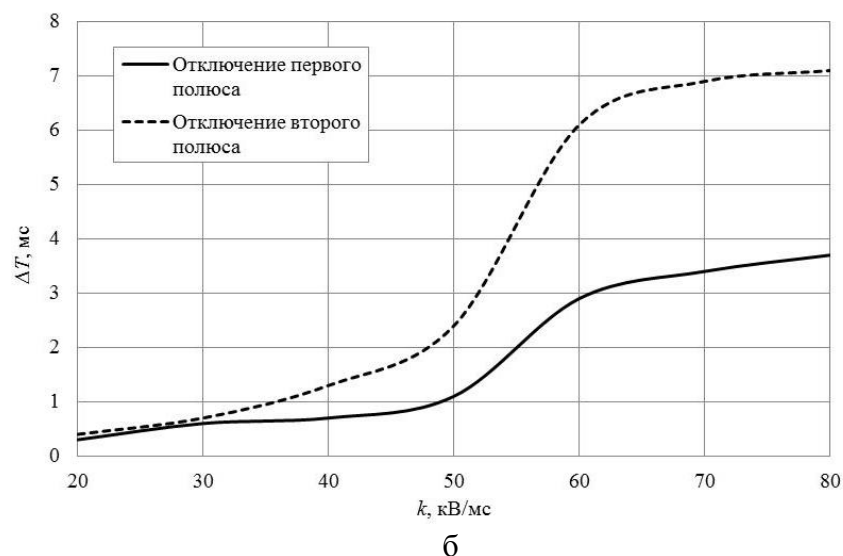
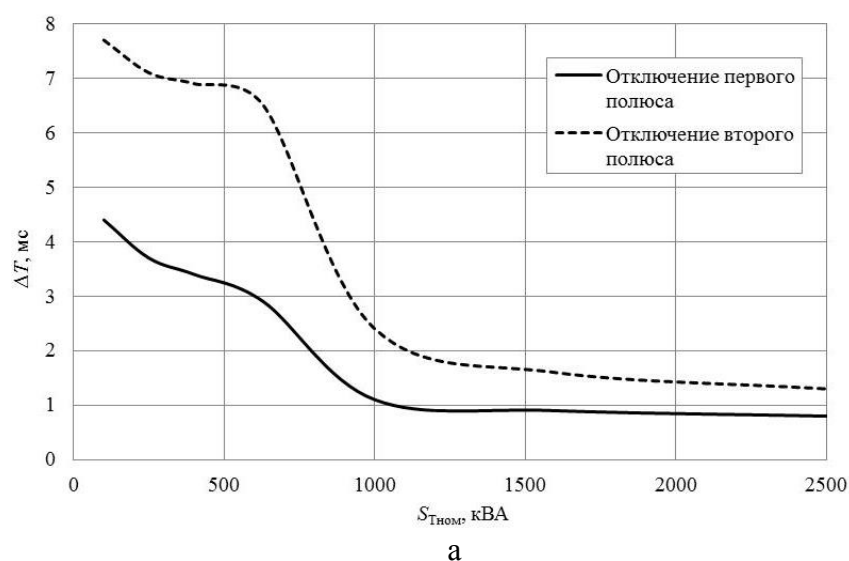


Рисунок 6 – Допустимые разбросы времени размыкания полюсов синхронного выключателя в зависимости от мощности трансформатора (а) и скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка (б)

факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении трансформатора, являются остаточный магнитный поток в сердечнике трансформатора и момент замыкания контактов выключателя. Осциллограммы управляемого включения трансформатора при отсутствии остаточного магнитного потока по алгоритму коммутации СВ-А представлены на рисунке 7. В этом случае необходимо одновременно произвести коммутацию двух первых фаз в момент максимального линейного напряжения между фазами. Далее произвести коммутацию третьей фазы в момент максимального напряжения на этой фазе.

Включение трансформатора при отсутствии остаточной намагниченности позволяет снизить броски тока до значений, не превышающих номинальный ток трансформатора с допустимым разбросом не более 1,2 мс. При наличии остаточной намагниченности удастся снизить броски тока до уровня, не превышающего $3 \cdot I_{ном.т}$ с допустимым разбросом не более 0,5 мс.

