

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

Шевцов Дмитрий Евгеньевич

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук,  
доцент Павлюченко Д.А.

Новосибирск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) кВ .....	11
1.1 Постановка задачи.....	11
1.2 Общие сведения о переходных процессах .....	11
1.3 Современные тенденции применения выключателей 6 (10) кВ .....	14
1.4 Особенности переходных процессов при коммутациях вакуумными выключателями.....	19
1.5 Особенности переходных процессов при коммутациях реактивных элементов в электрических сетях 6 (10) кВ.....	23
1.6 Выводы.....	27
2 УПРАВЛЯЕМАЯ КОММУТАЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) кВ ..	29
2.1 Постановка задачи.....	29
2.2 Принципы управляемой коммутации .....	30
2.2.1 Управляемое отключение.....	31
2.2.2 Управляемое включение.....	33
2.2.3 Управляемое отключение токов короткого замыкания .....	34
2.2.4 Особенности управляемой коммутации в трехфазных электрических сетях.....	36
2.3 Особенности реализации управляемой коммутации.....	38
2.4 Устройства управляемой коммутации.....	39
2.5 Выводы.....	46
3 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6 (10) кВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ.....	48
3.1 Постановка задачи.....	48
3.2 Имитационная модель синхронного вакуумного выключателя .....	48
3.2.1 Характеристики вакуумных выключателей.....	48
3.2.2 Структура модели выключателя.....	53

3.2.3	<i>Модель синхронного вакуумного выключателя</i> .....	55
3.3	Имитационные модели элементов электрической сети 6 (10) кВ.....	59
3.3.1	<i>Модель трехфазного источника электропитания</i> .....	59
3.3.2	<i>Модель кабельной линии электропередачи</i> .....	61
3.3.3	<i>Модель силового трансформатора</i> .....	63
3.3.4	<i>Модель асинхронного двигателя</i> .....	70
3.3.5	<i>Модель конденсаторной батареи</i> .....	76
3.4	Апробация и верификация предложенных моделей .....	78
3.5	Выводы.....	86
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕУПРАВЛЯЕМОЙ И УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) кВ .....	87
4.1	Постановка задачи.....	87
4.2	Моделирование переходных процессов при коммутации трансформаторов и разработка оптимальных алгоритмов коммутации .....	88
4.2.1	<i>Отключение трансформаторов</i> .....	88
4.2.2	<i>Включение трансформаторов</i> .....	96
4.3	Моделирование переходных процессов при коммутации электродвигателей и разработка оптимальных алгоритмов коммутации.....	101
4.3.1	<i>Отключение электродвигателей</i> .....	101
4.3.2	<i>Включение электродвигателей</i> .....	108
4.4	Моделирование переходных процессов при коммутации конденсаторных батареи и разработка оптимальных алгоритмов коммутации.....	110
4.4.1	<i>Отключение конденсаторных батарей</i> .....	110
4.4.2	<i>Включение конденсаторных батарей</i> .....	112
4.5	Определение области эффективного применения устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ .....	117
4.6	Выводы.....	121
5	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ .....	126

5.1 Постановка задачи.....	126
5.2 Опытнo-промышленная эксплуатация.....	126
5.3 Выводы.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148
Приложение А .....	149
Приложение Б .....	150
Приложение В.....	151

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы**

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 [1 - 4].

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 [4 - 14], 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 [15 - 22], которые зачастую приводят к повышенным электродинамическим усилиям на токоведущие элементы.

Для снижения негативного воздействия переходных процессов традиционно применяются специальные средства ограничения. Например, в [23] рекомендуется в случаях возникновения опасных коммутационных перенапряжений использовать нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), *RC*-цепи и устройства управляемой коммутации.

Широкое распространение получили устройства ОПН и *RC*-цепи [24 - 32]. 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 [14 - 16, 33]. 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**

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*, рабочей группы *WG 13.07 (A3.07) CIGRE «Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers»* и других. Несмотря на проведенные исследования [33 - 48] и наличие аппаратов реализующих функцию управляемого включения или отключения [49 - 56], 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 [35, 39].

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 работы:**

Повышение эффективности функционирования электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения за счет управляемой коммутации вакуумными выключателями реактивных нагрузок.

**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 них;

- алгоритмы управляемой коммутации, позволяющие исключить возникновение повторных зажигания 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**

Автором работы выполнен аналитический обзор по тематике диссертационной работы, разработана имитационные модели для исследования



переходных процессов при коммутации электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения, проведено исследование переходных процессов при коммутации различных реактивных нагрузок, выполнен анализ полученных результатов и их сравнение 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. Исследования основывались 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 них;

- 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 разделов, заключения и приложений. Основной текст работы изложен на 147 страницах и включает 59 рисунков, 6 таблиц, список литературы, состоящий из 112 наименований.

# 1 ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) КВ

## 1.1 Постановка задачи

Коммутации в электрических сетях сопровождаются переходными процессами, которые обусловлены перераспределением энергии между индуктивными и емкостными элементами электрической сети. При этом могут возникать значительные уровни коммутационных перенапряжений и бросков тока, негативно сказывающихся на сроке службы электрооборудования.

В настоящее время в электрических сетях 6 (10) кВ активно внедряются вакуумные коммутационные аппараты благодаря наличию у них ряда преимуществ по сравнению с другими видами выключателей. Однако использование современных вакуумных выключателей не решает проблему перенапряжений, а порой и усугубляет ее, так как коммутации такими выключателями могут сопровождаться многократными повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями.

## 1.2 Общие сведения о переходных процессах

При анализе процессов проходящих в электрических цепях выделяют два основных режима работы: установившийся и переходный. В соответствии с [57] установившийся режим характеризуется постоянными или периодически повторяющимися мгновенными значениями токов и напряжений в цепи. В реальных электрических сетях параметры режима непостоянны. Эти изменения, происходящие около некоторого среднего значения, могут быть настолько малыми, что режим допустимо считать установившимся [58].

Под переходным процессом (или переходным режимом) понимают процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, чем-либо отличающимся от предыдущего [57, 59]. Переходные

процессы возникают при любых изменениях режима работы электрической цепи: включение или отключение (коммутация) элементов цепи, изменение нагрузки, возникновение аварийных режимов (короткое замыкание, обрыв провода и так далее). Переходные процессы в реальных электрических сетях являются быстропротекающими. Их продолжительность составляет доли секунды. Сравнительно редко длительность этих процессов достигает единицы секунды.

В ряде случаев возникновение переходных процессов нежелательно и опасно. Возникающие при этом перенапряжения и броски тока могут значительно превышать уровни напряжений и токов установившегося режима. Основной причиной возникновения переходных процессов являются элементы электрических цепей, способные запасать энергию: индуктивность и емкость.

Переходные режимы представляют собой процессы перехода энергетического состояния цепи от докоммутационного к послекоммутационному режиму. Каждому установившемуся состоянию цепи, имеющей реактивные элементы, соответствует определенный запас энергии электрического и магнитного полей. Переход к новому установившемуся режиму связан с нарастанием или убыванием энергии этих полей и сопровождается возникновением переходного процесса, который заканчивается, как только прекращается изменение запаса энергии. Если при коммутации энергетическое состояние цепи не изменяется, то переходные процессы не возникают.

Количество энергии, накапливаемой в магнитном поле катушки с индуктивностью  $L$ , в которой протекает ток  $i_L$ , выражается формулой:

$$W_L = 1/2 \cdot (L \cdot i_L^2). \quad (1.1)$$

Энергия, накапливаемая в электрическом поле конденсатора емкостью  $C$ , заряженного до напряжения  $u_C$ , равна:

$$W_C = 1/2 \cdot (C \cdot u_C^2). \quad (1.2)$$

Поскольку запас магнитной энергии  $W_L$  определяется током в катушке  $i_L$ , а электрической энергии  $W_C$  – напряжением на конденсаторе  $u_C$ , то при любых коммутациях соблюдаются два основных положения: ток катушки и напряжение на конденсаторе не могут изменяться скачком [60]. В обобщенном виде данные

положения формируются следующим образом: потокосцепление катушки и заряд конденсатора могут изменяться только плавно, без скачков.

Таким образом, коммутации в электрических сетях приводят к возникновению переходного процесса, который сопровождается обменом и перераспределением энергии между электрическим и магнитным полями, причем наиболее интенсивно протекает обмен между реактивными сопротивлениями элементов сети, находящимися в непосредственной близости от места возмущения. Как правило, процесс имеет колебательный характер с частотой, превышающей промышленную, и может сопровождаться повышениями напряжения, опасными для изоляции оборудования, и бросками тока, увеличивающими электродинамические усилия на токоведущие элементы [5].

Под перенапряжениями понимается всякое превышение мгновенным значением напряжения амплитуды наибольшего рабочего напряжения [24]. Одной из важных характеристик перенапряжений на изоляции является их кратность – отношение максимального значения напряжения  $U_{max}$  к амплитуде наибольшего рабочего напряжения на данной изоляционной конструкции  $\sqrt{2}U_{нр}$  (рисунок 1.1):

$$K = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}U_{нр}}. \quad (1.3)$$

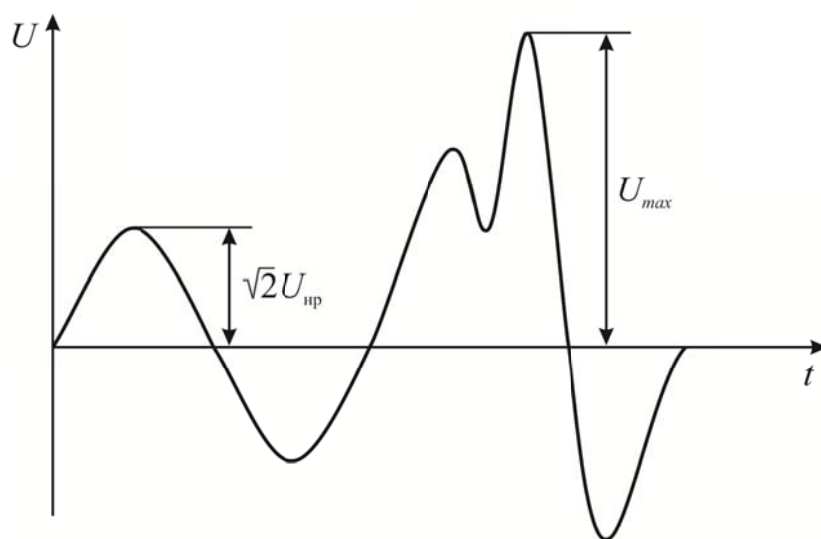


Рисунок 1.1 – Перенапряжения при коммутации в электрической сети

Обычно перенапряжения высокой кратности, возникающие при коммутации электрической сети, приводят к повреждению изоляции оборудования. Однако следует отметить, что перенапряжения небольшой кратности также оказывают негативное влияние на изоляцию путем многократного воздействия на нее. Это приводит к существенному снижению электрической прочности изоляции и повышает вероятность ее повреждения при последующих воздействиях перенапряжений [61].

Значительные амплитуды бросков тока, которые могут возникать при включении реактивных элементов электрической сети (трансформатор, конденсаторная батарея), вызывают повышенные электродинамические усилия на токоведущие элементы, что приводит к уменьшению ресурса оборудования, и требуют загробления релейной защиты, что ведет к снижению коэффициента чувствительности срабатывания защиты [14, 18].

### **1.3 Современные тенденции применения выключателей 6 (10) кВ**

Выключатель – коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения элементов электрических сетей. Основной особенностью выключателей является то, что они должны надежно выполнять свои функции – производить коммутационные операции в любых режимах работы, включая аварийные ситуации. Обеспечение надежной работы электрических сетей в значительной степени определяется безотказной работой выключателей.

В настоящее время в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения применяются выключатели следующих видов: маломасляные, вакуумные, элегазовые. Причем в мире отчетливо видна тенденция увеличения доли вакуумных выключателей в сетях среднего напряжения, о чем свидетельствует рисунок 1.2 [2]. В Европе и США доля вакуумных выключателей в общем количестве выпускаемых аппаратов составляет 70%, а в Японии она равна 100%. В России в последние годы эта доля постоянно растет и в настоящее время составляет около 50% [4].

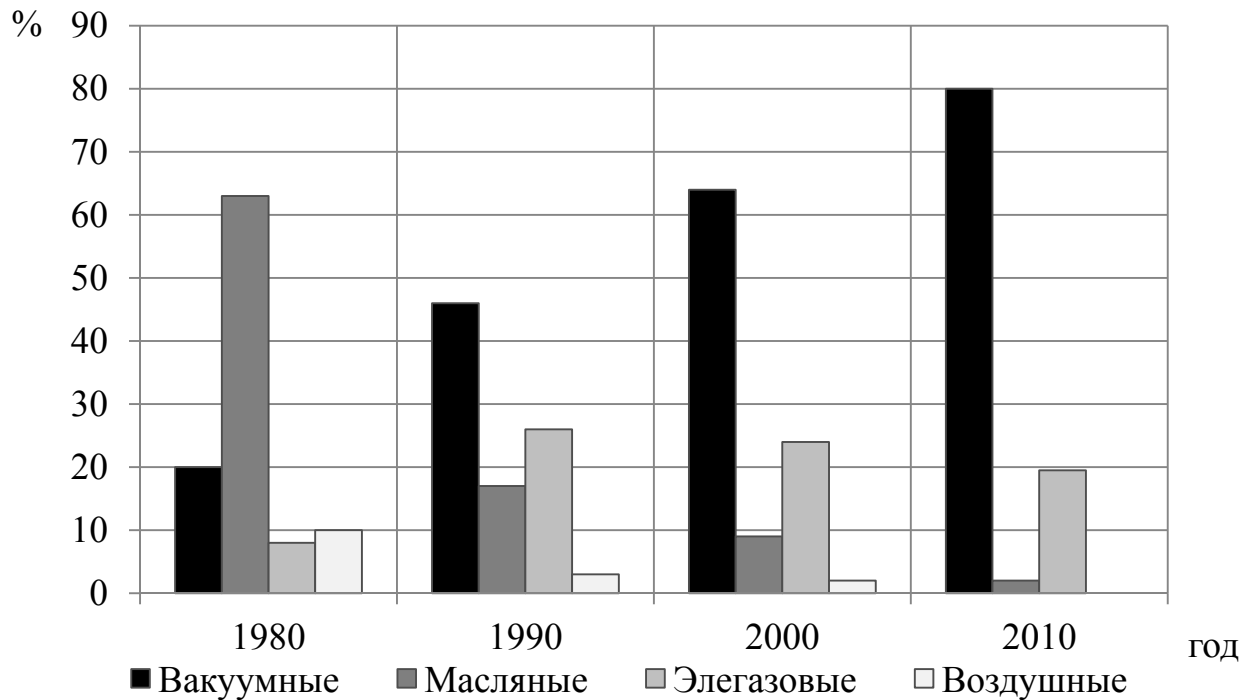


Рисунок 1.2 – Применение выключателей 6-35 кВ в мире

Активное применение вакуумных коммутационных аппаратов в электрических сетях 6 (10) кВ связано с присущими им преимуществами по сравнению с другими видами выключателей. К современным выключателям 6 (10) кВ предъявляются нижеперечисленные требования, выполнение которых демонстрирует преимущества и недостатки разных типов аппаратов.

1. *Высокая надежность.* В таблице 1.1 [3, 62] представлены параметры потока отказов выключателей 6 (10) кВ, из которой следует, что наиболее надежным оборудованием являются вакуумные и элегазовые выключатели.

Таблица 1.1 – Параметры потока отказов выключателей 6 (10) кВ

Тип выключателя	Параметр потока отказов, 1/год
Элегазовый	0,003
Электромагнитный	0,022
Вакуумный	0,004
Маломасляный	0,009

При прочих равных условиях, то есть, если принять, что частота отказов и время восстановления после аварии равны для вакуумных и маломасляных выключателей, то частота и длительность ремонта последних безусловно выше.

*2. Низкие массогабаритные характеристики и материалоемкость аппаратов.* Электрическая прочность изоляционного межконтактного промежутка в вакууме значительно выше и длина дуги меньше, чем в других типах выключателей. Это позволяет существенно снизить габариты дугогасительной камеры вакуумного выключателя [3].

*3. Высокий механический ресурс.* Высокий механический ресурс вакуумных выключателей обусловлен в первую очередь малым ходом контактов, который составляет от 6 до 10 мм на напряжение 6 (10) кВ [1]. Для масляных и электромагнитных выключателей ход контактов достигает 100-200 мм, что требует применения более сложной конструкции привода и больших затрат энергии на включение и отключение выключателя. Также большой ход контактов приводит к необходимости постоянного ухода и проверок состояния деталей привода, что повышает эксплуатационные расходы на содержание выключателя.

*4. Низкие эксплуатационные затраты, создание практически необслуживаемого в течение всего срока службы оборудования.* В таблице 1.2 представлена сравнительная оценка основных эксплуатационных параметров базовых типов выключателей. Сравнение проводилось для выключателей с одинаковыми техническими характеристиками (номинальное напряжение, ток и так далее).

Существенным экономическим недостатком элегазовых выключателей является их высокая стоимость. Стоимостной фактор можно, на первый взгляд, отнести к достоинствам маломасляных выключателей. Однако наиболее значительные затраты на обслуживание и ремонты данных аппаратов исключают это преимущество (таблица 1.3) [3].



Таблица 1.2 – Сравнение основных эксплуатационных параметров выключателей  
6 (10) кВ

	Элегазовый выключатель	Маломасляный выключатель	Вакуумный выключатель
Номинальное напряжение, кВ	6	6	6
Номинальный ток, А	1000	1000	1000
Номинальный ток отключения, кА	20	20	20
Коммутационный ресурс	10 000	3 000	50 000
Срок службы, лет	25	20	25
Масса, кг	130	150	50
Цена, о.е.	1,7	0,8	1

Таблица 1.3 – Обслуживание и ремонт высоковольтных выключателей

Операции технического обслуживания и ремонта	Тип выключателя	
	Маломасляный	Вакуумный
Замена или пополнение дугогасящей среды	После 10 операций «0» тока 20 кА – замена масла	Не требуется
Техническое обслуживание	После 2000 циклов операций «ВО» – техническое обслуживание привода или техническое обслуживание не менее 2 раз в год	Техническое обслуживание – через 2 года после установки выключателя; техническое обслуживание – до истечения гарантийного срока – 7 лет; далее техническое обслуживание – раз в 5 лет
Текущий ремонт	1 раз в год	Не требуется
Средний ремонт	Не реже 1 раза в 4 года	Не требуется
Капитальный ремонт	После 3000 операций «ВО»	Не требуется

Как видно, при примерном соответствии срока службы коммутационный ресурс вакуумных выключателей в 5 раз больше элегазовых и почти в 17 раз больше чем у маломасляных выключателей.

Вакуумные выключатели являются практически необслуживаемыми. Осмотр и периодические проверки вакуумных аппаратов рекомендуется проводить один раз в 3 – 5 лет. Во время этих проверок необходимо провести высоковольтные испытания вакуумной дугогасительной камеры и изоляции выключателя, а также проверить переходное сопротивление контактов.

Низкие эксплуатационные затраты определяются отсутствием необходимости содержания масляного и компрессорного хозяйств, кроме того вакуумная дугогасительная камера не требует пополнения дугогасящей среды. Высокая коммутационная износостойкость позволяет значительно сократить расходы по обслуживанию вакуумных выключателей, а также перерывы в электроснабжении, связанные с выполнением регламентных работ [63].

*5. Высокие требования по экологичности оборудования.* В последние годы опасение вызывает возможная экологическая опасность элегаза ( $SF_6$ ). Нормальная работа коммутационного элегазового аппарата приводит к образованию газообразных низших фторидов серы и твердых продуктов, выделяющихся в виде пыли. Твердые продукты, представляющие собой фтористые и сернистые соли металлов, входящие в состав материалов дугогасительных контактов, представляют опасность как мелкодисперсные материалы и как материалы, содержащие в адсорбированном состоянии газообразные токсичные компоненты.

Контакт с элегазом и продуктами его разложения может возникнуть при заполнении оборудования, его обслуживании, при плановом или аварийном ремонте оборудования, при ликвидации оборудования, а также в случае аварийного выброса продуктов разложения в рабочее помещение. Особую опасность представляет элегаз, загрязненный продуктами разложения [64].