При отключении электродвигателя наиболее вероятно появление опасных перенапряжений в случае отключения пускового тока электродвигателя. Из полученных результатов (рисунок 8) следует, что опасные для изоляции электродвигателя перенапряжения образуются при коммутации в течение ограниченного промежутка времени, что соответствует области наименьших значений тока.

Напряжения и токи при управляемом отключении электродвигателя по алгоритму А-ВС представлены на рисунке 9. Отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль. Управляемое отключение электродвигателей позволяет исключить появление виртуальных срезов тока и повторных зажигания дуги, уменьшить возникающие перенапряжения до уровня $2,3 \cdot U_{фм}$.

Допустимый разброс срабатывания контактов выключателя при управляемой коммутации двигательной нагрузки определяется преимущественно заданным временем начала размыкания контактов до перехода тока через ноль.

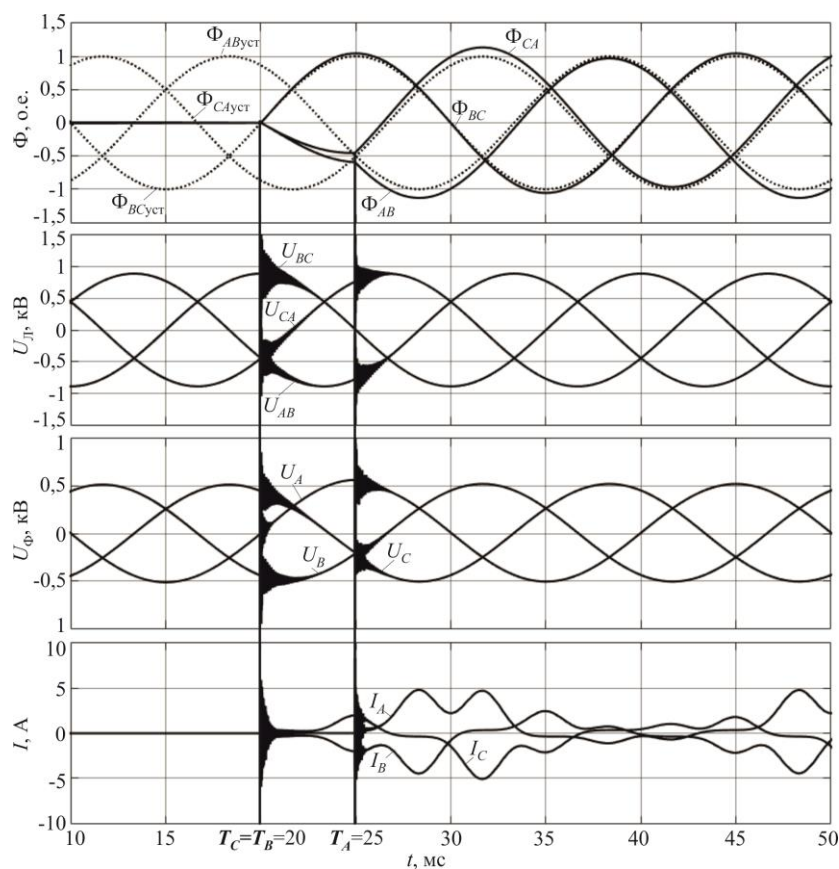


Рисунок 7 – Управляемое включение трансформатора 1000 кВА с соединением первичной обмотки в треугольник по алгоритму СВ-А: Φ – магнитный поток в сердечнике трансформатора; $U_{л}$, $U_{ф}$ – линейное и фазное напряжение в электрической сети до выключателя; I – ток трансформатора

При включении электродвигателя, как и при отключении, могут возникать высокочастотные перенапряжения, основной причиной которых являются предпробои.

Таким образом, при разработке алгоритмов управляемого включения электродвигателей целесообразно принять в качестве критерия оптимальности отсутствие предпробоев и минимизацию перенапряжений. В качестве оптимального алгоритма включения выбран алгоритм *С-В-А*, так как в этом случае возможно исключение возникновения предпробоев.

Напряжения и токи при управляемом включении электродвигателя по алгоритму *С-В-А* представлены на рисунке 10. В этом случае включение первого полюса выключателя производится в момент перехода фазного напряжения через ноль, второго – в момент перехода линейного напряжения между этими фазами через ноль, третьего – в момент перехода фазного напряжения через ноль.

Допустимый разброс в работе каждого полюса аппарата при управляемом включении электродвигателя должен составлять не более 0,05 мс. Увеличение длины кабельной линии ведет к снижению требований к точности срабатывания. При скорости спада электрической прочности межконтактного

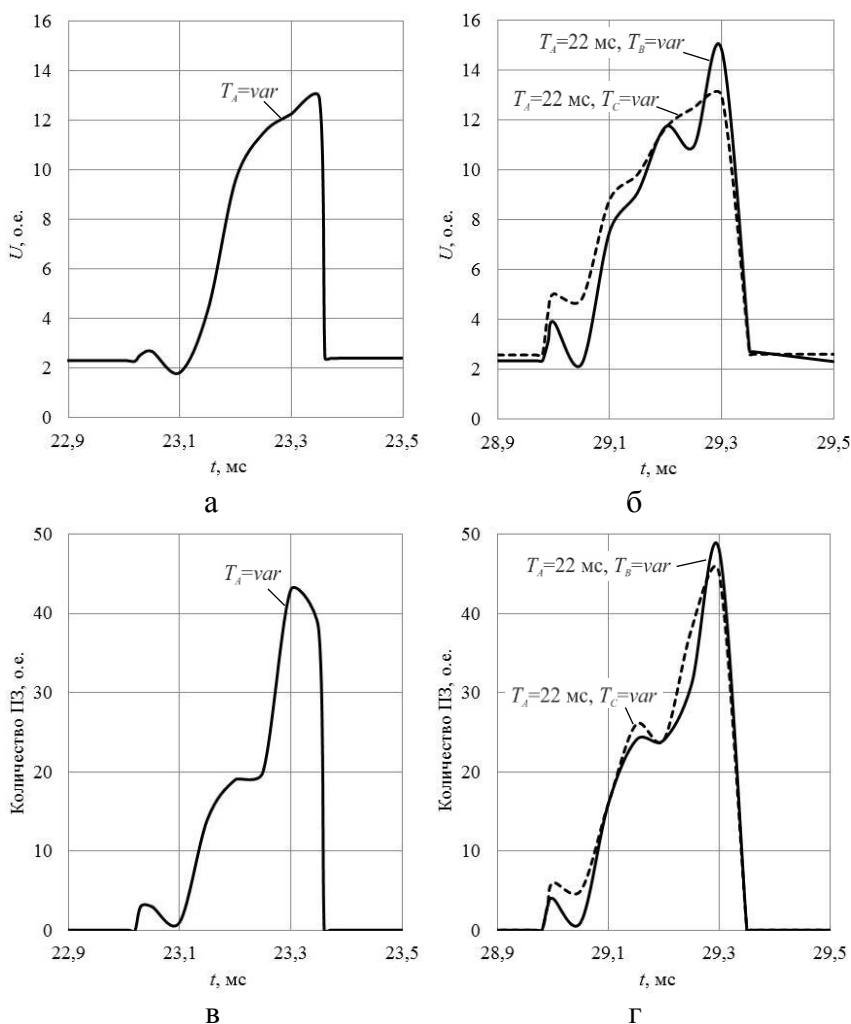


Рисунок 8 – Зависимость напряжения (а, б) и количества повторных зажиганий дуги (в, г) от момента отключения пускового тока электродвигателя ($P_{дв} = 200$ кВт, $L = 25$ м)