*6. Широкий температурный диапазон работы выключателей.* Отключающая способность элегазового аппарата значительно зависит от температуры окружающей среды. Рабочий диапазон аппаратов  $SF_6$  от  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для работы в температурных условиях от  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  однозначно рекомендуются вакуумные выключатели [63].

7. *Низкое энергопотребление привода аппарата.* Малый ход и скорость контактов вакуумных выключателей позволяет применять легкие, небольшие пружинные или электромагнитные приводы.

Вакуумные выключатели в настоящее время являются приоритетно рекомендуемым коммутационным оборудованием для использования в электрических сетях 6 (10) кВ. Однако вместе с положительными эксплуатационными свойствами вакуумных выключателей наблюдаются и отрицательные: при коммутации такими выключателями могут возникать многочисленные повторные зажигания дуги между контактами аппарата и их сопровождающие высокочастотные перенапряжения [1, 6, 27 - 29].

#### **1.4 Особенности переходных процессов при коммутациях вакуумными выключателями**

Вакуумные коммутационные устройства способны вызывать значительные перенапряжения при отключении индуктивных нагрузок (ненагруженные трансформаторы, электродвигатели в режиме пуска). В силу особых свойств вакуума эти перенапряжения по своему характеру могут отличаться от перенапряжений, создаваемых в тех же условиях коммутационными аппаратами, в которых используется другая дугогасительная среда (воздух, элегаз или масло). При коммутации электрической сети вакуумными выключателями возникают следующие явления: срез тока при отключении, предварительные пробои при включении, повторные зажигания дуги при отключении и виртуальный срез тока. Кроме того на величину перенапряжений и бросков тока оказывает влияние неодновременность срабатывания полюсов аппарата.

*Срез тока при отключении* представляет собой наиболее известное и наиболее распространенное явление, которое встречается во всех типах выключателей. Под срезом тока понимается преждевременное прерывание переменного тока перед его естественным переходом через нулевое значение [7, 65].

Механизм развития перенапряжений от среза тока заключается в следующем. При протекании тока в индуктивной нагрузке образуется запас электромагнитной энергии. Разрыв контура, содержащего индуктивность, при значении тока, отличного от нулевого значения, сопровождается преобразованием этой энергии в другие виды энергии, в частности, энергию электрического поля. В результате происходит повышение напряжения со стороны нагрузки, характерный процесс изменения которого представлен на рисунке 1.3.

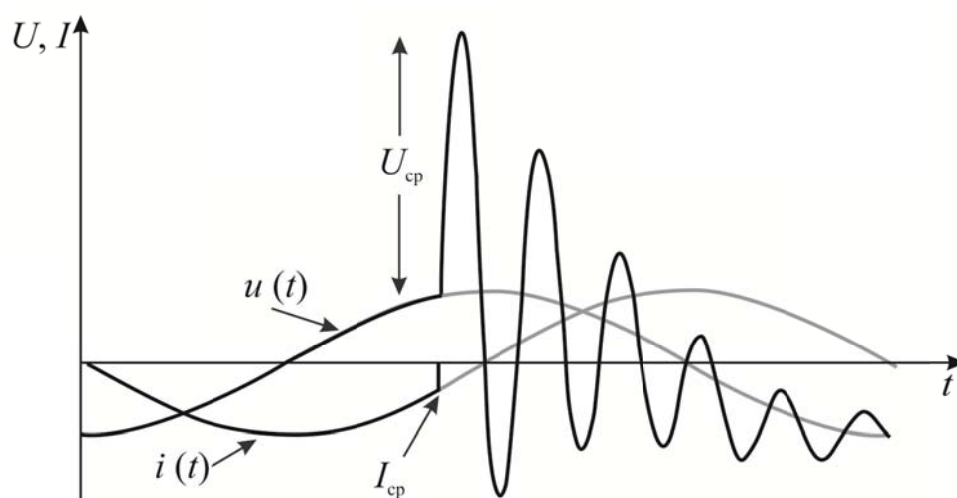


Рисунок 1.3 – Коммутационные перенапряжения, вызванные срезом тока:

$U_{ср}$  – перенапряжение, вызванное срезом тока;  $I_{ср}$  – срез тока

При отключении переменного тока вакуумными выключателями, если момент начала разведения контактов не совпадает с нулем тока промышленной частоты, между контактами выключателя зажигается дуга. Дуга горит в парах металла контактов. Концентрация паров металла случайна и снижается при подходе тока к нулевому значению. Незадолго до достижения нуля тока, концентрация пара становится недостаточной для поддержания горения дуги и дуга гаснет. Этот процесс зависит, в основном, от природы контактного материала. Таким образом, срез тока в вакуумных выключателях представляет собой практически мгновенный ( $10^{-7} - 10^{-8}$  с [65]) обрыв малого тока до перехода

через нулевое значение, происходящий из-за внутренней неустойчивости вакуумной дуги.

Такое поведение вакуумного выключателя позволяет рассматривать его как идеальный ключ, мгновенно переходящий из проводящего состояния в непроводящее.

*Предварительные пробои при включении и повторные зажигания дуги при отключении* представляют собой процесс зажигания электрической дуги между контактами выключателя в случае, когда приложенное напряжение превышает электрическую прочность межконтактного промежутка (рисунок 1.4) [7].

Таким образом, предварительные пробои при включении происходят систематически в конце процесса включения. Время возникновения предварительных пробоев зависит от скорости сближения контактов и величины напряжения, приложенного в момент сближения контактов. Повторные зажигания дуги при отключении возникают в начале процесса отключения только тогда, когда время горения дуги мало. В этом случае промежуток между контактами выключателя недостаточный для того, чтобы выдержать восстанавливающееся напряжение, и происходит повторный пробой диэлектрика.

При предварительном пробое или повторном зажигании дуги колебательный разряд сосредоточенных емкостей вызывает ток высокой частоты ( $10^4 - 10^5$  Гц [65]), проходящий между контактами выключателя, с наложением на ток промышленной частоты (рисунок 1.4). Эти явления неизбежны и характерны для всех типов выключателей. Особенностью вакуумных выключателей является их наиболее высокая дугогасящая способность и возможность отключать высокочастотные токи, имеющие очень высокую скорость перехода через ноль. Вследствие этого вакуумные коммутационные аппараты дают большее число зажиганий электрической дуги по сравнению с другими типами выключателей.

Многократные зажигания электрической дуги в зависимости от расстояния между контактами изменяются следующим образом:

- при включении амплитуда перенапряжений уменьшается до смыкания контактов;

- при отключении амплитуда перенапряжений возрастает (эскалация напряжения) до тех пор, пока электрическая прочность между контактами выключателя не станет достаточной, чтобы выдерживать восстанавливающееся напряжение.

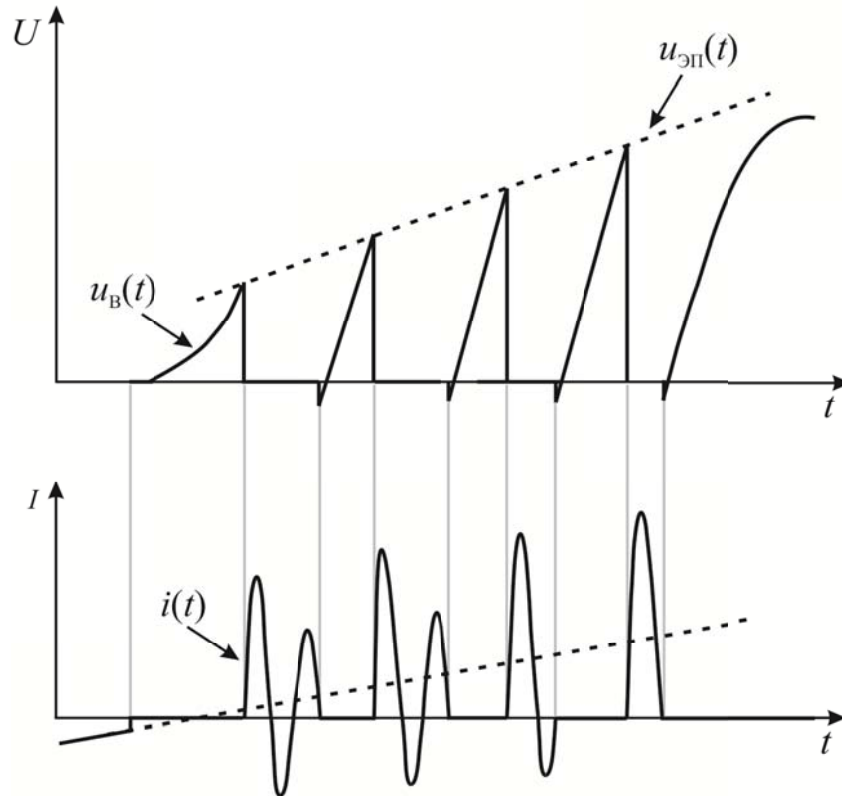


Рисунок 1.4 – Процесс зажигания электрической дуги между контактами выключателя:  $u_B(t)$  – восстанавливающееся напряжение между контактами;  $u_{ЭП}(t)$  – электрическая прочность межконтактного промежутка;  $i(t)$  – высокочастотный ток в электрической дуге

Явления многократных зажигания электрической дуги сопровождаются перенапряжениями с крутым фронтом, что представляет опасность, прежде всего для витковой изоляции электрооборудования.

*Виртуальный срез тока* может возникать в особых конфигурациях электрических сетей, характеризующихся сильными емкостно-индуктивными связями между фазами. Суть явления состоит в следующем. При отключении электрической сети повторные зажигания дуги в первом гасящем полюсе

вакуумного выключателя вызывают заметные колебания высокочастотного тока не только в данной фазе, но также и в соседних фазах, по которым в этот момент времени может проходить ток довольно высокой величины. Если индуктивный высокочастотный ток в соседней фазе достигнет амплитуды того же порядка, что и ток промышленной частоты, то возникнет ноль тока («искусственный», но реальный, а не виртуальный). Выключатель в этот момент времени может отключить ток до его прохождения через естественный ноль. В подобных случаях значение тока обрыва вычисляется в десятках, даже в сотнях ампер, а связанные с током перенапряжения имеют очень высокую кратность [7, 65].

Оптимальным решением вопроса снижения перенапряжений в данном случае является сдвиг момента времени отключения одного из полюсов выключателя таким образом, чтобы в течение временного интервала, когда могут происходить многократные повторные зажигания дуги, две другие фазы оставались еще включенными и, соответственно, нечувствительными к наведенным помехам.

*Неодновременность срабатывания полюсов аппарата* в процессе коммутации вызывает кратковременный неполнофазный режим, во время которого могут происходить перенапряжения высокой кратности. С увеличением неодновременности замыкания контактов перенапряжения увеличиваются [7]. Напротив, коммутация каждой отдельной фазы выключателя в заранее определенный момент времени позволяет значительно снизить кратность перенапряжений и амплитуду бросков тока [34, 35, 66].

## **1.5 Особенности переходных процессов при коммутациях реактивных элементов в электрических сетях 6 (10) кВ**

Электрические сети 6 (10) кВ отличаются от сетей более высоких классов напряжения большим разнообразием используемого электрооборудования. Наиболее опасные переходные процессы возникают при коммутации такого

оборудования как трансформатор, электродвигатель, конденсаторная батарея [4, 9, 17, 25, 26, 29, 65].

### *1. Отключение трансформатора*

Наибольшие уровни коммутационных перенапряжений зарегистрированы при отключении ненагруженных трансформаторов среднего напряжения, которые составляют  $(4 - 6) \cdot U_{\text{фм}}$ , где  $U_{\text{фм}}$  – амплитудное фазное напряжение [25, 29, 65]. В основном эти данные относятся к воздушным и масляным выключателям.

Отключение вакуумными выключателями установившегося тока холостого хода трансформаторов в электрических сетях 6 (10) кВ характеризуется более низкими кратностями перенапряжений [29]. Однако в [8, 9, 39] отмечается возможность инициирования высокочастотных перенапряжений вакуумными аппаратами, что пагубно сказывается на межвитковой изоляции трансформаторов.

Отключение ненагруженного трансформатора сразу после его включения, когда ток намагничивания не достиг установившегося значения, может создать значительные перенапряжения. При такой коммутации перенапряжения определяются параметрами сети и значением среза тока выключателя [8, 9, 29].

### *2. Включение трансформатора*

При включении ненагруженных трансформаторов любыми типами выключателей могут возникать броски токов намагничивания, превышающие по величине в 6 – 10 раз номинальные токи трансформатора. Кроме значительной амплитуды, токи намагничивания характеризуются достаточно длительным протеканием [17, 18].

Броски тока намагничивания оказывают значительные электродинамические усилия на токоведущие элементы и обмотки трансформатора, что приводит к снижению ресурса силовых трансформаторов [35, 18]. Особенно негативно это воздействие сказывается на печных трансформаторах [19], где броски тока могут быть больше токов короткого замыкания, а также на воздушных трансформаторах, обмотки которых могут быть повреждены при их смещениях. Наличие бросков тока намагничивания негативно сказывается и на измерительных устройствах, в случае их выбора без



соответствующего коэффициента запаса. Также токи намагничивания имеют сложный гармонический состав, что в свою очередь может негативно влиять на работу узла нагрузки и на питающую сеть в целом [20].

Основными причинами возникновения бросков тока при включении трансформатора являются неудачный момент времени коммутации и наличие остаточного магнитного потока [21].

### *3. Отключение электродвигателя*

Перенапряжения при отключении асинхронных электродвигателей связаны с особенностями работы дугогасительных камер выключателей (величина среза тока, наличие повторных зажигания дуги в межконтактном промежутке) и режимом работы двигателя в момент времени, предшествующий коммутации (вращающийся на холостом ходу или с номинальной нагрузкой, практически неподвижный при пуске, после отключения короткого замыкания или при перегрузке).

При отключении от электрической сети вращающегося электродвигателя магнитный поток, связывающий обмотки статора и ротора, в первый момент остается неизменным и затухает постепенно. Поэтому, а также вследствие механической инерции ротора, некоторое время после отключения от сети на зажимах двигателя поддерживается номинальное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц.

В дальнейшем величина и частота этого напряжения уменьшаются по мере затухания потока в роторе и снижения его оборотов. Одновременно спадает энергия, заключенная в полях рассеяния статора. Это происходит в форме высокочастотных колебаний в цепи из емкости линии и индуктивности рассеяния обмотки статора. Наложение этих двух процессов дает результирующее напряжение на зажимах двигателя.

Отключение вращающегося электродвигателя на холостом ходу вакуумным выключателем с низким срезом тока (до 5 А) дает обычно перенапряжения не более  $2 \cdot U_{\phi m}$  при срабатывании выключателя без повторных зажигания дуги [10, 31]. В случае возникновения повторных зажигания дуги перенапряжения могут

достигать значений  $2,7 \cdot U_{\text{фm}}$  и выше (по имеющимся экспериментальным данным максимальные кратности перенапряжений ограничивались) [31]. При отключении нагруженного электродвигателя перенапряжения примерно такие же, как и при холостом ходе [29].

Отключение практически неподвижного электродвигателя при пуске приводит к значительным перенапряжениям. В особо неблагоприятных условиях (при возникновении виртуальных срезов тока) были отмечены перенапряжения до  $5 \cdot U_{\text{фm}}$  и более [6, 11, 13, 24, 29, 67 - 69]. В работах [4, 31] отмечается, что при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя перенапряжения достигали уровня  $3 \cdot U_{\text{фm}}$ , при котором срабатывал ограничитель перенапряжения, что и прекращало дальнейшую эскалацию.

#### *4. Включение электродвигателя*

При включении электродвигателей значительную роль в возникновении перенапряжений оказывает коммутационный аппарат. Разброс в действии отдельных полюсов выключателя, низкая скорость сближения контактов и их дребезг могут способствовать длительному существованию повторных пробоев и появлению высокочастотных перенапряжений, представляющих опасность главным образом для витковой изоляции электродвигателей [6, 4, 31, 70].

Наиболее высокие уровни перенапряжений возникают при включении второй и третьей фазы электродвигателя, что связано с наличием начального потенциала на емкостях рассматриваемых фаз. Теоретически максимальная кратность перенапряжений при включении с разбросом полюсов составляет около  $3 \cdot U_{\text{фm}}$  [6]. Экспериментальные исследования, представленные в работах [6, 4, 31], показывают перенапряжения до  $2,7 \cdot U_{\text{фm}}$ .

Также на уровень перенапряжений существенное влияние оказывают длина питающего кабеля и мощность двигателя. С ростом длины кабеля и мощности электродвигателя кратность перенапряжений снижается.

#### *5. Отключение конденсаторной батареи*

Отключение конденсаторных батарей без возникновения повторных пробоев в выключателе не создает высоких уровней перенапряжений [14, 71].

Вероятность появления повторного пробоя в процессе отключения конденсаторной батареи по оценке [15] наиболее велика при использовании масляных выключателей. Для вакуумных выключателей вероятность возникновения повторного зажигания дуги наиболее низкая, что объясняется быстрым ростом диэлектрической прочности при расхождении контактов [1].

#### *6. Включение конденсаторной батареи*

Включение значительной емкости в электрическую сеть в первый момент времени, исходя из законов коммутации, означает короткое замыкание. Следствием этого являются значительные переходные токи включения [72].

При включении высоковольтной конденсаторной батареи бросок тока может достигать значения в 5 – 30 раз больше номинального тока батареи [14, 15, 22]. Включение конденсаторной батареи на уже включенную при отсутствии токоограничивающих устройств сопровождается еще большим переходным током. Перенапряжения при этом не превосходят  $2 \cdot U_{фм}$ . Наличие остаточного заряда на конденсаторе в момент включения способствует увеличению бросков тока и перенапряжений.

### **1.6 Выводы**

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в литературном обзоре, позволяет сделать следующие выводы.

1. Коммутации в электрических сетях приводят к возникновению переходного процесса, который может сопровождаться значительными перенапряжениями и бросками тока, что приводит к уменьшению ресурса электрооборудования.

2. В качестве коммутационных аппаратов в электрических сетях 6 (10) кВ активно применяются вакуумные выключатели, так как они обладают преимуществами по сравнению с другими типами выключателей. Однако коммутации вакуумными выключателями индуктивных элементов электрической

сети сопровождаются повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями.

3. При коммутации электрической сети вакуумными выключателями возникают явления, оказывающие влияние на величину перенапряжения, такие как срез тока при отключении, предварительные пробои при включении, повторные зажигания дуги при отключении и виртуальный срез тока. Кроме того на величине перенапряжения и броска тока сказывается неодновременность срабатывания полюсов аппарата.

4. Наибольшие кратности перенапряжений возникают при коммутации вакуумными выключателями ненагруженных трансформаторов и электродвигателей в режиме пуска. По имеющимся данным перенапряжения могут достигать величины  $5 \cdot U_{фm}$  и более.

5. Значительные амплитуды бросков тока возникают при включении таких элементов электрической сети, как трансформатор и конденсаторная батарея. При включении трансформатора переходной ток достигает величины  $10 \cdot I_{ном.m}$  и характеризуется большой продолжительностью затухания. Включение конденсаторной батареи может сопровождаться броском тока амплитудой до  $30 \cdot I_{ном.m}$ .

## 2 УПРАВЛЯЕМАЯ КОММУТАЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) КВ

### 2.1 Постановка задачи

Коммутация реактивных элементов электрической сети в произвольные моменты времени может приводить к появлению высоких переходных напряжений или токов. Переходные процессы сопровождаются электрическими и механическими нагрузками на электрооборудование и способны вызвать его постепенное или мгновенное повреждение. Снижение негативных воздействий переходных процессов связано с применением специальных средств ограничения. Стандарт организации «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору» [23] рекомендует в случаях возникновения опасных уровней коммутационных перенапряжений использовать ОПН, *RC*-цепи и устройства управляемой коммутации.

Широкое распространение получили устройства ОПН и *RC*-цепи. Однако существуют определенные ограничения в применении названных устройств. В некоторых случаях при возникновении высокочастотных переходных процессов ОПН не позволяют снизить перенапряжения до безопасного для современного электрооборудования уровня, так как не влияют на частоту воздействующего напряжения, а только снижают амплитуду перенапряжений. Применение *RC*-цепей позволяет эффективно снижать перенапряжения за счет сглаживания частоты воздействующего напряжения. В тоже время их использование может приводить к повышению токов однофазного замыкания на землю. Стоимость *RC*-цепей намного выше стоимости ОПН [24 - 32].