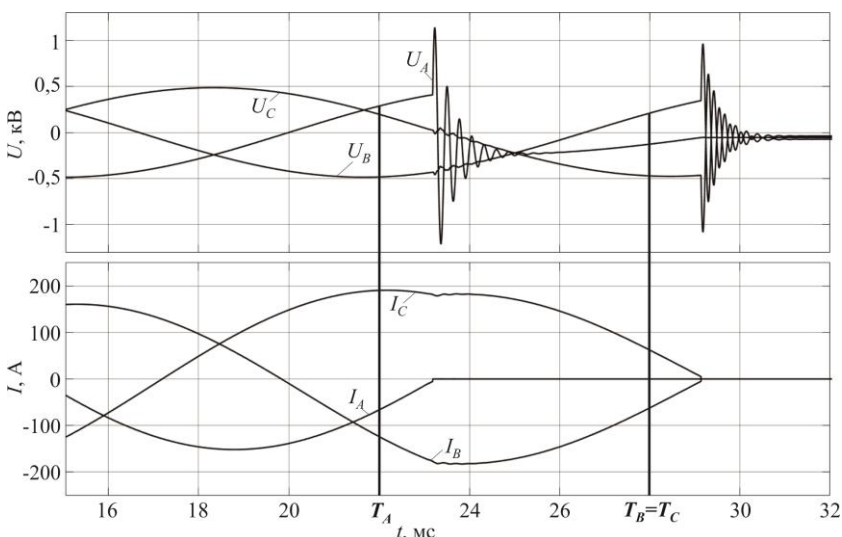


Рисунок 9 – Управляемое отключение пускового тока электродвигателя ($P_{дв} = 200$ кВт, $L = 25$ м) по алгоритму *А-В-С*

промежутка ниже 20 кВ/мс реализация управляемого включения электродвигателей без возникновения предпробоев невозможна.

Отключение конденсаторных батарей без возникновения повторных пробоев в выключателе не создает опасных уровней перенапряжений. Управляемое отключение конденсаторных батарей позволяет исключить вероятность появления повторных зажиганий и снизить уровень возникающих перенапряжений. В этом случае отключение производится по алгоритму *A-BC* с опережением момента перехода токов в фазах через ноль (рисунок 11).

При этом разброс момента срабатывания каждого полюса выключателя, как и в случае отключения электродвигателя, определяется моментом коммутации контактов относительно нуля тока.

Включение конденсаторных батарей в электрическую сеть может сопровождаться значительными бросками тока до 30-40 крат от номинального тока установки.

Основными факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении конденсаторной батареи, являются остаточный заряд на конденсаторе и момент замыкания контактов выключателя.

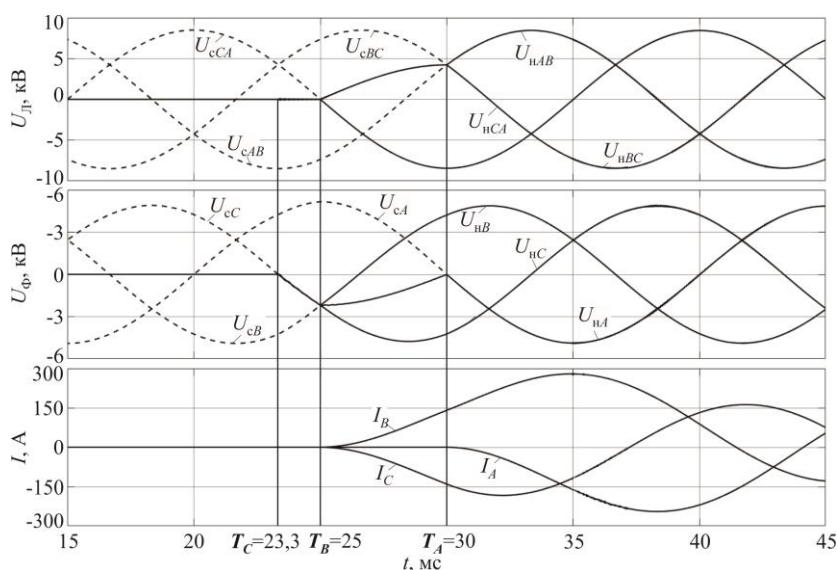


Рисунок 10 – Управляемое включение электродвигателя ($P_{дв} = 200$ кВт, $L = 250$ м) по алгоритму *C-B-A*: U_c , U_n – напряжения на выключателе со стороны системы и нагрузки

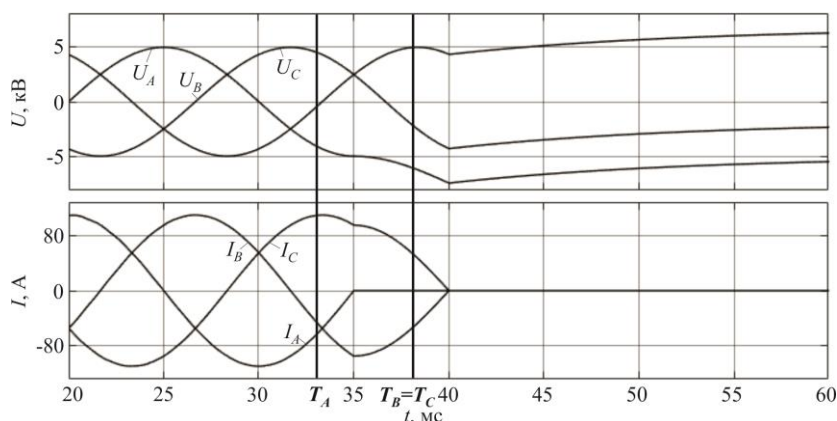


Рисунок 11 – Управляемое отключение конденсаторной батареи 500 квар по алгоритму *A-BC*

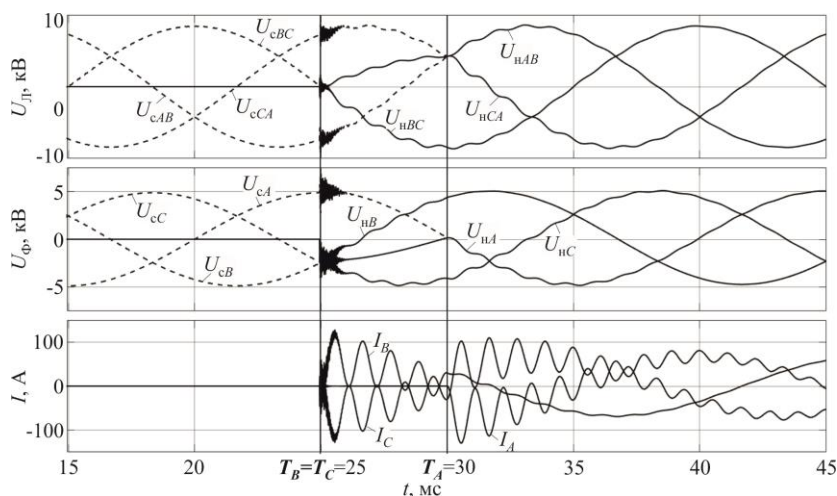


Рисунок 12 – Управляемое включение конденсаторной батареи 500 квар без остаточного заряда по алгоритму *CB-A*; U_c , U_n – напряжения на выключателе со стороны системы и нагрузки

На основании проведенного исследования в качестве наилучшего алгоритма включения конденсаторной установки выбран алгоритм *СВ-А* (рисунок 12). В этом случае необходимо одновременно произвести включение двух фаз батареи в момент совпадения линейных напряжений между этими фазами на выключателе со стороны системы и нагрузки, далее произвести коммутацию третьей фазы в момент равенства соответствующих напряжений коммутируемой фазы на выключателе.

Заключительным этапом работы являлось определение области эффективного применения управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения. Эта задача связана с анализом ожидаемого эффекта снижения амплитуды переходного процесса и соответствия устройств управляемой коммутации специальным требованиям.

На рисунке 13 представлены перенапряжения и броски тока при неуправляемой и управляемой коммутации разных реактивных элементов, из которого видно, что во всех рассмотренных случаях управляемая коммутация позволяет ограничить высокочастотные перенапряжения и броски тока. Однако эффект от снижения перенапряжений при отключении конденсаторной батареи незначительный, поэтому в этом случае применение устройств управляемой коммутации может оказаться нецелесообразным.

Допустимые разбросы времени срабатывания полюсов синхронного выключателя представлены на рисунке 14. Сравнение требований, предъявляемых к устройствам управляемой коммутации и характеристик синхронного вакуумного выключателя *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производства ООО «КЭПС» позволяет утверждать, что управляемое включение электродвигателей без предпробоев современными выключателями не осуществимо. В остальных случаях управляемая коммутация может быть применима.