Для ограничения амплитуды переходных токов при коммутации обычно используют постоянно включенные реакторы или предвключаемые резисторы. Однако применение указанных решений в большинстве случаев оказывается неэффективным или экономически не выгодным. Кроме того использование предвключаемых резисторов требует дополнительных коммутационных аппаратов, что снижает надежность системы электроснабжения в целом [14 -16, 33].

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 уровня коммутационных перенапряжений и амплитуды бросков тока является использование управляемой (или синхронной) коммутации. Суть такой коммутации заключается во включении и отключении электрической сети в строго определенные моменты времени [44].

## **2.2 Принципы управляемой коммутации**

Управляемая (или синхронная) коммутация – это 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 [41 - 43, 73]. Коммутационный аппарат, реализующий принципы управляемой коммутации (далее – синхронный выключатель), представляет собой аппарат, контакты которого размыкаются в заданную фазу тока и (или) замыкаются в заданную фазу напряжения [49, 74].

Использование управляемой коммутации реактивных элементов в электрических сетях предотвращает появление бросков тока и перенапряжений, увеличивает коммутационный ресурс выключателей. В нормальных режимах управляемое включение выключателя на реактивную нагрузку позволяет существенно уменьшить броски тока, а при управляемом отключении снизить вероятность повторных пробоев и, как следствие, возникновение перенапряжений. Также управляемая коммутация токов нормального режима позволяют улучшить характеристики выключателя: повысить его ресурс (что особенно важно при работе выключателя в режиме частых коммутаций), увеличить номинальное напряжение за счет сокращения коммутационных перенапряжений [37 - 44, 73].

В аварийных режимах управляемое отключение токов короткого замыкания дает возможность сократить время горения дуги до минимальных значений. При отключении минимальное время горения дуги определяется из условия, что за это время контакты должны разойтись на расстояние, достаточное для успешного гашения дуги при первом переходе тока через ноль. Поэтому управляемое отключение токов короткого замыкания является средством, обеспечивающим уменьшение электрической эрозии частей дугогасительного устройства и повышение ресурса выключателя [36, 49, 73, 75].

### 2.2.1 Управляемое отключение

Управляемое отключение осуществляется путем размыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода отключаемого тока через ноль. Время горения дуги в этом случае значительно сокращается, так как количество энергии, выделяющейся в дуге, уменьшается. Управление моментом размыкания контактов предотвращает отказы работы выключателей и снижает воздействие в целом на систему электроснабжения.

В синхронном выключателе необходимо очень точно подать сигнал на размыкание и создать очень большую скорость движения контактов, чтобы к моменту погасания электрической дуги расстояние между контактами было достаточным для обеспечения необходимой электрической прочности промежутка и исключения возможности повторного зажигания дуги. Точность подачи импульса на отключение определяется синхронизирующим устройством, а большая скорость движения контактов создается специальным приводом.

На рисунке 2.1 представлен принцип управляемого отключения [75 - 80]. На синхронизирующее устройство в случайный момент времени  $t_{command}$  подается команда на отключение выключателя. Эта команда задерживается контроллером на некоторый промежуток времени  $T_{total}$ . Интервал времени  $T_{total}$  в соответствии с выражением (2.1) представляет собой сумму времени реакции контроллера  $T_{resp}$  и

преднамеренной задержки времени синхронизации  $T_{sync}$ . Интервал времени  $T_{sync}$  рассчитывается по (2.2) относительно определенного момента перехода тока через ноль и зависит от собственного времени отключения выключателя  $T_{opening}$  и времени расхождения контактов на определенное расстояние, достаточное для обеспечения необходимой электрической прочности промежутка  $t_{separate}$ .

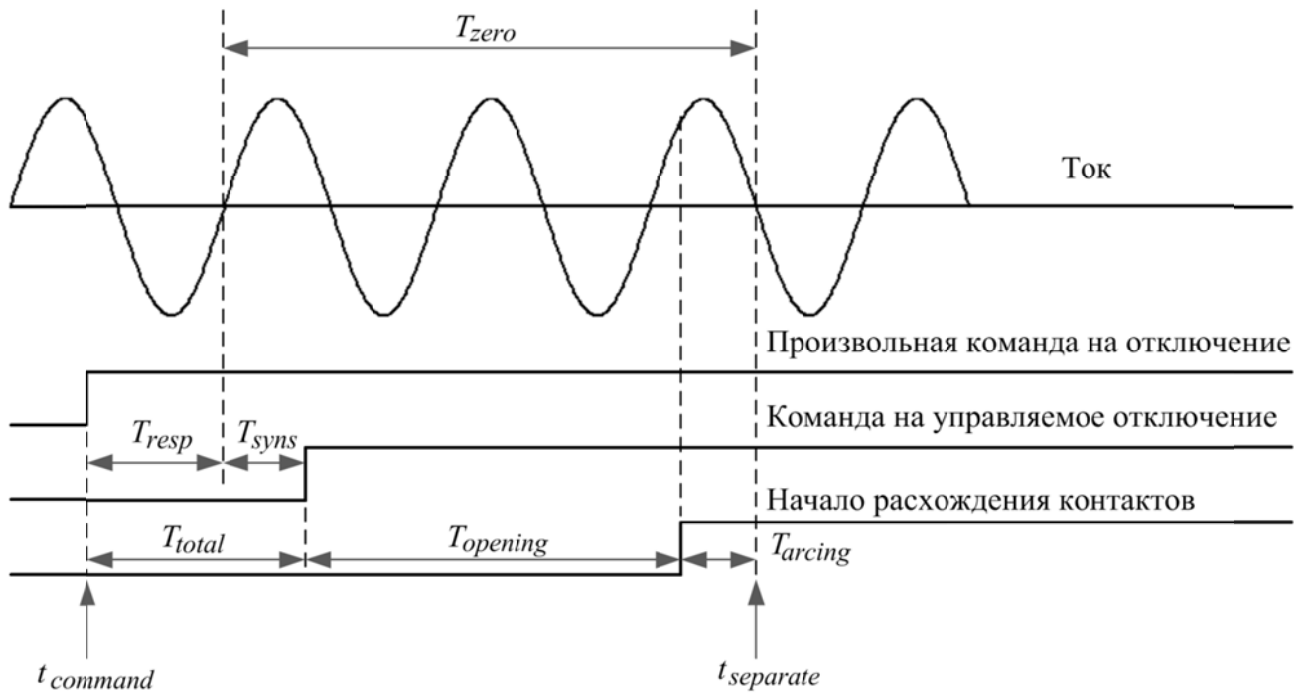


Рисунок 2.1 – Принцип управляемого отключения

$$T_{total} = T_{resp} + T_{sync}, \quad (2.1)$$

$$T_{sync} = T_{zero} - T_{arcing} - T_{opening}. \quad (2.2)$$

Точное управление временем  $t_{separate}$ , которое соответствует моменту времени погасания электрической дуги, фактически определяет время горения дуги  $T_{arcing}$ . Собственное время отключения  $T_{opening}$  является интервалом времени между подачей питания на катушку привода выключателя и началом расхождения контактов выключателя.  $T_{zero}$  – интервал времени, необходимый для достижения положительного значения времени синхронизации.



### 2.2.2 Управляемое включение

Управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя, начинающийся в строго определенный момент времени с опережением момента перехода напряжения источника через ноль. В рабочих режимах включение реактивной нагрузки сопровождается бросками тока. При этом, чем дальше момент смыкания контактов от нулевого значения напряжения на разрыве, тем выше броски тока.

Для осуществления операции управляемого включения синхронизирующее устройство отслеживает напряжение источника питания. Случайным образом подается команда на включение выключателя в момент времени  $t_{command}$ . На рисунке 2.2 представлен принцип управляемого включения емкостной нагрузки [75 - 80]. Контроллер задерживает команду на включение на некоторое время  $T_{total}$ , которое по (2.1) определяется суммой времени реакции контроллера  $T_{resp}$  и преднамеренной задержки времени синхронизации  $T_{sync}$ .

$$\begin{aligned} T_{sync} &= T_{zero} - T_m - (T_{closing} - T_{prestriking}) = \\ &= T_{zero} - T_m - T_{making}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Контроллер вводит задержку времени синхронизации  $T_{sync}$  относительно соответствующего перехода напряжения источника через ноль, которая рассчитывается по выражению (2.3) с учетом времени включения выключателя  $T_{closing}$  и времени предпробоев  $T_{prestriking}$ . В момент времени  $t_{make}$  возникают предпробои. Интервал  $T_m$  определяется временем  $t_{make}$  и следующим за ним временем перехода напряжения источника через ноль.

Время включения  $T_{closing}$  есть интервал времени с момента подачи питания на катушку включения выключателя до момента механического касания контактов. Время предпробоев при включении  $T_{prestriking}$  является интервал времени между первым предпробоем и механическим касанием контактов. Время  $T_{making}$  является промежутком времени от подачи питания на катушку включения до начала предпробоев  $t_{make}$ .

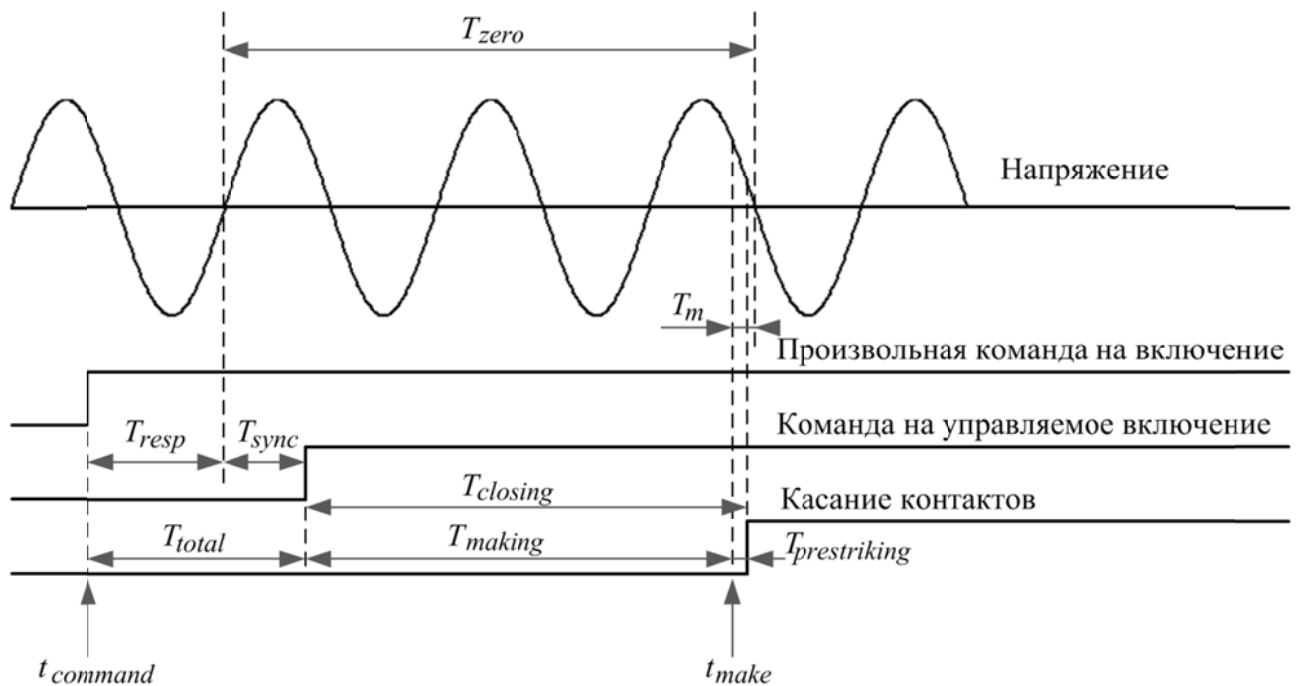


Рисунок 2.2 – Принцип управляемого включения

### 2.2.3 Управляемое отключение токов короткого замыкания

В отличие от коммутации токов нормального режима коммутация аварийных токов должна быть осуществлена как можно быстрее, так как длительное протекание тока короткого замыкания может вызвать повреждение оборудования. Поэтому в этом режиме нет возможности выжидания наилучшего, с точки зрения уменьшения перенапряжений, момента времени коммутации. Однако в аварийном режиме возможно минимизировать воздействие сверхтока на выключатель за счет снижения времени горения дуги в дугогасительной камере.

При отключении короткого замыкания минимальное время горения дуги представляет собой наименьшее время, за которое контакты выключателя расходятся на расстояние достаточное для успешного гашения дуги при первом переходе тока через ноль. Максимальное время горения дуги возникает, когда выключатель не может произвести успешное отключение при первом прохождении аварийного тока через ноль. Это происходит в том случае, когда

разделение контактов выключателя начинается до первого перехода тока через ноль за время, меньшее минимального времени горения дуги, что в результате приводит к существенному увеличению продолжительности горения дуги.

Безусловно, при неуправляемом отключении аварийного тока в большинстве случаев длительность горения дуги превосходит минимальную, а в некоторых случаях достигает максимальной величины. Избыток времени горения дуги добавляет электрическую эрозию частям дугогасительного устройства и снижает ресурс выключателя. Минимизация избытка времени горения дуги является основной целью управляемой коммутации в аварийном режиме [37].

На рисунке 2.3 поясняется принцип управляемого аварийного отключения [81]. В произвольный момент времени  $t_{sc}$  происходит короткое замыкание. Через некоторое время  $t_{resp}$  релейная защита обнаруживает аварийный режим и подает команду на отключение выключателя синхронизирующему устройству в момент времени  $t_{command}$ . Эта команда задерживается контроллером на некоторый интервал времени синхронизации  $T_{sync}$ . Интервал времени  $T_{sync}$  рассчитывается по выражению (2.2) относительно собственного времени отключения выключателя  $T_{opening}$  и минимального времени горения дуги  $T_{arcing}$ , при котором происходит успешное отключение при первом переходе тока через ноль. Время  $t_{separate}$ , соответствует моменту времени полного расхождения контактов.  $T_{zero}$  – интервал времени от момента подачи команды на отключение до перехода тока через ноль, при котором происходит успешное отключение.

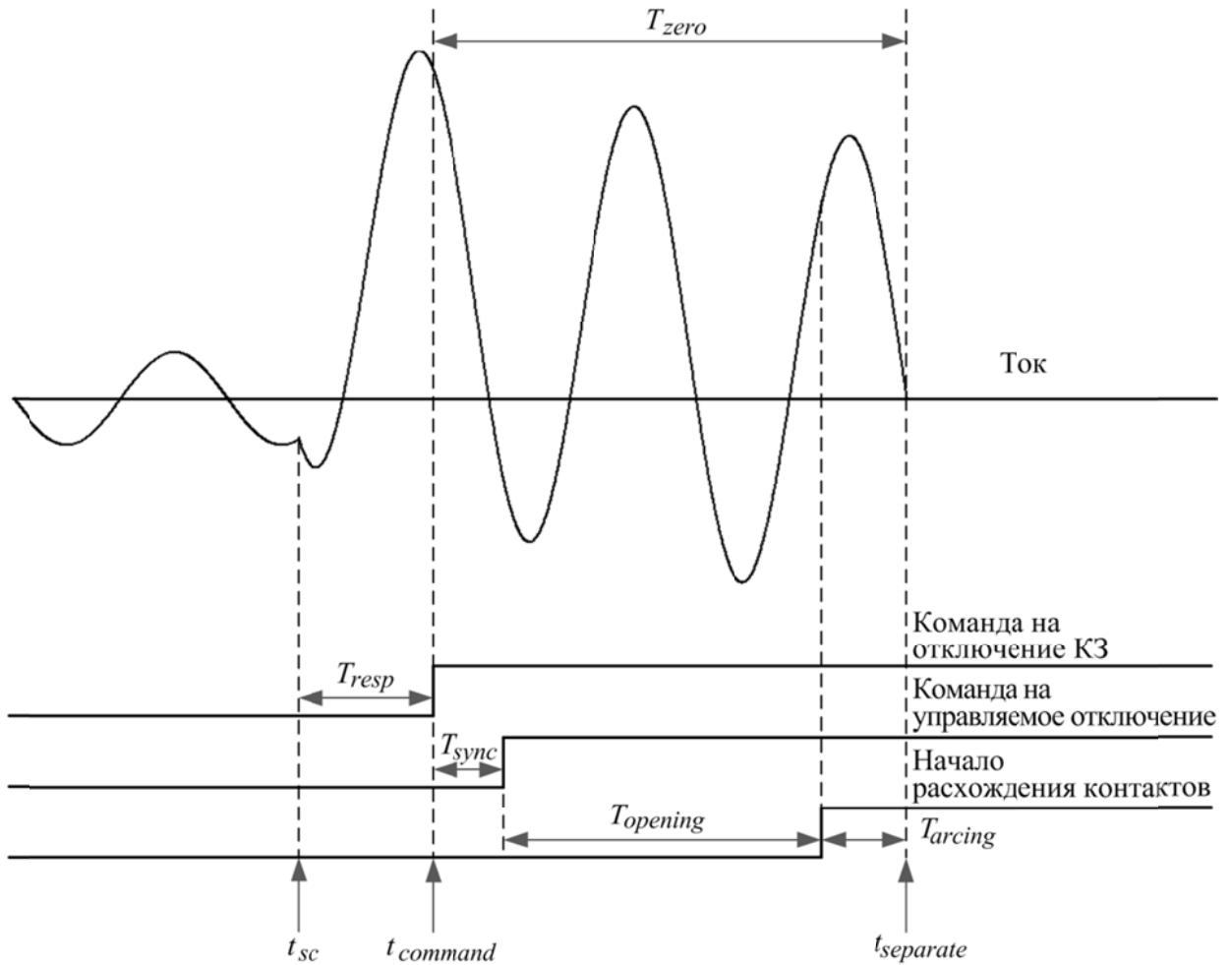


Рисунок 2.3 – Принцип управляемого отключения в аварийном режиме

#### 2.2.4 Особенности управляемой коммутации в трехфазных электрических сетях

В трехфазной сети переменного напряжения напряжение каждой фазы пересекает ноль в разные моменты времени, поэтому для осуществления переключения электрической сети с минимальными переходными процессами необходимо производить коммутацию полюсов выключателя одновременно.

В случае системы с глухозаземленной нейтралью алгоритм управляемой коммутации может иметь следующий вид. Коммутация полюсов выключателя производится последовательно при условии прохождении через ноль соответствующей фазы с задержкой по времени, выраженной следующей зависимостью [41, 76]:

$$t_1 = \frac{1}{360 \cdot f} \cdot 60 = \frac{1}{360 \cdot 50} \cdot 60 = 0,0033c. \quad (2.4)$$

где  $f$  – частота сети,  $f=50$  Гц.

В случае системы с изолированной нейтралью в общем случае необходимо одновременно произвести коммутацию двух фаз и через 90 электрических градусов произвести коммутацию третьей фазы [41, 76]. Также возможен вариант коммутации одной фазы при её прохождении через ноль с последующей коммутацией двух, которая соответствует задержке в 90 электрических градусов:

$$t_2 = \frac{1}{360 \cdot f} \cdot 90 = \frac{1}{360 \cdot 50} \cdot 90 = 0,005c. \quad (2.5)$$

На рисунке 2.4 представлены временные интервалы чередования коммутации фаз, имеющие место при различных режимах нейтрали системы. Это позволит создать условия, при которых возможны минимальные уровни перенапряжений и бросков тока.

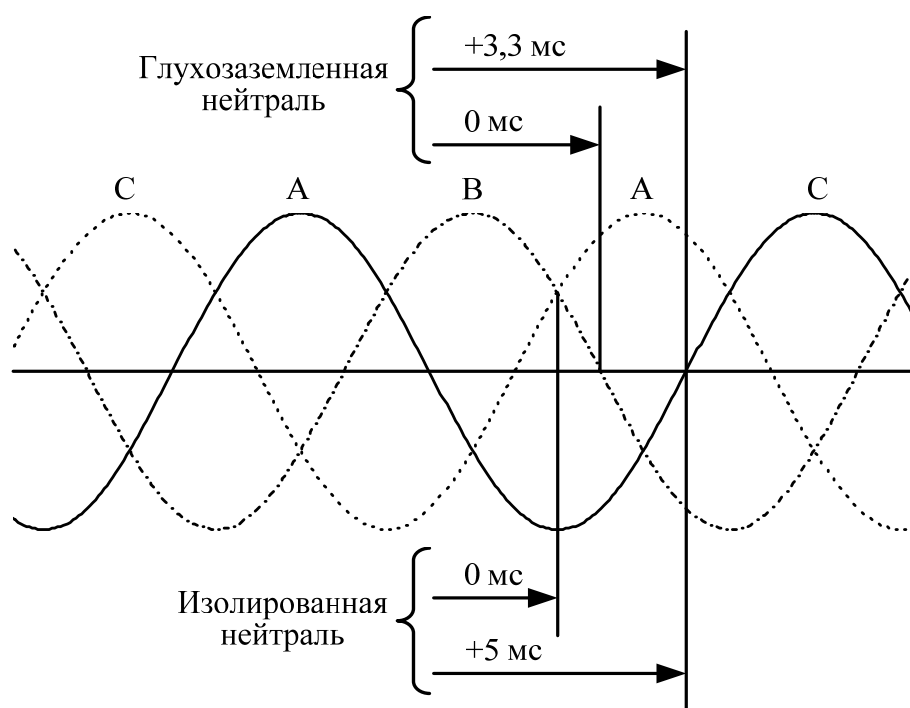


Рисунок 2.4 – Временные интервалы чередования коммутации фаз

### 2.3 Особенности реализации управляемой коммутации

Для реализации управляемой коммутации в выключателях необходимо, чтобы коммутационные аппараты соответствовали специальным условиям, которые могут быть классифицированы следующим образом: по изоляционным характеристикам, механическим характеристикам, адаптивности системы управления и системам диагностики и мониторинга [37, 82].

*Изоляционные характеристики выключателя.* С точки зрения диэлектрических характеристик выключатель, предназначенный для работы в режиме управляемой коммутации, должен обладать достаточно высокой скоростью спада электрической прочности межконтактного промежутка при включении, достаточно малыми разбросами пробивного напряжения и достаточно большой скоростью восстановления электрической прочности при отключении. В настоящее время в электрических сетях 6 (10) кВ этим требованиям удовлетворяют вакуумные выключатели.

*Механические характеристики выключателя.* К коммутационным аппаратам, способным реализовать принципы управляемой коммутации, должны предъявляться высокие требования по стабильности времени включения и времени отключения. По данным [37, 82, 83] максимальные разбросы моментов времени коммутации некоторых видов нагрузок для отдельно взятого полюса выключателя могут быть не более  $\pm (1 - 2,5)$  мс. При этом требуется одновременное управление полюсами выключателя, что накладывает ряд ограничений на использование современных выключателей 6 (10) кВ в качестве устройств управляемой коммутации, так как большинство из них имеют трехполюсное исполнение и общий привод на три фазы.

Определить рассмотренные выше характеристики для конкретного выключателя с целью оценки его применимости в качестве синхронного выключателя является достаточно сложной задачей. Это объясняется тем, что производители не представляют указанные характеристики. Поэтому их выявление в настоящее время возможно только при самостоятельном проведении

натурных экспериментов или при анализе специальной литературы. Исследования характеристик вакуумных выключателей представлены в п. 3.2.1.

*Адаптивность системы управления.* Разбросы времени включения и отключения не должны превышать допустимых значений при изменении температуры окружающей среды, при колебаниях напряжения питания, в результате износа и старения узлов выключателя. Поэтому изменения времени срабатывания должны компенсироваться системой управления выключателем [37].

При этом система управления должна осуществлять контроль над правильностью операций, производимых аппаратом. В системе управления должна быть предусмотрена возможность проверки ее оперативных характеристик без проведения реальных коммутаций выключателем. Работоспособность системы управления должна сохраняться и после коммутации токов короткого замыкания.

*Диагностика и мониторинг.* Одной из тенденций развития современной электроэнергетики является переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию оборудования по состоянию. Для синхронных выключателей необходимы системы диагностики и мониторинга, которые позволят оценить их текущее состояние и уровень коммутационного износа, повысить оперативную готовность и надежность выключателей при минимальных затратах [37, 84].

## **2.4 Устройства управляемой коммутации**

Исследования управляемой коммутации для снижения перенапряжений и бросков тока осуществляются с середины XX века [33, 34, 49]. Наибольший вклад в изучение процессов управляемой (синхронной) коммутации высоковольтных выключателей внесла рабочая группа *WG 13.07 (A3.07) CIGRE «Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers»*, специально созданная для этой цели [42 - 47].

Разработкой и внедрением устройств синхронной коммутации занимаются как в России, так и за рубежом [49]. По данным *CIGRE* в мире с 1984 по 2001 гг.

количество установленных высоковольтных выключателей с управляемой коммутацией составляет 2500 шт. Из них 64% предназначены для коммутации конденсаторных батарей, 17% – для коммутации шунтирующих реакторов, 17% – для включения трансформаторов, и 2% – для включения линий электропередач без больших бросков тока и напряжения. Также проводятся исследования возможности применения синхронных выключателей для коммутации других элементов электрической сети [37].

В 70-80-х годах в СССР занимались разработкой вакуумных синхронных выключателей [85 - 88], однако целью этих изобретений было управляемое отключение токов короткого замыкания для повышения диапазона отключаемых токов и сопутствующего улучшения эксплуатационных характеристик выключателя, но не снижения перенапряжений и бросков тока. С появлением нового типа вакуумных дугогасящих камер с аксиальным магнитным полем, способных отключать токи до 100 кА, работы в данном направлении стали неактуальными и не были реализованы до конца [88].

В настоящее время в России во «Всероссийском электротехническом институте им. В. И. Ленина» ведется разработка вакуумного выключателя, совмещенного с вакуумным управляемым разрядником (рисунок 2.5). Устройство предназначено для подключения конденсаторных батарей к электрической сети без бросков тока [89]. Согласно [36] устройство находится на стадии создания опытного образца.

В работе [48] предлагается внедрить принципы управляемой коммутации в выключатели 110 кВ трехполюсного исполнения с общим приводом путем механической регулировки (механического разноса) времени срабатывания полюсов аппарата. Данное решение предназначено для коммутации конденсаторных установок 110 кВ и выше. Существенным недостатком такого способа реализации синхронной коммутации является невозможность обеспечения на одном выключателе выполнения режимов управляемого включения и управляемого отключения, что обусловлено различием временных и скоростных характеристик выключателя при включении и отключении.



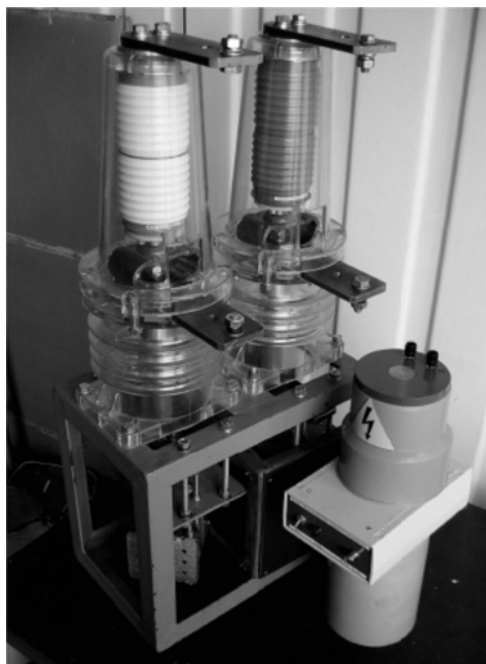


Рисунок 2.5 – Опытный образец вакуумного выключателя, совмещенного с управляемым разрядником

В качестве устройств управляемой коммутации могут применяться тиристорные выключатели, которые позволяют производить операции включения и отключения без переходных процессов. Как правило, такие устройства применяются в быстродействующих источниках реактивной мощности. Однако широкого распространения в электрических сетях 6 (10) кВ они не получили из-за присущих им недостатков, а именно: высоких потерь энергии на нагрев; низкой коммутационной способности; невозможности обеспечить гальваническую развязку в цепи и так далее [50].

На сегодняшний день зарубежные компании-производители предлагают серийно-выпускаемые микропроцессорные блоки управления выключателями (устройства синхронизации), обеспечивающие коммутацию полюсов аппарата в заданные моменты времени. Одним из таких примеров является устройство синхронизации «*Switchsync*» компании *ABB* (рисунок 2.6, а) для колонковых элегазовых выключателей на напряжение 72,5 кВ и выше [51]. Такое устройство в зависимости от назначения позволяет выполнять одно из следующих действий:

включение или отключение шунтирующих реакторов, конденсаторных батарей, силовых трансформаторов или ненагруженных линий. Согласно [52] количество установленных устройств синхронизации, начиная с 1984 г., превышает 1500 шт. Для высоковольтных баковых выключателей компания *ABB* предлагает использовать устройство синхронизации «*Switching Control Sentinel*» (рисунок 2.6, б) [53], принцип действия и коммутируемая нагрузка которого аналогичны устройству «*Switchsync*».



Рисунок 2.6 – Устройства синхронизации компании *ABB*:  
а – *Switchsync*; б – *Switching Control Sentinel*

Несколько частных решений управляемой коммутации предлагает компания *Joslin Hi-Voltage*. Примером является устройство «*Point on Wave Control*» (рисунок 2.7, а), устанавливаемое совместно с выпускаемыми указанным производителем вакуумными выключателями [54]. Устройство синхронизации может использоваться только в случае управляемого включения трансформаторов для снижения бросков тока намагничивания. Другим частным решением компании *Joslin Hi-Voltage* является устройство управляемого включения конденсаторных батарей, позволяющее избежать бросков тока – «*Digital Zero Voltage Closing*» (рисунок 2.7, б) [55].



Рисунок 2.7 – Устройства синхронизации компании *Joslin Hi-Voltage*:  
 а – *Point on Wave Control*; б – *Digital Zero Voltage Closing*»

Особенностью приведенных выше устройств является то, что они не являются комплексными решениями. Каждое отдельно взятое устройство управляемой коммутации предназначено для решения узкой задачи, например, вакуумный выключатель, совмещенный с вакуумным управляемым разрядником, для снижения броска тока при включении конденсаторной батареи. Устройства синхронизации являются не полноценными коммутационными аппаратами и могут использоваться только совместно с выключателями определенных типов. К тому же большинство представленных решений рассчитаны для высоковольтных выключателей, которые эксплуатируются в электрических сетях с заземленной нейтралью. Поэтому эти устройства не могут быть широко использованы в электрических сетях 6 (10) кВ с изолированной нейтралью.

Универсальным устройством, способным полностью реализовать технологию управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ, является синхронный вакуумный выключатель типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* [76]. Внешний вид выключателя представлен на рисунке 2.8. Этот выключатель имеет возможность реализации управляемой коммутации разных реактивных элементов электрической сети. В основу построения выключателя заложены принципы управляемой коммутации, приведенные в п. 2.2.



Рисунок 2.8 – Синхронный вакуумный выключатель *EX-BBC SMARTIC*

Система автоматического управления реализована таким образом, чтобы обеспечивать допустимый разброс начала движения контактов вакуумной дугогасительной камеры и необходимую скорость восстановления электрической прочности за счет заданной скорости движения контактов. Функциональная схема устройства представлена на рисунке 2.9. Схема содержит контуры обратных связей, сформированные датчиками тока  $I$  и датчиками напряжения  $U$ , которые расположены на каждой из фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  трехфазной сети. Сигналы с датчиков через устройства сопряжения (УСО) поступают для дальнейшего анализа в микропроцессорный блок с интегрированной памятью, силовой схемой управления независимыми друг относительно друга фазными приводами, интерфейсом связи  $RS-485$ . Обеспечение заданных динамических характеристик осуществляет программно-аппаратный комплекс *SMARTIC* [90].

В таблице 2.1 представлены преимущества синхронного вакуумного выключателя *EX-BBC SMARTIC* в сравнении с традиционным вакуумным выключателем 6 (10) кВ.

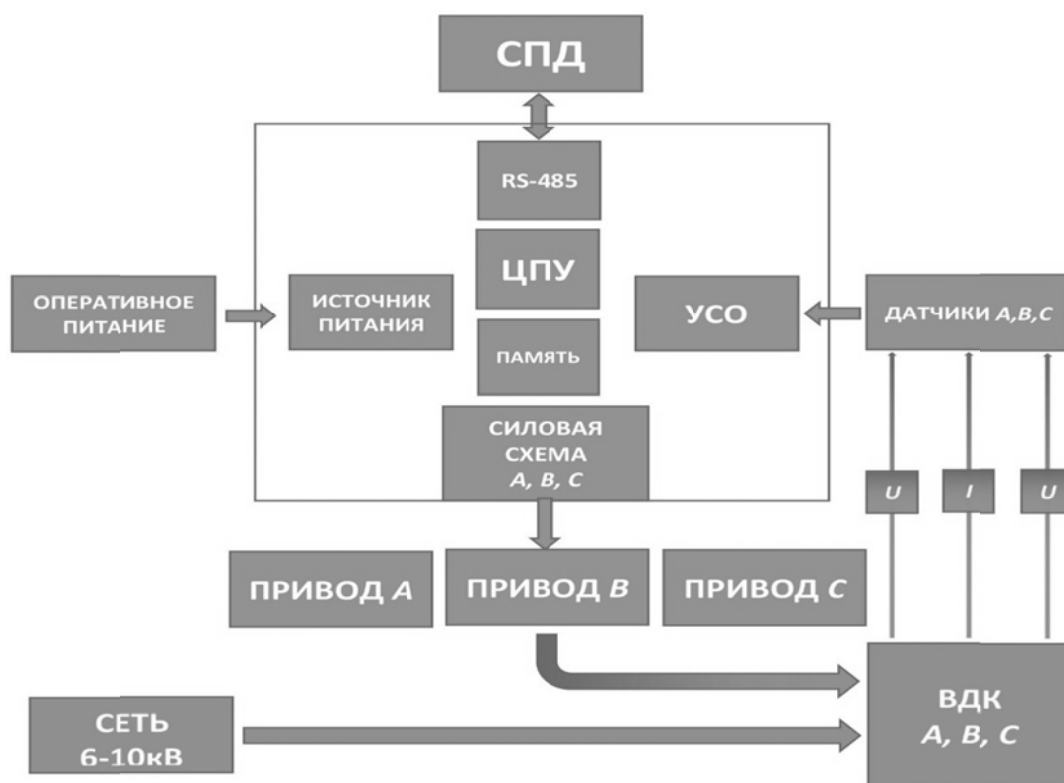


Рисунок 2.9 – Функциональная схема системы автоматического управления синхронным вакуумным выключателем

Таблица 2.1 – Сравнительная оценка выключателей 6 (10) кВ

Обычный выключатель	<i>EX-BBC SMARTIC</i>
Отсутствие возможности независимой коммутации фаз	Разновременная коммутация полюсов
Отсутствие оценки ресурса коммутационного аппарата	Алгоритм оценки ресурса выключателя
Отсутствие возможности коррекции динамики контактов при износе	Автоматическое изменение динамики контактов
Отсутствие анализа коммутационных процессов	Встроенный осциллограф
Отсутствие интеграции в сеть передачи данных	Интерфейс связи RS-485
Отсутствие самодиагностики	Алгоритмы самодиагностики

Несмотря на наличие аппаратов, реализующих функцию синхронного включения или отключения [49 -56], на сегодняшний день процессы управляемой коммутации вакуумных выключателей в электрических сетях 6 (10) кВ

недостаточно изучены. Большинство проведенных исследований в данной области относятся к высоковольтным выключателям на классы напряжения 110 кВ и выше [33, 34, 36 - 38, 40 - 48], 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 [35, 39]. Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования, включающего в себя изучение процессов коммутации, анализ эффективности и определение области применения синхронного вакуумного коммутационного аппарата в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения.

## 2.5 Выводы

По данной главе можно сделать следующие выводы:

1. Снижение амплитуды переходных процессов связано с использованием специальных средств ограничения: нелинейных ограничителей перенапряжения, *RC*-цепей, постоянно включенных реакторов или предвключаемых резисторов. Применение указанных средств не всегда оказывается эффективным или экономически выгодным и не решает проблему кардинально, так как коммутация может произойти в наихудшей фазе напряжения.

2. Одним из наиболее перспективных способов решения проблемы уменьшения перенапряжений и бросков тока является применение принципов управляемой коммутации. В нормальных режимах работы управляемая коммутация реактивных нагрузок позволяет существенно уменьшить броски тока и снизить вероятность возникновения перенапряжений. Управляемое отключение токов короткого замыкания способно обеспечить уменьшение электрической эрозии частей дугогасительного устройства и повышение ресурса выключателя.

3. Принцип управляемого отключения заключается в размыкании контактов выключателя в определенный момент времени с опережением перехода отключаемого тока через ноль. Управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя в определенный момент времени с опережением перехода напряжения источника через ноль.

4. Аппараты, способные реализовать принципы управляемой коммутации, должны соответствовать определенным требованиям по изоляционным характеристикам, механическим характеристикам, адаптивности системы управления и системам диагностики и мониторинга.

5. В настоящее время имеется ряд устройств управляемой коммутации. Однако технические решения, основанные на применении таких устройств, не являются комплексными, и не могут быть использованы для управляемой коммутации всех видов реактивных нагрузок в электрических сетях 6 (10) кВ. Коммутационным аппаратом, способным полностью реализовать возможности управляемой коммутации, является синхронный вакуумный выключатель *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000*.

### 3 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6 (10) КВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ

#### 3.1 Постановка задачи

Проведение комплексных исследований, затрагивающих изучение процессов коммутации, анализ эффективности и определение области применения устройств управляемой коммутации 6 (10) кВ требует разработки соответствующих моделей.

В данной главе представлены модели основных элементов электрических сетей 6 (10) кВ систем электроснабжения. Особое внимание уделяется созданию уникальной модели синхронного вакуумного выключателя, реализующего принципы управляемой коммутации.

Модели разработаны в программном комплексе *MatLab/Simulink* [91, 92], который позволяет моделировать сложные электроэнергетические системы, сочетая методы имитационного и структурного моделирования.

#### 3.2 Имитационная модель синхронного вакуумного выключателя

##### 3.2.1 Характеристики вакуумных выключателей

Наиболее важными характеристиками вакуумных выключателей для адекватного моделирования переходных процессов при коммутациях электрической сети являются величина среза тока до его естественного перехода через ноль, изменение электрической прочности межконтактного промежутка, максимальная скорость перехода гасимого тока через ноль и неодновременность срабатывания полюсов аппарата.

Срез тока представляет собой резкое падение тока от некоторого значения до нуля. Из-за малого времени и высокой скорости спада он может приводить к перенапряжениям. Срез тока характерен для выключателей любого



применяющегося в настоящее время типа дугогашения (маломасляных, вакуумных, элегазовых) и зависит от материала контактов. В вакуумных выключателях причиной среза тока является неустойчивость горения дуги при малых токах, что связано с ее горением в парах металла контактов.

В настоящее время в вакуумных выключателях в основном используются хром-медные контакты, при применении которых величина среза тока по разным источникам составляет  $I_{\text{ср}} = 4 - 6 \text{ А}$  [4 - 6, 27, 29].

Зажигания электрической дуги в дугогасительной камере выключателя провоцируют появление опасных высокочастотных перенапряжений. Условием появления зажиганий дуги является недостаточная электрическая прочность межконтактного промежутка в какой-либо момент времени при включении или отключении выключателя. Таким образом, важнейшими зависимостями, характеризующими уровень высокочастотных перенапряжений, являются закон и скорость изменения электрической прочности межконтактного промежутка выключателя.

Закон изменения электрической прочности при отключении выключателя может быть описан линейной зависимостью [30]:

$$u_{\text{эп}}(t) = k \cdot (t + t_0) \quad (3.1)$$

где  $k$  – скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка, кВ/мс,  $t$  – текущий момент времени, мс,  $t_0$  – время между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока через значение среза тока.