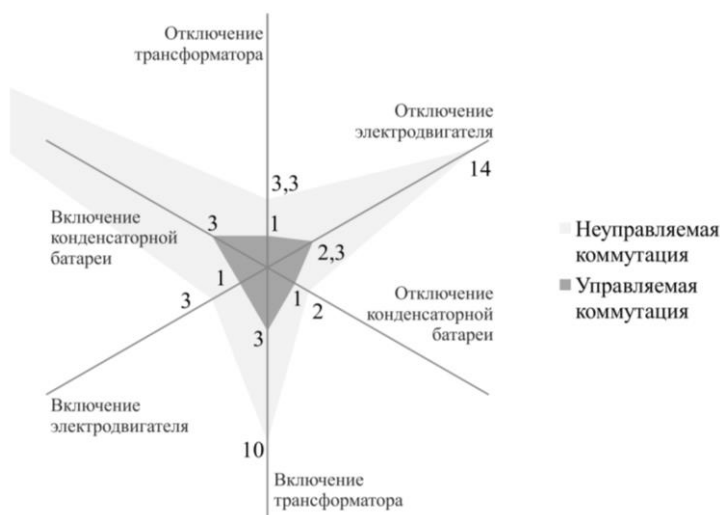


Рисунок 13 – Перенапряжения и броски тока при неуправляемой и управляемой коммутации, о.е.

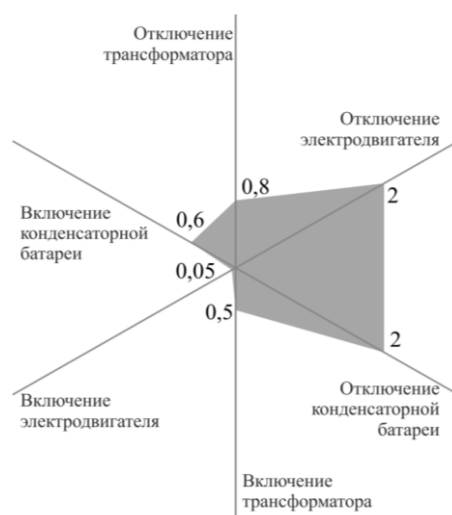


Рисунок 14 – Допустимый разброс времени срабатывания полюсов устройства управляемой коммутации, мс

В пятой главе представлены результаты практической апробации разработанных алгоритмов управляемой коммутации. Первый этап решения поставленной задачи заключался в настройке совместно с ООО «КЭПС» синхронного

вакуумного выключателя *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* согласно предложенным алгоритмам управляемой коммутации.

Вторым этапом являлось проведение опытно-промышленной эксплуатации синхронного вакуумного выключателя в электрической сети 6 (10) кВ АО «Региональные электрические сети» филиала «Новосибирские городские электрические сети».

На рисунке 15 представлена осциллограмма напряжений при плановом отключении выключателя по предложенным алгоритмам, из которой видно, что повторные зажигания дуги и перенапряжения отсутствуют.

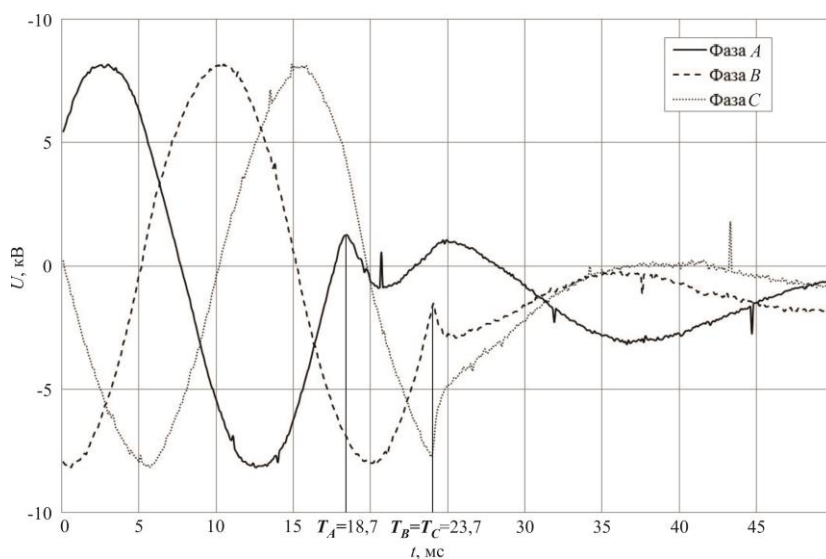


Рисунок 15 – Экспериментальная осциллограмма напряжений при управляемом отключении выключателя

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны имитационные модели, позволяющие исследовать перенапряжения и броски тока, возникающие при коммутациях вакуумными выключателями трансформаторов, электродвигателей, конденсаторных батарей. В имитационной модели синхронного вакуумного выключателя учтены характеристики реальных вакуумных выключателей и предусмотрена возможность одновременной коммутации полюсов аппарата. Результаты, полученные по предложенным моделям, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках.