Вид закона (3.1) обусловлен следующими физическими процессами. Рост электрической прочности промежутка объясняется увеличением расстояния между расходящимися контактами выключателя. До момента обрыва электрической дуги контакты выключателя успевают разойтись на некоторое расстояние, обеспечивая тем самым определенную электрическую прочность ( $k \cdot t_0$ ) после погасания дуги.

Значение параметра  $t_0$  зависит от ряда факторов: величины среза тока выключателя, момента времени размыкания контактов, величины протекающего

тока. При отключении тока ниже значения среза тока выключателя величина  $t_0$  принимается равной 1 – 10 мкс [93].

Скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка для современных вакуумных выключателей лежит в пределах  $k = 20 – 80$  кВ/мс [4, 6, 27, 29, 32].

Закон изменения электрической прочности при включении выключателя может быть записан следующим образом [93]:

$$u_{эп}(t) = -k_{сн} \cdot (t - t_{вкл}) \quad (3.2)$$

где  $k_{сн}$  – скорость снижения электрической прочности межконтактного промежутка, кВ/мс,  $t_{вкл}$  – момент времени смыкания контактов выключателя, мс.

В модели выключателя закон изменения электрической прочности при включении (3.2) принят, также как и при отключении, линейным. При этом скорость снижения электрической прочности принята равной скорости восстановления электрической прочности, так как при включении скорость перемещения подвижных контактов выключателя оказывается не ниже, чем при отключении [1].

После возникновения предпробоев при включении или повторных зажиганий дуги при отключении через выключатель проходит высокочастотный ток, дальнейшее прерывание которого возможно при его переходе через ноль в случае, когда скорость изменения высокочастотного тока не больше максимального значения  $(di/dt)_{max}$ .

Современные вакуумные выключатели обладают высокой дугогасительной способностью, что приводит к многократному повторению процессов зажигания и погасания электрической дуги, в результате чего образуются многократные высокочастотные перенапряжения. В работах [1, 6, 27] указывается максимальная скорость изменения тока для вакуумных выключателей, при которой возможно погасание электрической дуги, равная  $di/dt_{max} = 40 – 160$  А/мкс.

Также на величину перенапряжений значительное влияние оказывает неодновременность срабатывания полюсов выключателя. В данной работе проводились исследования разбросов времени срабатывания полюсов

синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производителя ООО «КЭПС» [56, 63]. 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).

В ходе выполнения экспериментов были проведены измерения времени начала размыкания контактов и времени окончания замыкания контактов, результаты измерений представлены в таблице 3.1 и таблице 3.2 соответственно [94].

Таблица 3.1 – Время начала размыкания контактов выключателя

№ опыта	$t$ , мс		
	$A$	$B$	$C$
1	9,6	8,5	10,2
2	9,56	8,58	10,4
3	9,56	8,44	10,4
4	9,56	8,48	10,6
5	9,56	8,52	10,7
6	9,48	8,52	10,6
7	9,48	8,48	10,6
8	9,56	8,52	10,7
9	9,48	8,52	10,7
10	9,5	8,5	10,6

Таблица 3.2 – Время окончания замыкания контактов выключателя

№ опыта	$t$ , мс		
	$A$	$B$	$C$
1	27,0	26,2	25,2
2	27,2	26,7	25,5
3	27,1	26,4	25,2
4	27,0	26,4	25,2
5	27,0	26,3	25,3
6	27,0	26,4	25,3
7	27,0	26,4	25,3
8	27,0	26,4	25,2

Из результатов измерения следует, что разбросы времени начала размыкания контактов для фазы  $A$  составляют не более 0,12 мс, фазы  $B$  – 0,14 мс, фазы  $C$  – 0,5 мс. Максимальная неодновременность размыкания двух полюсов выключателя составляет не более 2,26 мс. Разбросы времени окончания замыкания контактов для фазы  $A$  – не более 0,2 мс, фазы  $B$  – 0,5 мс, фазы  $C$  – 0,3 мс. Максимальная неодновременность замыкания двух полюсов – не более 2 мс.

Разбросы времени включения и времени отключения синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6 (10)-20/1000* удовлетворяют требованиям, предъявляемым к устройствам управляемой коммутации (п. 4.5). Неодновременности размыкания и замыкания полюсов выключателя могут быть изменены в зависимости от алгоритма коммутации.

На основании вышеизложенного модель синхронного вакуумного выключателя учитывает 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;

- разброс времени срабатывания полюса выключателя не более 0,5 мс.

Кроме того, модель выключателя, способного реализовать принципы управляемой коммутации, должна иметь возможность разновременной коммутации отдельных полюсов аппарата [95, 96].

### 3.2.2 Структура модели выключателя

На рисунке 3.1 и рисунке 3.2 представлены структурные схемы процессов отключения и включения выключателя [97]. Ниже рассмотрены основные этапы коммутации. После подачи команды на отключение размыкаются контакты выключателя (рисунок 3.1). Первое гашение электрической дуги возможно при прохождении через выключатель тока  $i$  величиной не более заданного значения среза тока  $I_{ср}$ . Электрическая прочность межконтактного промежутка  $u_{ЭП}$  возрастает с момента начала расхождения контактов. В случае недостаточной электрической прочности между контактами выключателя возникает повторное зажигание дуги. Электрическая дуга гаснет при прохождении высокочастотного тока через ноль со скоростью  $di/dt$  не более заданной скорости изменения тока  $(di/dt)_{max}$ , при которой возможен его обрыв. Также возможно погасание дуги в результате возникновения виртуального среза тока. Процесс зажигания и погасания электрической дуги может повторяться несколько раз до тех пор, пока электрическая прочность межконтактного промежутка ниже восстанавливающегося между контактами напряжения  $u_B$ .

Далее рассмотрен процесс включения выключателя (рисунок 3.2). После подачи команды на включение контакты выключателя начинают сближаться. При этом уменьшается электрическая прочность межконтактного промежутка  $u_{ЭП}$ , и в момент времени, когда напряжение на контактах  $u_B$  превысит электрическую прочность промежутка, возникает предварительный пробой, то есть зажигание

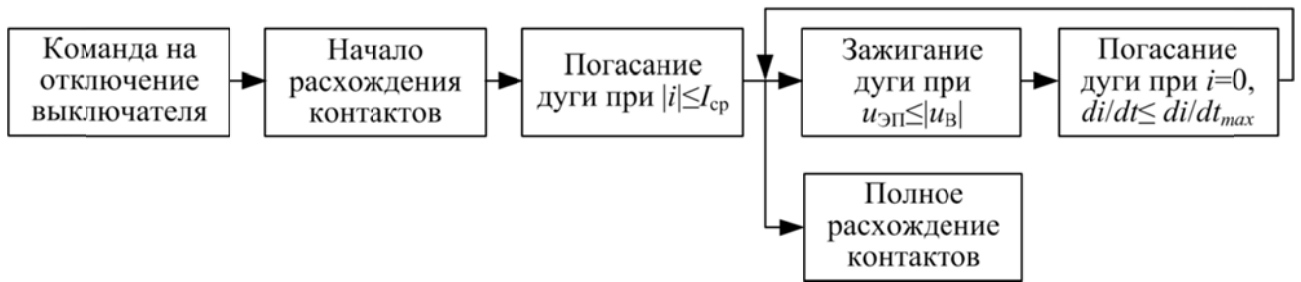


Рисунок 3.1 – Структурная схема процесса отключения выключателя

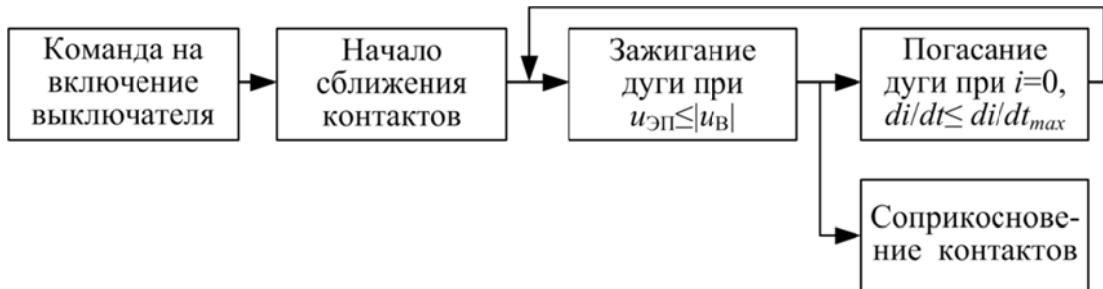


Рисунок 3.2 – Структурная схема процесса включения выключателя

дуги. Условия, при которых возможно погасание дуги, аналогичны условиям при отключении выключателя, рассмотренным выше. Эти процессы (зажигание и погасание электрической дуги) происходят до момента времени соприкосновения контактов выключателя.

### 3.2.3 Модель синхронного вакуумного выключателя

Модель синхронного вакуумного выключателя (рисунок 3.3 – рисунок 3.5) реализована для трех фаз выключателя с использованием блоков имитационного моделирования. В основе построения модели лежит структура модели выключателя, представленная в [98]. Разновременная коммутация полюсов выключателя осуществлена с помощью блоков *Step1 – Step3* (рисунок 3.4, рисунок 3.5), в которых задается момент времени коммутации каждого отдельного полюса аппарата. Силовые контакты и электрическая дуга каждого полюса выключателя моделируются блоками *IdealSwitch1 – IdealSwitch3* и *IdealSwitch4 – IdealSwitch6* соответственно (рисунок 3.3). 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 3.3), подробный вид которых представлен на рисунке 3.4 и рисунке 3.5 соответственно.

Срез тока моделируется во всех отключаемых фазах при первом погасании электрической дуги (рисунок 3.4). Ток в фазах измеряется при помощи блоков *Current1 – Current3* и далее сравнивается с заданным током среза. В случае выполнения неравенства блоками *EnabledSubsystem7 – EnabledSubsystem9* подается команда на гашение дуги между контактами. В дальнейшем возможны только виртуальные срезы тока.

Повторные зажигания дуги могут возникать во всех трех фазах выключателя при недостаточной электрической прочности межконтактного

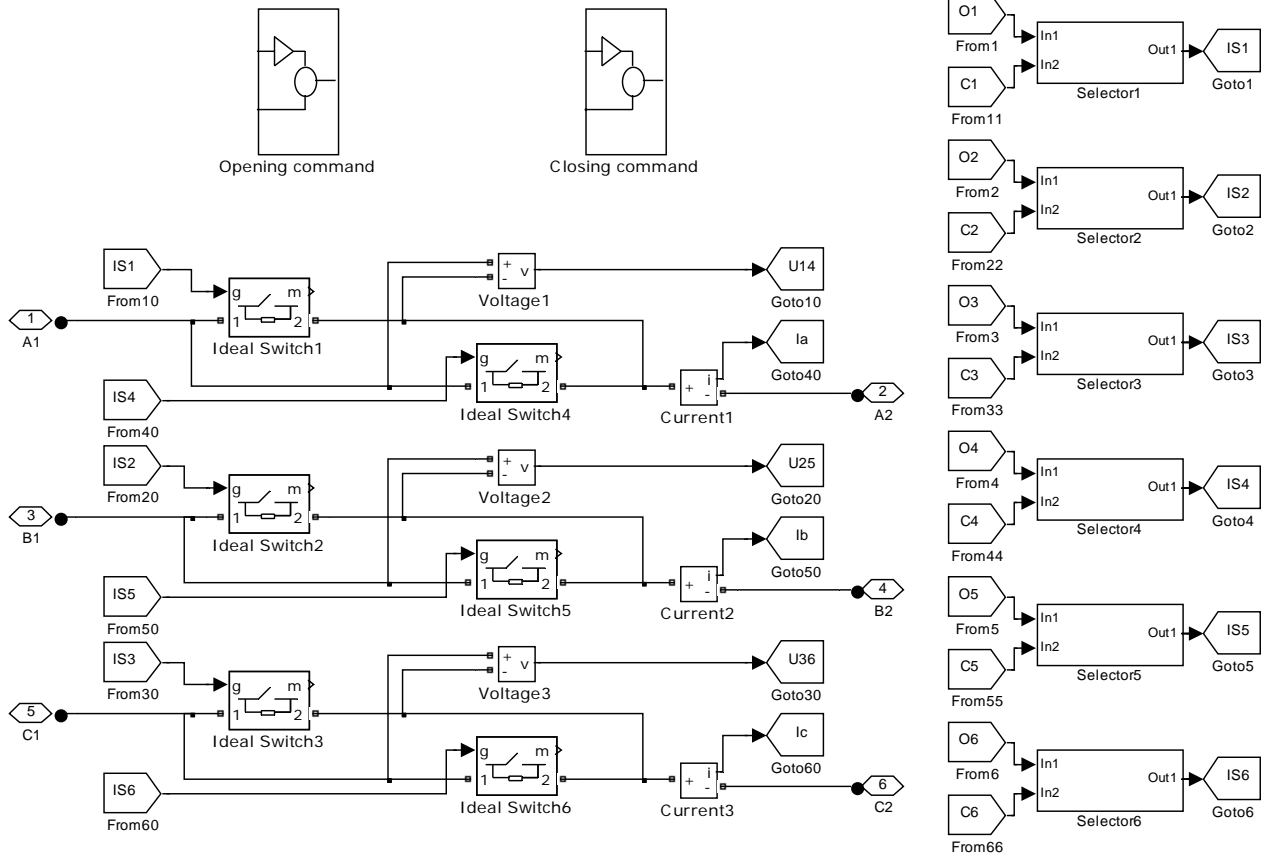


Рисунок 3.3 – Укрупненная модель синхронного вакуумного выключателя



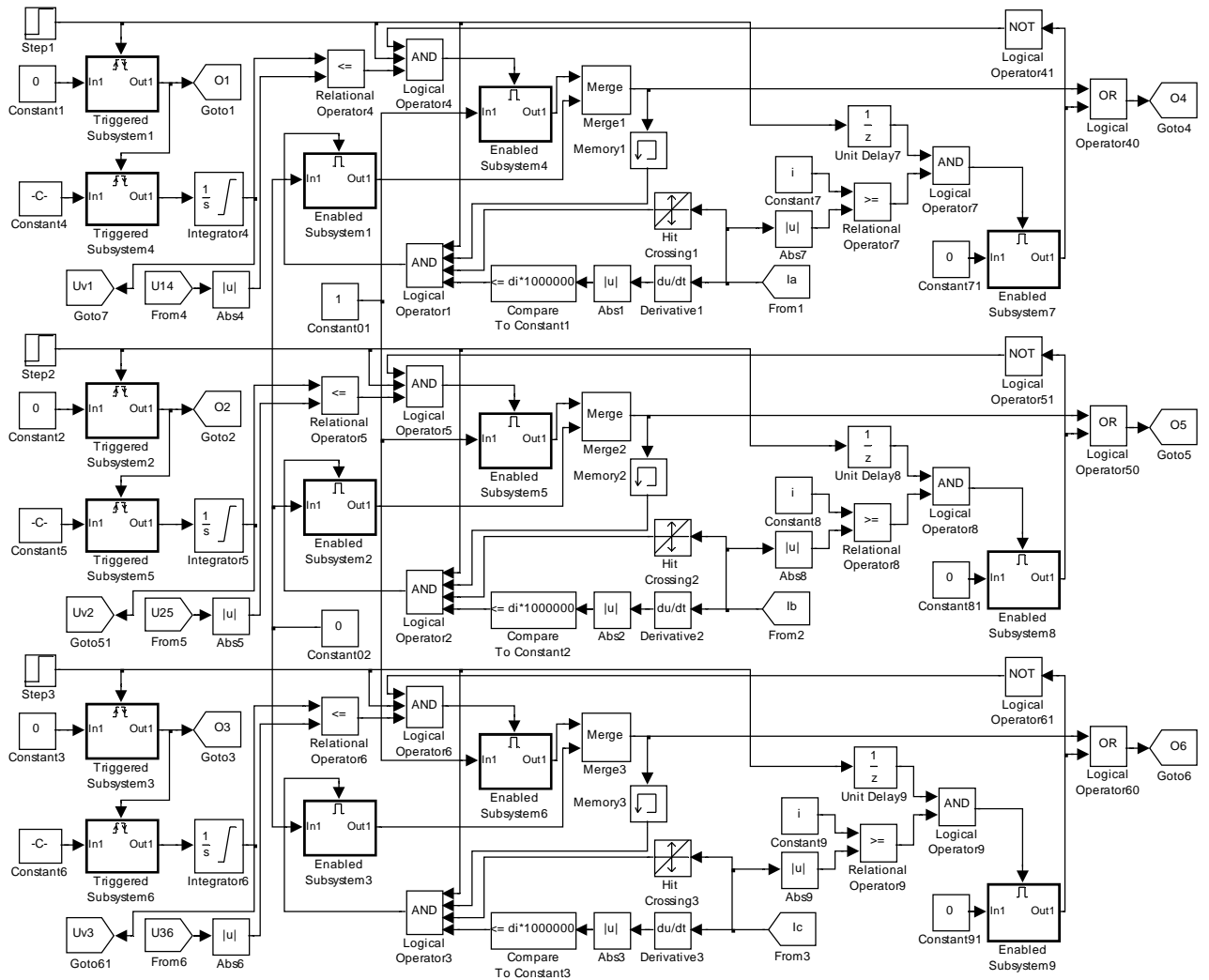


Рисунок 3.4 – Блок управления процессом отключения выключателя

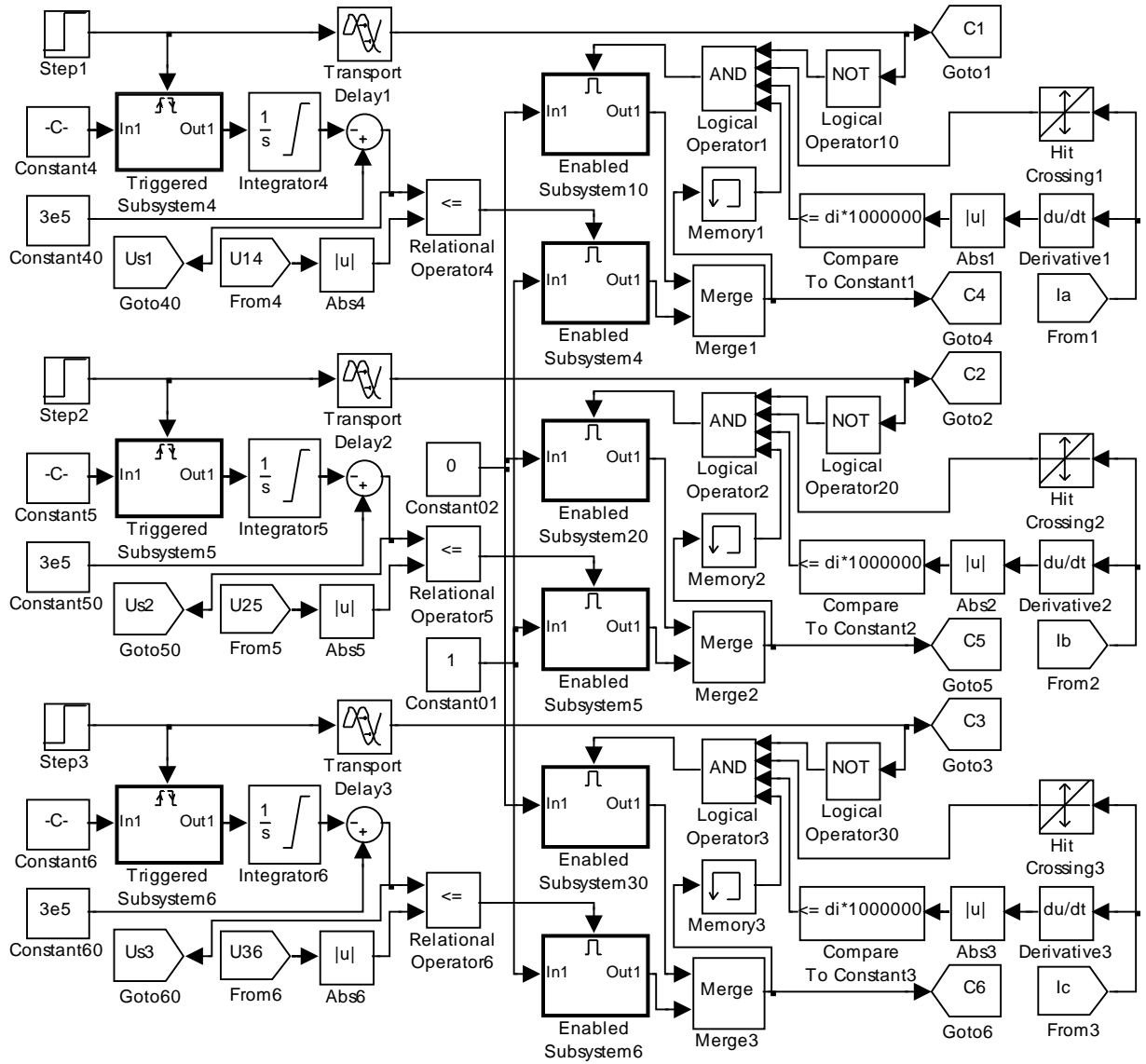


Рисунок 3.5 – Блок управления процессом включения выключателя

промежутка. Электрическая прочность начинает возрастать с момента начала расхождения контактов для каждого полюса и моделируется блоками *Integrator4* – *Integrator6*. Восстанавливающееся напряжение между контактами выключателя измеряется блоками *Voltage1* – *Voltage3*. При выполнении условия неравенства формируется управляющий сигнал блоками *EnabledSubsystem4* – *EnabledSubsystem6* на повторное зажигание дуги.

Электрическая дуга гаснет при прохождении кривой тока через ноль в случае не превышения заданной скорости тока, при которой возможно гашения дуги. Блоки *EnabledSubsystem1* – *EnabledSubsystem3* формируют сигнал на погасание дуги. Процесс зажигания и погасания дуги может повторяться несколько раз в зависимости от характеристик отключаемой сети.

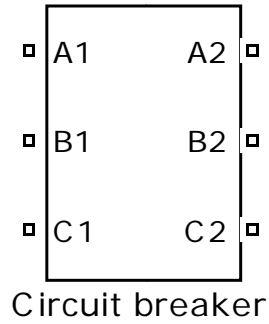
При подаче команды на включение (рисунок 3.5) электрическая прочность межконтактного промежутка начинает снижаться, что реализовано с помощью блоков *Integrator4* – *Integrator6* для каждого отдельного полюса выключателя. Команда на зажигание электрической дуги формируется блоками *EnabledSubsystem4* – *EnabledSubsystem6*. Сигнал на погасание электрической дуги создается блоками *EnabledSubsystem1* – *EnabledSubsystem3*. Далее процесс зажигания и погасания дуги может повторяться несколько раз до смыкания контактов выключателя.

Внешний вид и редактор параметров модели синхронного вакуумного выключателя представлены на рисунке 3.6.

### **3.3 Имитационные модели элементов электрической сети 6 (10) кВ**

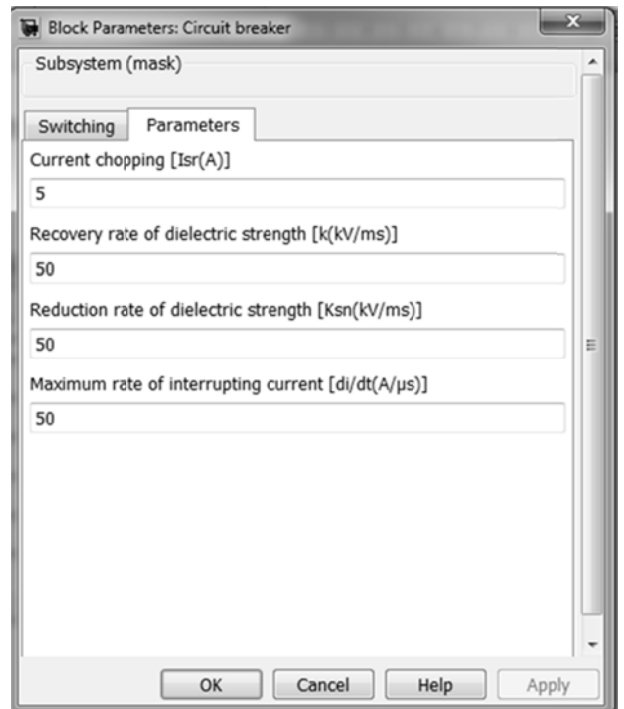
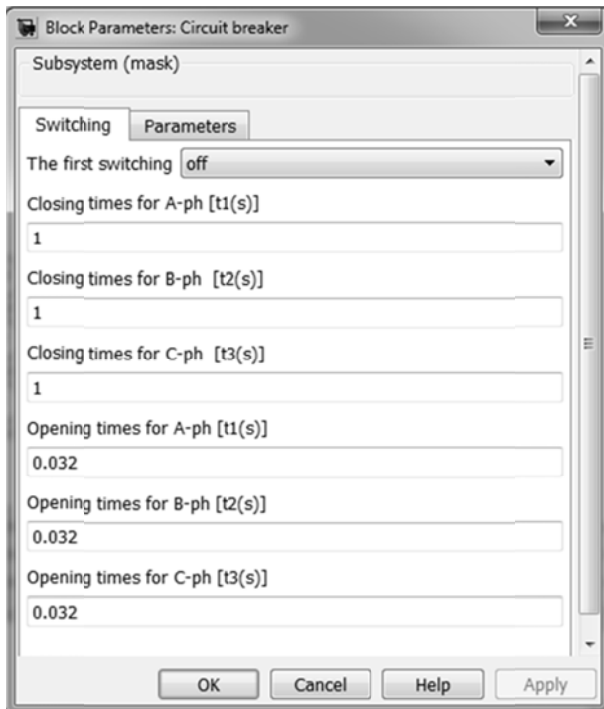
#### *3.3.1 Модель трехфазного источника электропитания*

В качестве источника электропитания выбран блок *Three-Phase Source* [92]. Блок включает в себя три источника переменного напряжения, соединенных в звезду с нулевым проводом или без него. Каждая фаза источника



Circuit breaker

a



б

Рисунок 3.6 – Модель синхронного вакуумного выключателя: а – внешний вид;

б – редактор основных параметров

обладает внутренним активно-индуктивным сопротивлением. Внутренние сопротивления всех фаз одинаковы. Внутреннее сопротивление источника может быть задано непосредственно с помощью значений активного сопротивления и индуктивности или косвенно, с помощью параметров короткого замыкания.

В блоке *Three-Phase Source* не учитываются емкости между фазой и землей и между фазами. Для их учета использован стандартный блок *Three-Phase Parallel RLC Branch*. На рисунке 3.7 представлены внешний вид и основные параметры модели источника электропитания с учетом емкостей между фазой и землей и между фазами.

### 3.3.2 Модель кабельной линии электропередачи

Модель кабельной линии построена с использованием блока *Distributed Parameters Line*, который представляет собой трехфазную линию с распределенными параметрами. Математическое описание модели подробно изложено в [99].

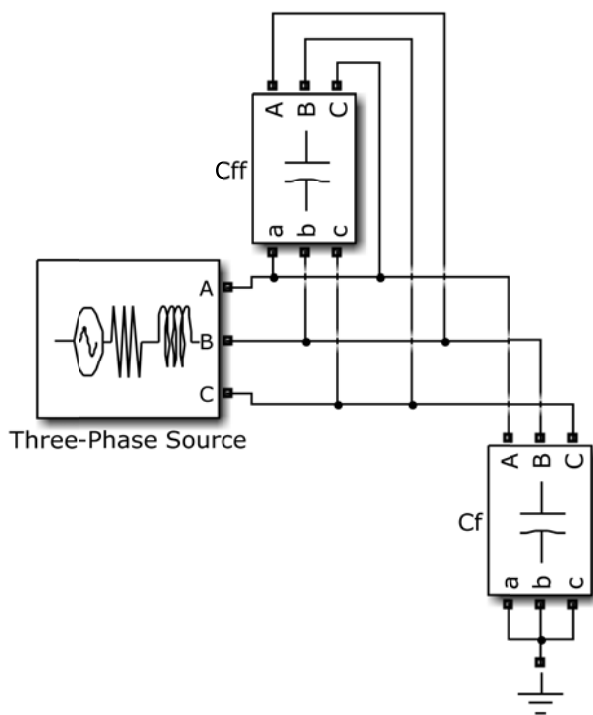
Блок *Distributed Parameters Line* учитывает активные сопротивления, индуктивности и емкости линии по прямой и нулевой последовательностям. Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности могут быть определены по справочным данным [100]. Параметры нулевой последовательности могут быть вычислены по следующим выражениям [101, 102]:

$$r_0 \approx 10 \cdot r_1, \quad (3.3)$$

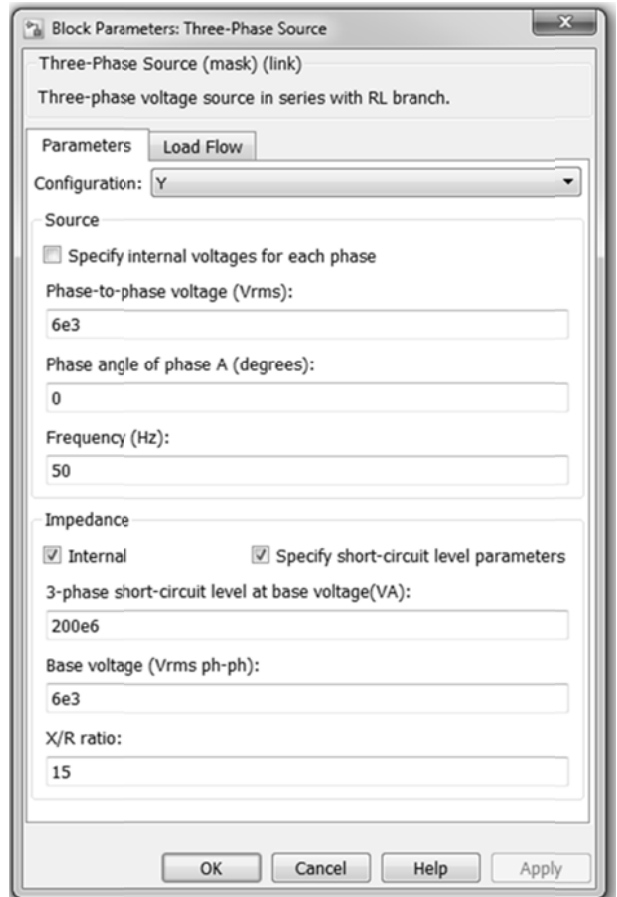
$$x_0 = (3,5 - 4,6) \cdot x_1, \quad (3.4)$$

где  $r_1$ ,  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления по прямой последовательности;  $r_0$ ,  $x_0$  – активное и индуктивное сопротивления по нулевой последовательности.

Емкость нулевой последовательности можно определить по справочным данным [100]. Для нахождения емкости прямой последовательности необходимо знать емкость между фазами, которая оправляется по выражению [100]:



а



б

Рисунок 3.7 – Модель трехфазного источника электропитания: а – внешний вид;  
б – редактор основных параметров

$$C_{\text{фф}} = 0,27 \cdot C_0, \quad (3.5)$$

где  $C_{\text{фф}}$ , – междуфазная емкость;  $C_0$  – емкость нулевой последовательности.

Тогда емкость прямой последовательности может быть вычислена по формуле [102]:

$$C_1 = C_0 + 3 \cdot C_{\text{фф}}. \quad (3.6)$$

Существенное влияние на процесс перенапряжений оказывает поверхностный эффект. Блок *Distributed Parameters Line* не учитывает данного эффекта, поэтому в модели кабельной линии предусмотрено увеличение активного сопротивления при возникновении высокочастотного переходного процесса. Поверхностный эффект учитывается в соответствии с выражением [30]:

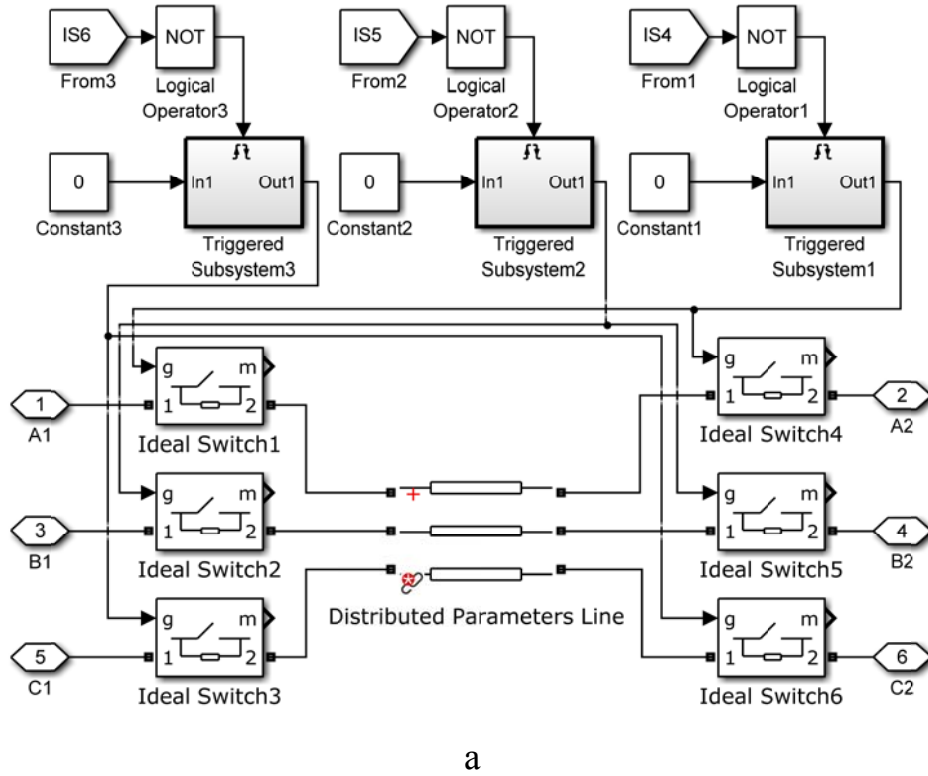
$$R(\omega) = R(100\pi) \cdot \sqrt{\omega/100\pi}, \quad (3.7)$$

где  $R(\omega)$  – активное сопротивление для расчетной частоты;  $R(100\pi)$  – активное сопротивление для частоты 50 Гц;  $\omega$  – угловая частота. Частота переходного процесса определяется при помощи встроенного графического интерфейса пользователя *Powergui FFT Tools*.

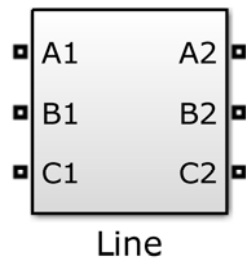
Модель кабельной линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта представлена на рисунке 3.8. Увеличение сопротивления линии при возникновении высокочастотного процесса реализовано с помощью блоков *IdealSwitch*, путем подключения дополнительных резисторов.

### 3.3.3 Модель силового трансформатора

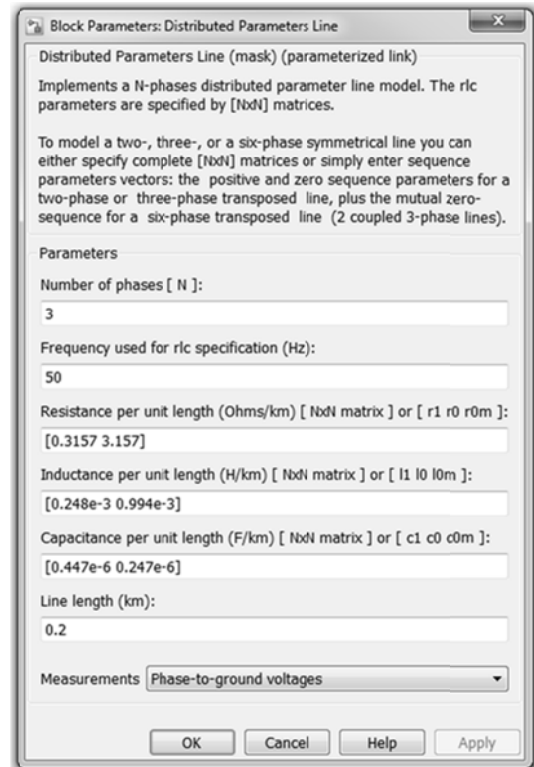
Модель трехфазного силового трансформатора реализована при помощи блока *Three-phase Transformer (Two Windings)*. Блок построен на основе трех однофазных трансформаторов. В модели учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Также имеется возможность задать остаточный магнитный поток для каждой фазы трансформатора.



а



б



в

Рисунок 3.8 – Модель кабельной линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта: а – основные элементы; б – внешний вид; в – редактор основных параметров



Схема замещения модели двухобмоточного трансформатора из библиотеки *MatLab/Simulink* приведена на рисунке 3.9 [103]. Необходимо отметить, что ветвь намагничивания трансформатора в большинстве отечественных литературных источников представляется последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений, а в рассматриваемой модели – параллельным соединением данных элементов.

Основы расчета параметров схемы замещения силового трансформатора, а также особенности расчета линейной модели трансформатора в среде *MatLab/Simulink* изложены в [104, 105]. В каталожных данных [106, 107] указаны номинальные параметры трансформаторов. Далее представлены выражения для расчета параметров блока *Three-phase Transformer (Two Windings)*.

Номинальная мощность каждой фазы трансформатора:

$$S_{\phi\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3}, \quad (3.8)$$

где  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность силового трансформатора.

Фазное напряжение первичной обмотки при соединении «треугольник»:

$$U_{1\phi} = U_{1\text{ном}}, \quad (3.9)$$

где  $U_{1\text{ном}}$  – номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора.

Номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора, соединенной в «треугольник»:

$$I_{1\phi\text{ном}} = \frac{S_{\phi\text{ном}}}{U_{1\phi}}. \quad (3.10)$$

Фазный ток холостого хода трансформатора:

$$I_{0\phi} = \frac{I_0 \cdot I_{1\phi\text{ном}}}{100}, \quad (3.11)$$

где  $I_0$  – ток холостого хода трансформатора.

Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}}. \quad (3.12)$$

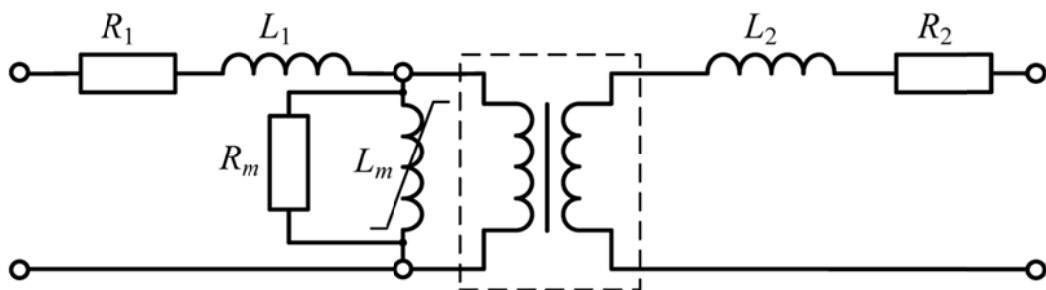


Рисунок 3.9 – Схема замещения модели силового трансформатора в среде *MatLab/Simulink*:  $R_1, L_1$  – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки;  $R_2, L_2$  – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки;  $R_m, L_m$  – активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания

Мощность потерь холостого хода на фазу:

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{3}, \quad (3.13)$$

где  $P_0$  – мощность холостого хода трансформатора.

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{0\phi}}. \quad (3.14)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_m = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0}. \quad (3.15)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$X_m = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0}. \quad (3.16)$$

Фазное напряжение короткого замыкания:

$$U_{к\phi} = \frac{U_{1\phi} \cdot U_k}{100}, \quad (3.17)$$

где  $U_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{к\phi}}{I_{1\phi\text{ном}}}. \quad (3.18)$$

Мощность потерь короткого замыкания на фазу:

$$P_{к\phi} = \frac{P_k}{3}, \quad (3.19)$$

где  $P_k$  – мощность короткого замыкания трансформатора.