2. Алгоритмом управляемого отключения ненагруженного трансформатора является алгоритм *A-B-C*, в этом случае отключение двух первых фаз необходимо произвести при переходе токов в этих фазах через ноль, отключение оставшейся фазы выполнить после окончания переходных процессов в предшествующей фазе. Управляемое отключение позволяет исключить появление повторных зажиганий дуги и возникающие перенапряжения. Допустимый разброс времени размыкания контактов выключателя не должен превышать 0,8 мс при $k=50$ кВ/мс.

3. Алгоритмом управляемого включения трансформатора является алгоритм *CB-A*. В этом случае необходимо одновременно произвести коммутацию двух первых фаз в момент максимального линейного напряжения между фазами. Далее произвести коммутацию третьей фазы в момент максимального напряжения на этой фазе. Включение трансформатора при отсутствии остаточной намагниченности позволяет снизить броски тока до значений, не превышающих номинальный ток трансформатора с допустимым разбросом не более

1,2 мс. При наличии остаточной намагниченности удастся снизить броски тока до уровня, не превышающего $3 \cdot I_{\text{ном.т}}$ с допустимым разбросом не более 0,5 мс.

4. Алгоритмом управляемого отключения пускового тока электродвигателя является алгоритм *A-BC*. Отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль. Управляемое отключение позволяет исключить повторные зажигания дуги и условия появления виртуальных срезов тока и уменьшить возникающие перенапряжения до уровня $2,3 \cdot U_{\text{фм}}$. Допустимый разброс размыкания контактов выключателя определяется заданным временем начала размыкания контактов до перехода тока через ноль. В случае отключения пускового тока электродвигателя за 1,25 мс до перехода токов через ноль разброс размыкания каждого полюса выключателя должен составлять не более 2 мс.

5. Алгоритмом управляемого включения электродвигателя является алгоритм *C-B-A*. В этом случае включение первого полюса выключателя производится в момент перехода фазного напряжения через ноль, второго – в момент перехода линейного напряжения между этими фазами через ноль, третьего – в момент перехода фазного напряжения через ноль. Управляемое включение электродвигателя позволяет исключить появление предпробоев и возникающие перенапряжения. Допустимый разброс в работе каждого полюса выключателя при этом должен составлять не более 0,05 мс, что делает неосуществимым практическую реализацию управляемого включения электродвигателей без возникновения предпробоев в современных выключателях.

6. Отключение конденсаторной батареи современными вакуумными выключателями с высокими скоростями нарастания электрической прочности (от 20 кВ/мс) характеризуется низкой вероятностью возникновения повторных зажиганий дуги и высокочастотных перенапряжений. Для исключения вероятности появления повторных зажиганий отключение конденсаторной батареи должно проводиться по алгоритму *A-BC*: отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль. При этом разброс момента срабатывания каждого полюса выключателя составляет не более 2 мс.

7. Алгоритмом управляемого включения конденсаторной установки является алгоритм *CB-A*. В этом случае необходимо одновременно произвести включение двух фаз батареи в момент совпадения линейных напряжений между фазами на выключателе со стороны системы и нагрузки, далее произвести коммутацию третьей фазы в момент равенства соответствующих напряжений коммутируемой фазы на выключателе. Включение конденсаторной батареи с любым остаточным зарядом по алгоритму *CB-A* позволяет снизить броски тока до значений не более $3 \cdot I_{\text{ном.т}}$ с допустимым разбросом замыкания полюсов выключателя не более 0,6 мс. Использование алгоритмов управляемой коммутации в случае коммутации конденсаторных батарей позволяет выполнять повторное включение сразу после отключения без задержки времени для разряда конденсаторов. Это, в свою очередь, позволяет на основе управляемой коммутации реализовать быстродействующее устройство компенсации реактивной мощности.