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к\phi}}{U_{к\phi} \cdot I_{1\phi\text{ном}}}. \quad (3.20)$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора:

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k. \quad (3.21)$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора:

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k. \quad (3.22)$$

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры ветви намагничивания могут задаваться в относительных единицах. Базисные условия определяются по следующим выражениям [108]:

Базисное значение тока:

$$I_{\text{баз}} = I_{1\text{фном}}. \quad (3.23)$$

Базисное значение сопротивления:

$$R_{\text{баз}} = \frac{U_{1\text{ф}}}{I_{\text{баз}}}. \quad (3.24)$$

Далее находятся активные сопротивления и индуктивности в относительных единицах. Активное сопротивление ветви намагничивания, о.е.:

$$R_{m(\text{о.е.})} = \frac{R_m}{R_{\text{баз}}}. \quad (3.25)$$

Индуктивность ветви намагничивания, о.е.:

$$L_{m(\text{о.е.})} = \frac{X_m}{R_{\text{баз}}}. \quad (3.26)$$

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора, о.е.:

$$R_{1(\text{о.е.})} = R_{2(\text{о.е.})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_k}{R_{\text{баз}}}. \quad (3.27)$$

Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора, о.е.:

$$L_{1(\text{о.е.})} = L_{2(\text{о.е.})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_k}{R_{\text{баз}}}. \quad (3.28)$$

Для исследования переходных процессов при включении ненагруженного трансформатора необходимо располагать нелинейной характеристикой намагничивания. Однако однозначность в оценке ее параметров отсутствует, так как зачастую невозможно учесть индивидуальные особенности трансформаторов различных мощностей и конструкций [103].

В работе [29] предлагается использовать кривую намагничивания для всех типов трансформаторов в виде степенной зависимости:

$$i = B \cdot \psi^b, \quad (3.29)$$

где  $i$  – ток намагничивания;  $\psi$  – потокосцепление;  $B$  – коэффициент пропорциональности;  $b$  – степень кривой намагничивания.

Принимая во внимание особенности расчета характеристики намагничивания, изложенные в [103], в выражении (3.29) степень кривой намагничивания  $b$  принимается равной 11, коэффициент пропорциональности может быть рассчитан по следующим выражениям:

$$B = \frac{i_0}{\Psi_{\text{НОМ}}^b}, \quad (3.30)$$

$$i_0 = I_{0\Phi} \cdot 1,6, \quad (3.31)$$

$$\Psi_{\text{НОМ}} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{1\Phi}}{\omega}, \quad (3.32)$$

где  $\Psi_{\text{НОМ}}$  – номинальное потокосцепление; 1,6 – коэффициент формы кривой тока [29];  $\omega$  – угловая частота.

Параметры кривой намагничивания в относительных единицах [92]:

$$i_{(\text{о.е.})} = \frac{i}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{баз}}}, \quad (3.33)$$

$$\Psi_{(\text{о.е.})} = \frac{\Psi}{\Psi_{\text{баз}}}, \quad (3.34)$$

где  $i_{(\text{о.е.})}$  – ток намагничивания, о.е.;  $\Psi_{(\text{о.е.})}$  – потокосцепление, о.е.;  $\Psi_{\text{баз}} = \Psi_{\text{НОМ}}$  – базисное значение потокосцепления.

Емкости обмоток трансформатора могут быть найдены по следующим выражениям [30]:

$$C_1 = C_{\text{ВН}} = 0,07 \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}^{0,35}}{U_{\text{ВН}}^{0,175}}, \quad (3.35)$$

$$C_2 = C_{\text{НН}} = 1,3 \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{НОМ}}}}{U_{\text{НН}} + 13 + 0,2 \cdot \sqrt{S_{\text{НОМ}}}}, \quad (3.36)$$

$$C_{12} = \frac{\sqrt{S_{\text{НОМ}}}}{U_{\text{ВН}}}, \quad (3.37)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – емкости обмоток высшего и низшего напряжения, нФ;  $C_{12}$  – емкость между обмотками высшего и низшего напряжения, нФ,  $S_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА,  $U_{1\text{НОМ}}$ ,  $U_{2\text{НОМ}}$  – номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора, кВ.

Входная емкость трансформатора может быть определена как:

$$C_{\text{фт}} = C_1 + \frac{C_2 \cdot C_{12}}{C_2 + C_{12}}, \quad (3.38)$$

$$C_{\text{ффт}} = 0,2 \cdot C_{\text{фт}}, \quad (3.39)$$

где  $C_{\text{фт}}$ ,  $C_{\text{ффт}}$  – емкости между фазой и землей и между фазами, приведенные к стороне высшего напряжения трансформатора. Для учета емкости в модели трансформатора использован блок *Three-Phase Parallel RLC Branch*.

На рисунке 3.10 представлены внешний вид и основные параметры модели ненагруженного трансформатора.

### 3.3.4 Модель асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель моделируется при помощи блока *Asynchronous Machine*. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка, и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной ( $dq$ -оси) системы координат. На рисунке 3.11 приведена схема замещения блока *Asynchronous Machine* [12].

Уравнения электрической части машины имеют вид:

$$u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega \cdot \psi_{ds}, \quad (3.40)$$

$$u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \cdot \psi_{qs}, \quad (3.41)$$

$$u'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi'_{dr}, \quad (3.42)$$

$$u'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \psi'_{qr}, \quad (3.43)$$

$$T_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}), \quad (3.44)$$

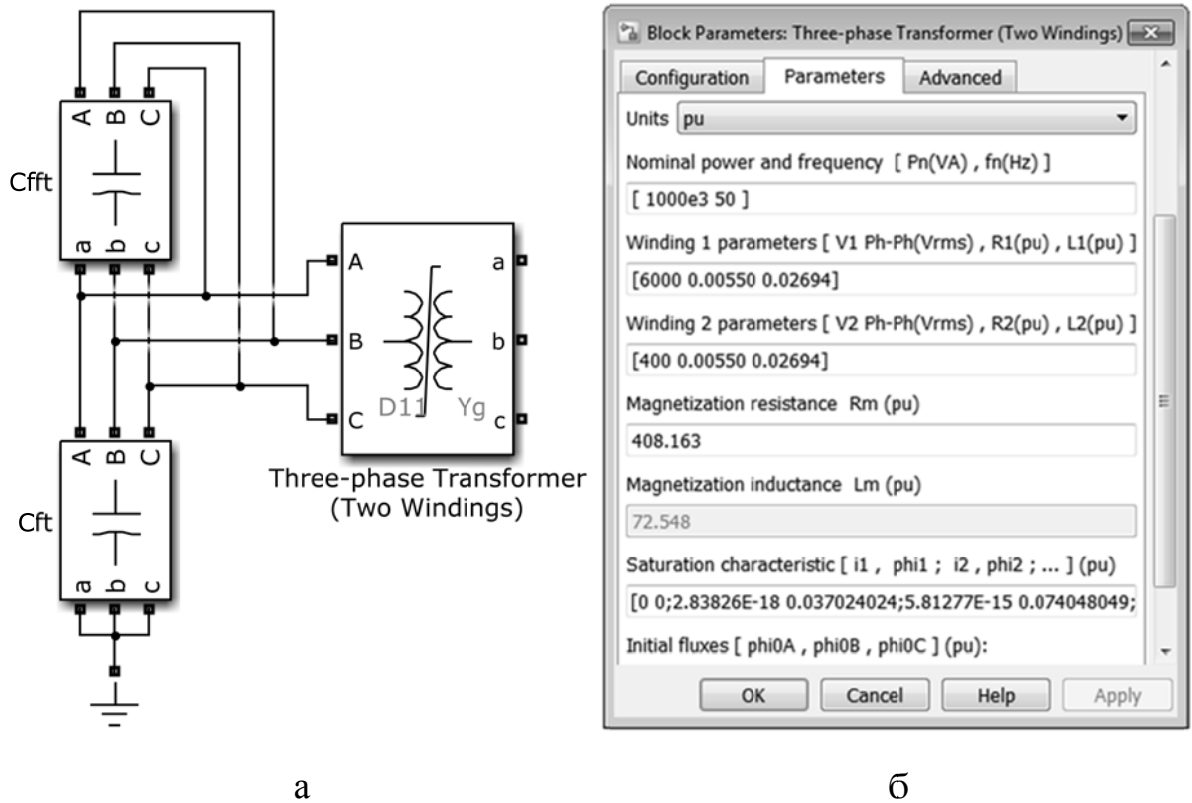


Рисунок 3.10 – Модель ненагруженного трансформатора с учетом нелинейности характеристики намагничивания: а – внешний вид; б – редактор основных параметров

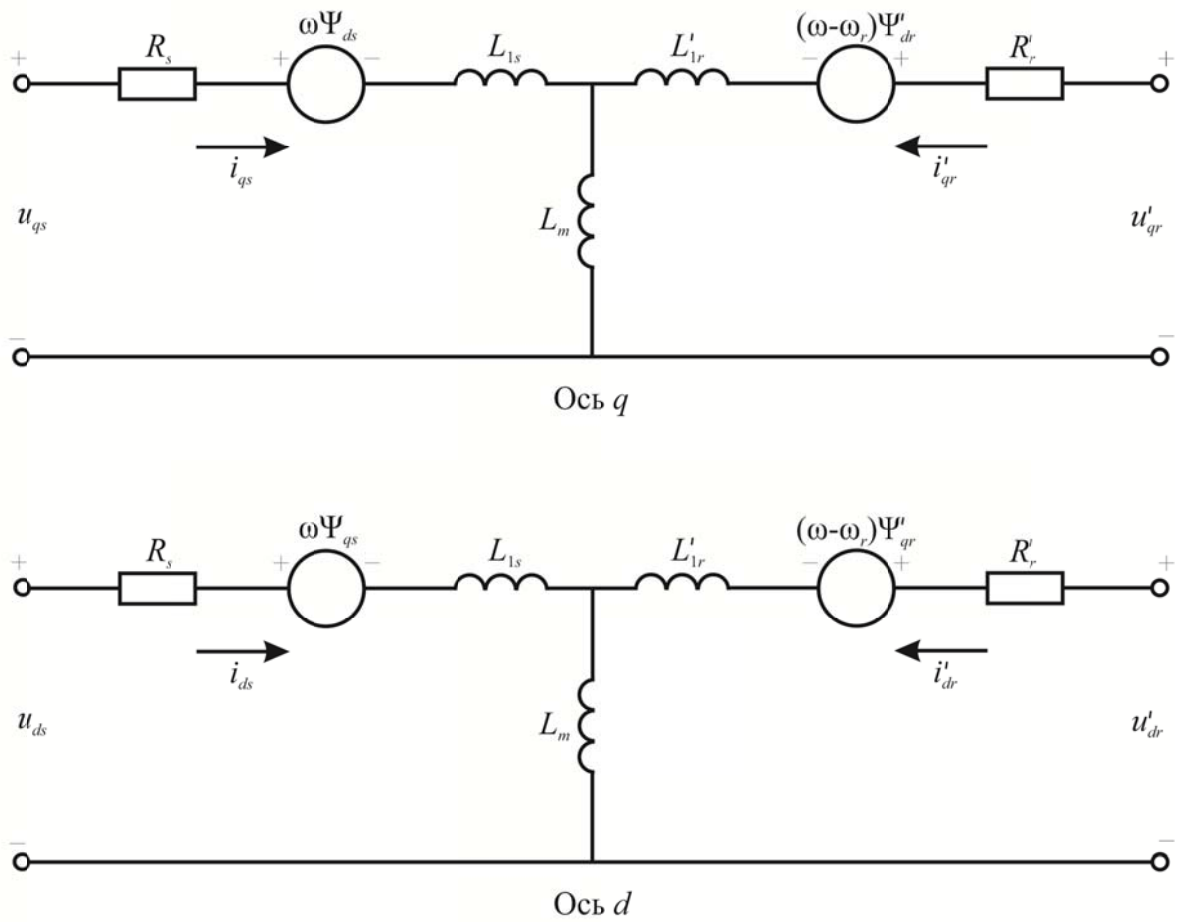


Рисунок 3.11 – Схема замещения модели асинхронного двигателя в среде

*MatLab/Simulink*



где  $u_{qs}$ ,  $i_{qs}$  – проекции напряжения и тока статора на ось  $q$ ;  $R_s$  – активное сопротивление статора;  $\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}$  – проекция потокосцепления статора на ось  $q$ ;  $\omega$  – угловая частота вращения магнитного поля;  $\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}$  – проекция потокосцепления статора на ось  $d$ ;  $u_{ds}$ ,  $i_{ds}$  – проекции напряжения и тока статора на ось  $d$ ;  $u'_{qr}$ ,  $i'_{qr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось  $q$ ;  $R'_r$  – активное сопротивление ротора;  $\psi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i'_{qs}$  – проекция потокосцепления ротора на ось  $q$ ;  $\omega_r$  – электрическая угловая частота вращения ротора;  $\psi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i'_{ds}$  – проекция потокосцепления ротора на ось  $d$ ;  $u'_{dr}$ ,  $i'_{dr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось  $d$ ;  $T_e$  – электромагнитный момент;  $p$  – число пар полюсов;  $L_s = L_{1s} + L_m$  – полная индуктивность статора;  $L'_r = L'_{1r} + L_m$  – полная индуктивность ротора;  $L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;  $L_{1s}$  – индуктивность рассеяния статора;  $L'_{1r}$  – индуктивность рассеяния ротора.

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \cdot \omega_m - T_m), \quad (3.45)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m. \quad (3.46)$$

где  $\omega_m$  – угловая частота вращения ротора;  $H$  – суммарная инерционная постоянная машины и нагрузки;  $F$  – суммарный коэффициент вязкого трения;  $T_m$  – механический момент на валу;  $\theta_m$  – угловое положение ротора.

Параметры блока *Asynchronous Machine* рассчитываются по выражениям, представленным в [92]. Номинальное фазное напряжение при соединении обмоток в звезду:

$$U = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}}, \quad (3.47)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное линейное напряжение, В.

Скорость вращения магнитного поля, об/мин:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (3.48)$$

где  $p$  – число пар полюсов,  $f_1$  – частота сети, равная 50 Гц.

Номинальное скольжение, о.е.:

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1}, \quad (3.49)$$

где  $n_{\text{НОМ}}$  – номинальная скорость вращения вала, об/мин.

Критическое скольжение, о.е.:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \left( m_{\text{max}} + \sqrt{m_{\text{max}}^2 - 1} \right), \quad (3.50)$$

где  $m_{\text{max}}$  – кратность максимального момента, о.е.

Скорость вращения магнитного поля, рад/с:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}. \quad (3.51)$$

Номинальная угловая скорость вращения вала, рад/с:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30}. \quad (3.52)$$

Номинальный момент, Н·м:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \quad (3.53)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность двигателя, Вт.

Максимальный момент, Н·м:

$$M_{\text{max}} = m_{\text{max}} \cdot M_{\text{НОМ}}, \quad (3.54)$$

где  $m_{\text{max}}$  – кратность максимального момента, о.е.

Пусковой момент, Н·м:

$$M_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{НОМ}}, \quad (3.55)$$

где  $m_{\text{п}}$  – кратность пускового момента, о.е.

Механические потери, Вт:

$$P_{\text{мех}} = (0,01 - 0,05) \cdot P_{\text{НОМ}}. \quad (3.56)$$

Расчетный коэффициент (меньше для машин большей мощности):

$$C = 1,01 - 1,05. \quad (3.57)$$

Приведенное активное сопротивление ротора, Ом:

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{НОМ}} + P_{\text{мех}}}{I_{\text{НОМ}}^2 \frac{1 - S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}}}, \quad (3.58)$$

где  $I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток статора, А.

Активное сопротивление статора, Ом:

$$R_s = \frac{U \cdot \cos\varphi(1 - \eta)}{I_{\text{НОМ}}} - C^2 R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3 \cdot I_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.59)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия, о.е.;  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности, о.е.

Приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot k_I \cdot I_{\text{НОМ}}}, \quad (3.60)$$

где  $k_I$  – кратность пускового тока, о.е.

Индуктивность статора, Гн

$$L_s = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot M_{\text{max}}}{p \cdot U} \cdot \frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{кр}}}}. \quad (3.61)$$

Индуктивность цепи намагничивания, Гн:

$$L_m = L_s - L_{sp}. \quad (3.62)$$

По окончании расчета определяется расчетный коэффициент:

$$C_1 = 1 + \frac{L_{sp}}{L_m}. \quad (3.63)$$

Далее  $C_1$  сравнивается с ранее принятым коэффициентом  $C$ . При необходимости расчет следует повторить, добиваясь минимальной разницы между  $C_1$  и  $C$ .

Параметры, рассчитанные по выражениям (3.47 – 3.63) дают хорошие результаты моделирования нормального режима работы двигателя, однако в пусковом режиме имеет место завышенное значение пускового тока. При увеличении скольжения активное сопротивление и индуктивность двигателя вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора будут изменяться. Сопротивления двигателя в режиме пуска определяются по методике, изложенной в [109].

Блок *Asynchronous Machine* не учитывает емкостей обмоток двигателя, поэтому использовались дополнительные емкости, моделируемые соответствующими блоками. Входную емкость двигателя можно определить из выражений [30, 101]:

$$C_{\text{фдв}} = 0,4 \cdot \sqrt{P_{\text{ном}}}, \quad (3.64)$$

$$C_{\text{ффдв}} = 0,1 \cdot C_{\text{фдв}}, \quad (3.65)$$

где  $C_{\text{фдв}}$ ,  $C_{\text{ффдв}}$  – емкости между фазой и землей и между фазами двигателя, нФ;  
 $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность двигателя, кВт.

На основании вышеизложенного получена модель асинхронного электродвигателя в среде *MatLab/Simulink*, внешний вид и основные параметры которой представлены на рисунке 3.12.

### 3.3.5 Модель конденсаторной батареи

Моделирование конденсаторной батареи 6 (10) кВ осуществлялось при помощи стандартного блока *Three-Phase Parallel RLC Load*. Модель конденсаторной батареи и основные параметры блока представлены на рисунке 3.13.

Блок представляет собой трехфазную цепь, состоящую из трех параллельно соединенных резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через трехфазную мощность нагрузки (или отдельно для каждой фазы) при номинальном напряжении и частоте. В блоке имеется возможность выбора схемы соединения элементов цепи (треугольник, звезда) и режима работы нейтрали.

Согласно [110] конденсаторные установки напряжением выше 1 кВ должны оснащаться разрядными устройствами в виде трансформатора напряжения или устройства с активно-индуктивным сопротивлением. Параметры разрядного устройства могут быть рассчитаны по методике, изложенной в [111].