8. Полученные при выполнении работы результаты используются научно-производственным предприятием ООО «КЭПС» (г. Новосибирск) при настройке системы управления синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000*.

9. Полученные при выполнении работы результаты используются АО «Региональные электрические сети» в филиале «Новосибирские городские электрические сети» для снижения бросков тока и перенапряжений при плановых коммутациях вакуумного выключателя, установленного в ячейке 13, РП-3.

10. Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в учебном процессе на факультете энергетики Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (в лекционных курсах, а также при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Системы электроснабжения», «Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения»).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Шевцов, Д. Е. Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений в электрических сетях 6 (10) кВ / А. А. Ачитаев, Д. А. Павлюченко, Е. В. Прохоренко, Д. Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 3. – С. 42–49.

2. Шевцов, Д. Е. Применение синхронного вакуумного выключателя для коммутации группы двигателей / А. А. Ачитаев, Д. А. Павлюченко, Е. В. Прохоренко, Д. Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 5. – С. 36–42.

3. Шевцов, Д. Е. Применение синхронного вакуумного выключателя в городских электрических сетях / А. А. Ачитаев, Д. А. Павлюченко, Е. В. Прохоренко, Д. Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 7. – С. 46–52.

4. Шевцов, Д. Е. Особенности управляемой коммутации при нормальных и аварийных режимах в электрических сетях среднего напряжения / Д. А. Павлюченко, Д. Е. Шевцов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 41–44.

5. Шевцов, Д. Е. Разработка имитационной модели синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ с учетом реальных характеристик аппарата / Д. Е. Шевцов, Д. А. Павлюченко, В. А. Лавринович, В. Г. Шальнев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2017. – № 1. – С. 38–44.

В прочих изданиях

6. Шевцов, Д. Е. Основные принципы синхронной коммутации электрических сетей среднего напряжения / Д. Е. Шевцов // Современные техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апр. 2014 г. В 3 т. – Томск : ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 55–56.

7. Шевцов, Д. Е. Опыт применения синхронного вакуумного выключателя в электрической сети среднего напряжения / Д. Е. Шевцов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 119–123.
8. Shevtsov, D. *The Basic Principles of Controlled Switching and Synchronous Vacuum Circuit Breaker Application in Local Distribution Networks* / D. Shevtsov, D. Pavluchenko, E. Prohorenko. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 743–748.
9. Шевцов, Д. Е. Исследование переходных процессов при управляемой коммутации электрической сети / Д. Е. Шевцов, К. Д. Немченко // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : Материалы трудов XXI всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2-4 декабря 2015 г. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. – Т. 1. – С. 161–164.
10. Шевцов, Д. Е. Управляемая коммутация токов короткого замыкания / Д. А. Павлюченко, Д. Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2016. – № 1. – С. 45–50.
11. Шевцов, Д. Е. Оценка коммутационного ресурса синхронного вакуумного выключателя / Д. А. Павлюченко, Е. В. Прохоренко, Д. Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2016. – № 2. – С. 34–41.
12. Шевцов, Д. Е. Модель синхронного выключателя 6 (10) кВ / Д. Е. Шевцов // Материалы 54-ой международной научной студенческой конференции (МНСК-2016): Энергетика, Новосибирск, 16-20 апреля 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 57.
13. Shevtsov, D. E. *Controlled Vacuum 6 (10) kV Circuit Breaker Model* / D. A. Pavlyuchenko, D. E. Shevtsov // *The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016), Russian, Novosibirsk, 1-3 July 2016*. – Russian : NSTU, 2016. – Vol. 2. – P. 177–182.
14. Шевцов, Д. Е. Управляемая коммутация силовых трансформаторов среднего напряжения / Д. Е. Шевцов, А. С. Киселев // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2016 г. – Тюмень: Изд-во «ТИУ», 2016. – Т. 2. – С. 427–430.
15. Шевцов, Д. Е. Исследование управляемой коммутации двигательной нагрузки / Д. Е. Шевцов, Д. А. Павлюченко, А. С. Киселев // Материалы Республиканской научно-практической конференции Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность, Таджикистан, Душанбе, 24 декабря 2016 г. – Душанбе: Изд-во «Промэкспо», 2016. – С. 43–46.