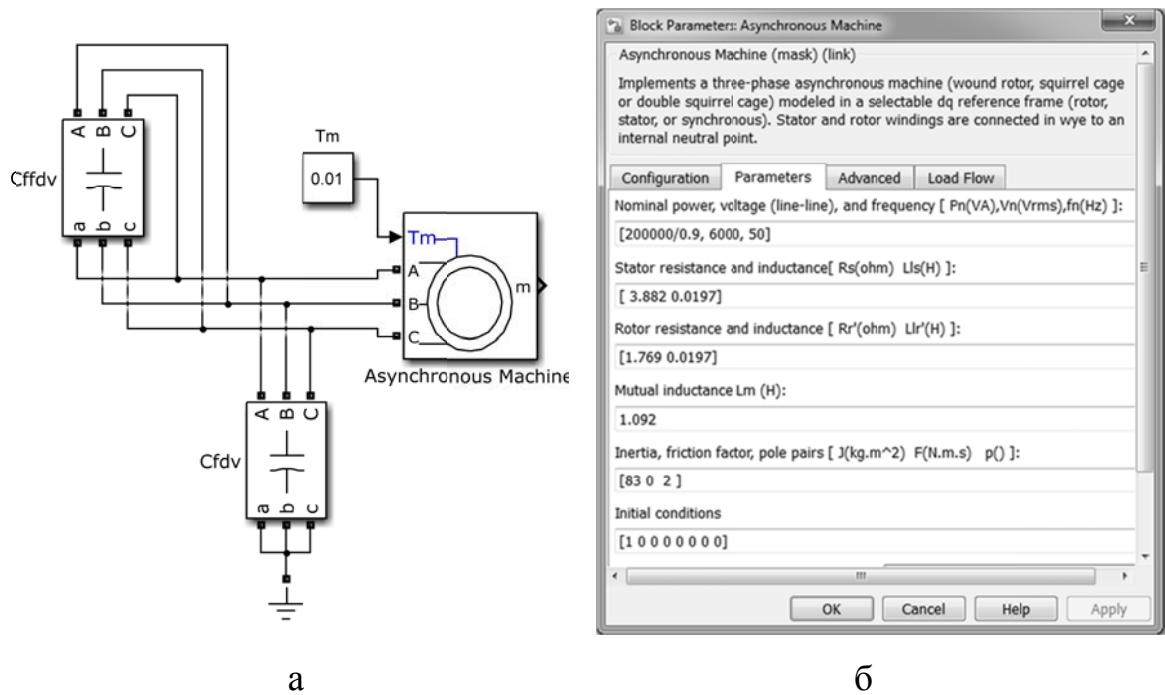


Рисунок 3.12 – Модель высоковольтного асинхронного электродвигателя в пусковом режиме: а – внешний вид; б – редактор основных параметров

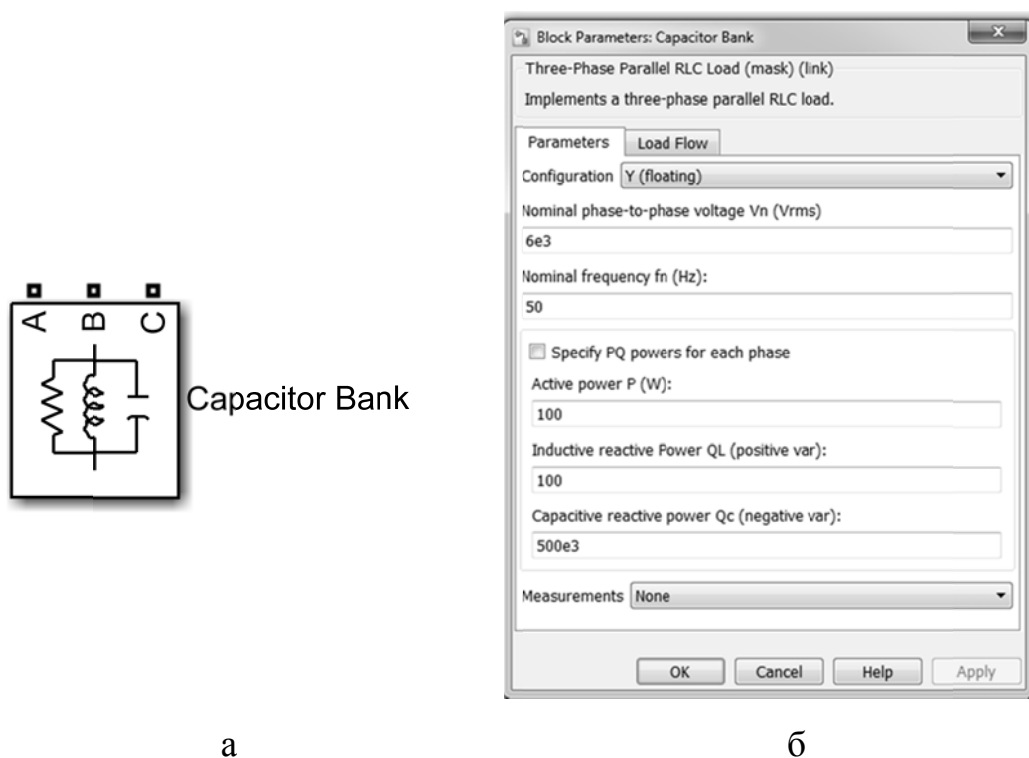


Рисунок 3.13 – Модель конденсаторной батареи 6 (10) кВ: а – внешний вид; б – редактор основных параметров

Трехфазные мощности, задаваемые в блоке *Three-Phase Parallel RLC Load*, могут быть определены по следующим выражениям:

$$Q_C = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C, \quad (3.66)$$

$$P = 3 \cdot \frac{U^2}{R}, \quad (3.67)$$

$$Q_L = 3 \cdot \frac{U^2}{\omega \cdot C}, \quad (3.68)$$

где  $P$ ,  $Q_L$  – активная и реактивная мощность разрядного устройства;  $Q_C$  – реактивная мощность конденсатора;  $\omega$  – угловая частота;  $U$  – фазное напряжение конденсаторной установки.

Общий вид модели электрической сети 6 (10) кВ для исследования переходных процессов при коммутации различных реактивных нагрузок представлен на рисунке 3.14.

### 3.4 Апробация и верификация предложенных моделей

Проверка работоспособности и адекватности разработанной имитационной модели электрической сети 6 (10) кВ при коммутации реактивных нагрузок выполнено на основе сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, представленными в [4, 29, 39, 71], и литературными данными, приведенными в [14, 15, 17, 18].

В работе [39] представлены экспериментальные данные отключения ненагруженного трансформатора напряжением 6 кВ мощностью 630 кВА вакуумным выключателем. Отмечается, что трансформатор подключен к выключателю через кабельную линию длиной не более 2 м. Результаты сравнения осциллограмм напряжений при отключении ненагруженного трансформатора, полученных по экспериментальным данным и на модели, представлены на рисунке 3.15.

Включение ненагруженного трансформатора любыми типами выключателей может сопровождаться бросками тока намагничивания до  $(6 - 10) \cdot I_{ном}$ .

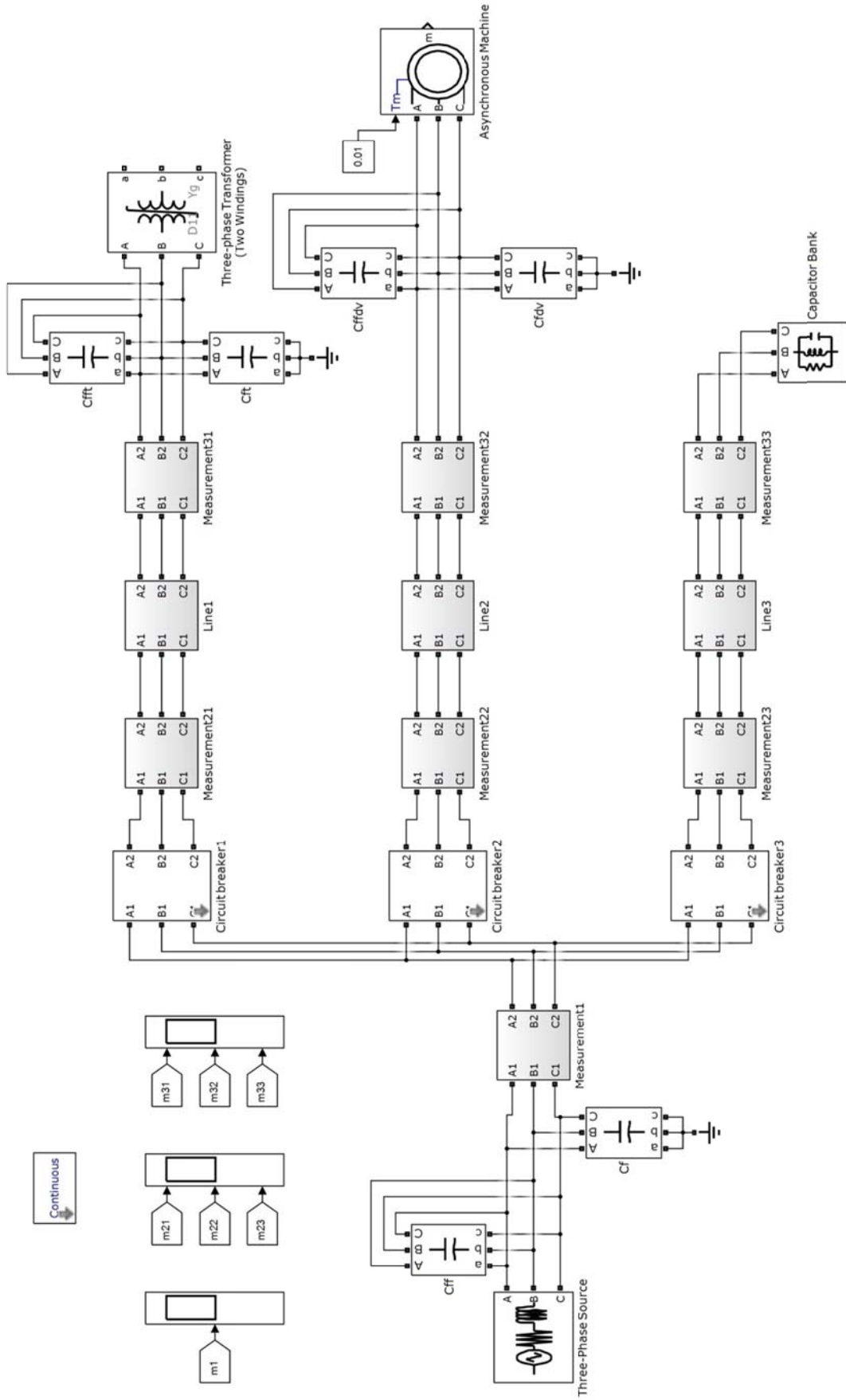
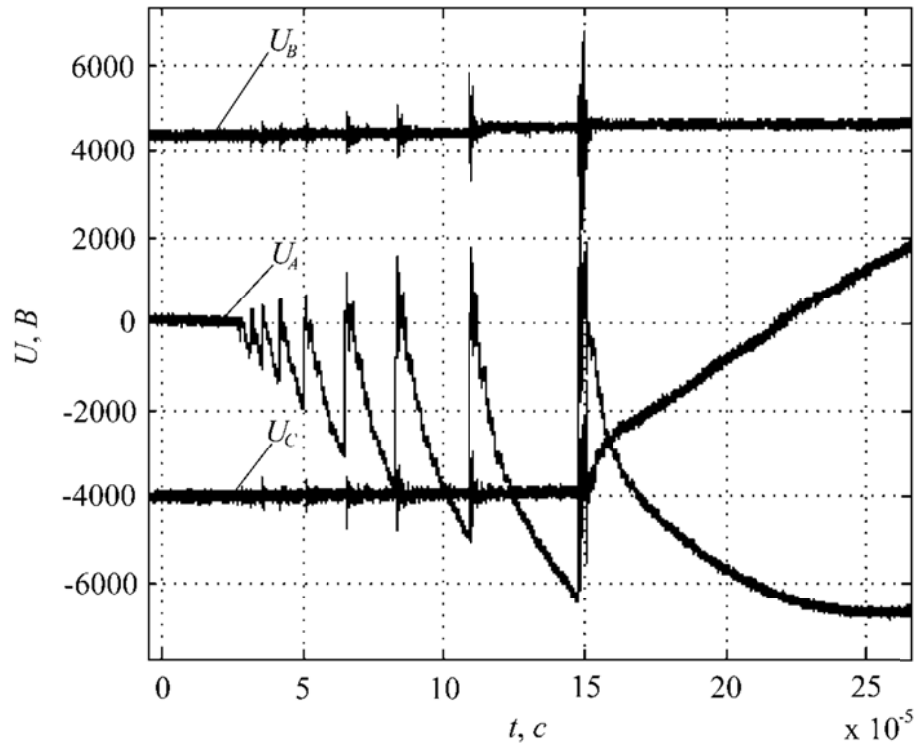
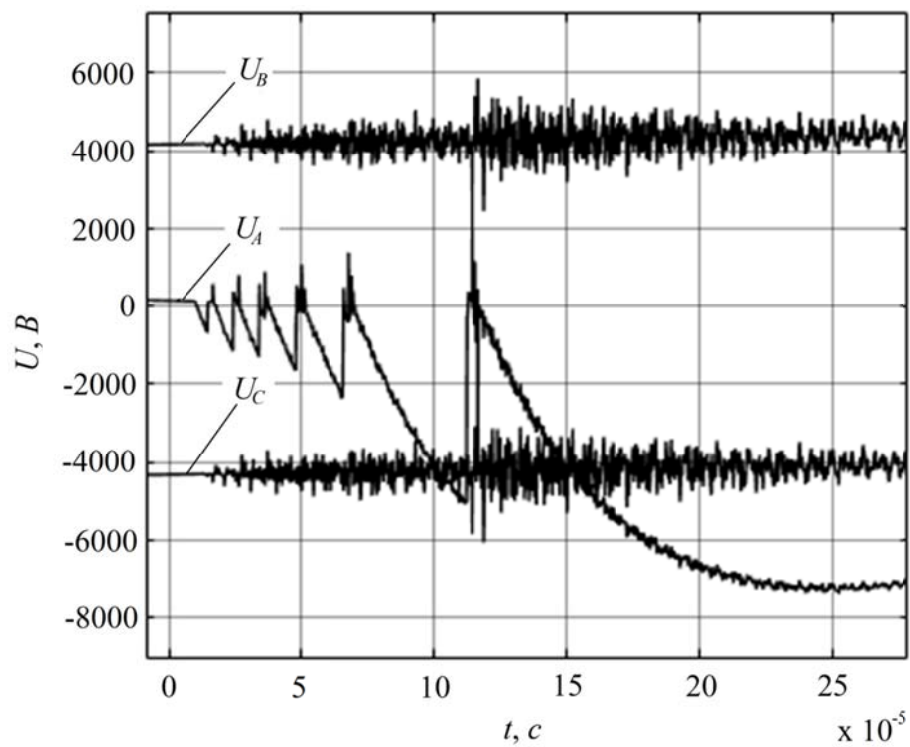


Рисунок 3.14 – Общий вид модели электрической сети 6 (10) кВ



а



б

Рисунок 3.15 – Напряжения при отключении ненагруженного трансформатора: а – по экспериментальным данным; б – по результатам моделирования



Затухание броска тока намагничивания может проходить несколько секунд [17, 18]. Осциллограммы токов при включении ненагруженного трансформатора 630 кВА / 6 кВ, полученные на модели, изображены на рисунке 3.16. Бросок тока намагничивания в фазе *A* по результатам моделирования составляет 450 А, что в 7,4 раза больше номинального тока трансформатора.

На рисунке 3.17, а [29] приведены экспериментальные осциллограммы напряжений при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя напряжением 6 кВ мощностью 200 кВт вакуумным выключателем. Длина кабельной линии между двигателем и выключателем составляет 100 м. Для сравнения на рисунке 3.17, б показаны осциллограммы напряжений, выполненные с помощью модели для условий этого эксперимента.

Экспериментальные осциллограммы процесса включения электродвигателя (напряжение 10 кВ, мощность 2000 кВт, длина кабеля 290 м) вакуумным выключателем представлены на рисунке 3.18, а. [4] Соответствующие кривые, полученные при помощи имитационного моделирования, приведены на рисунке 3.18, б.

Отключение конденсаторной батареи без возникновения повторных пробоев в выключателе не создает высоких уровней перенапряжений [14, 71], что подтверждается в п. 4.4.1. Включение конденсаторной батареи может сопровождаться броском тока до 30 раз больше номинального тока батареи [14, 15]. На рисунке 3.19 представлены кривые токов при моделировании процесса включения конденсаторной установки напряжением 6 кВ мощностью 500 кВар. По результатам моделирования бросок тока в фазе *B* достигает значения 940 А, что в 19,5 раз больше номинального тока конденсаторной батареи.

Результаты, полученные по предложенной модели электрической сети 6 (10) кВ, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках.

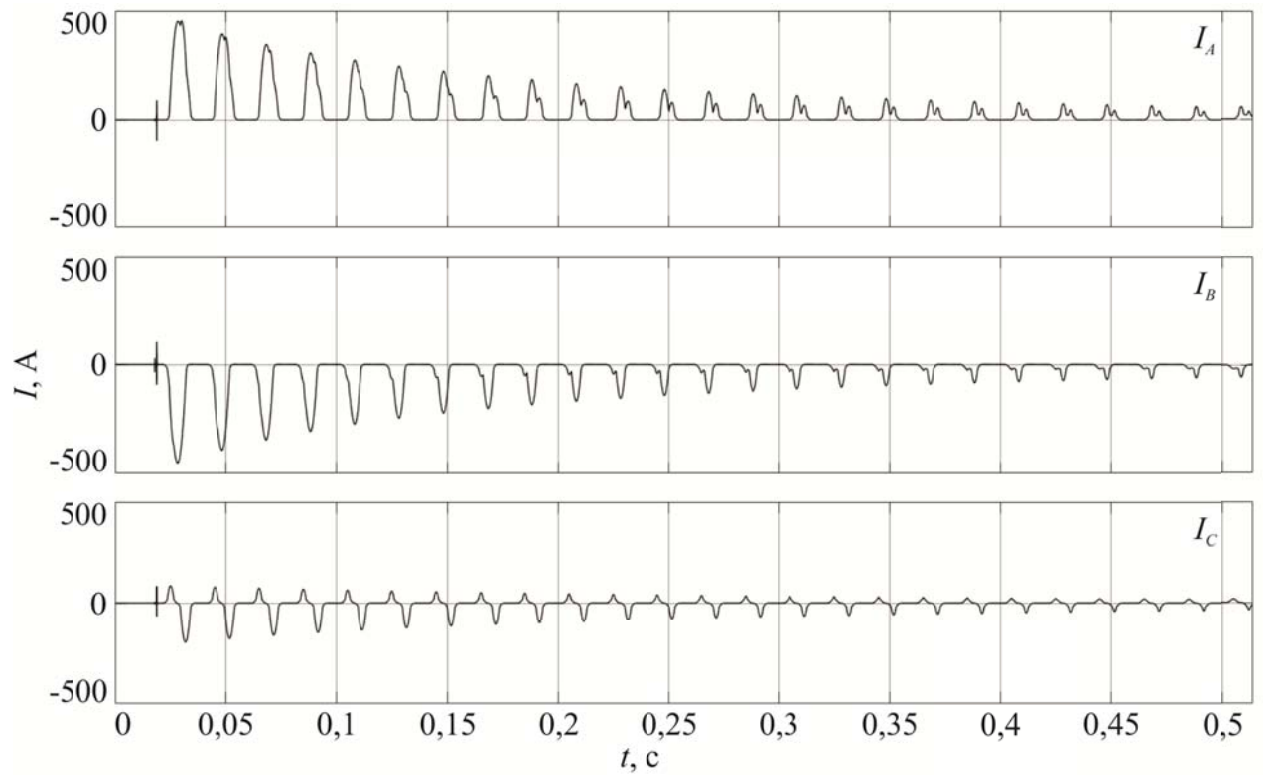
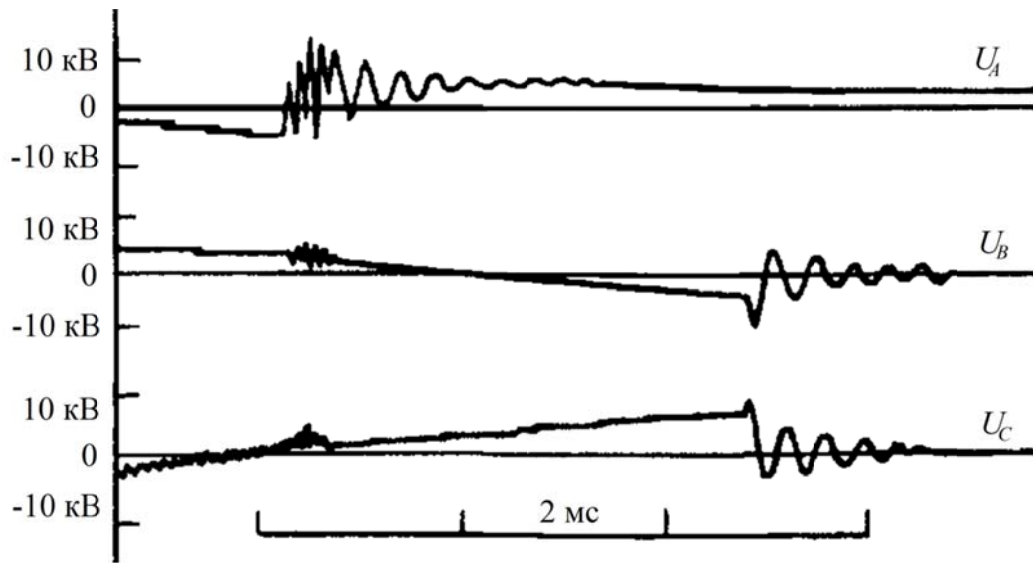
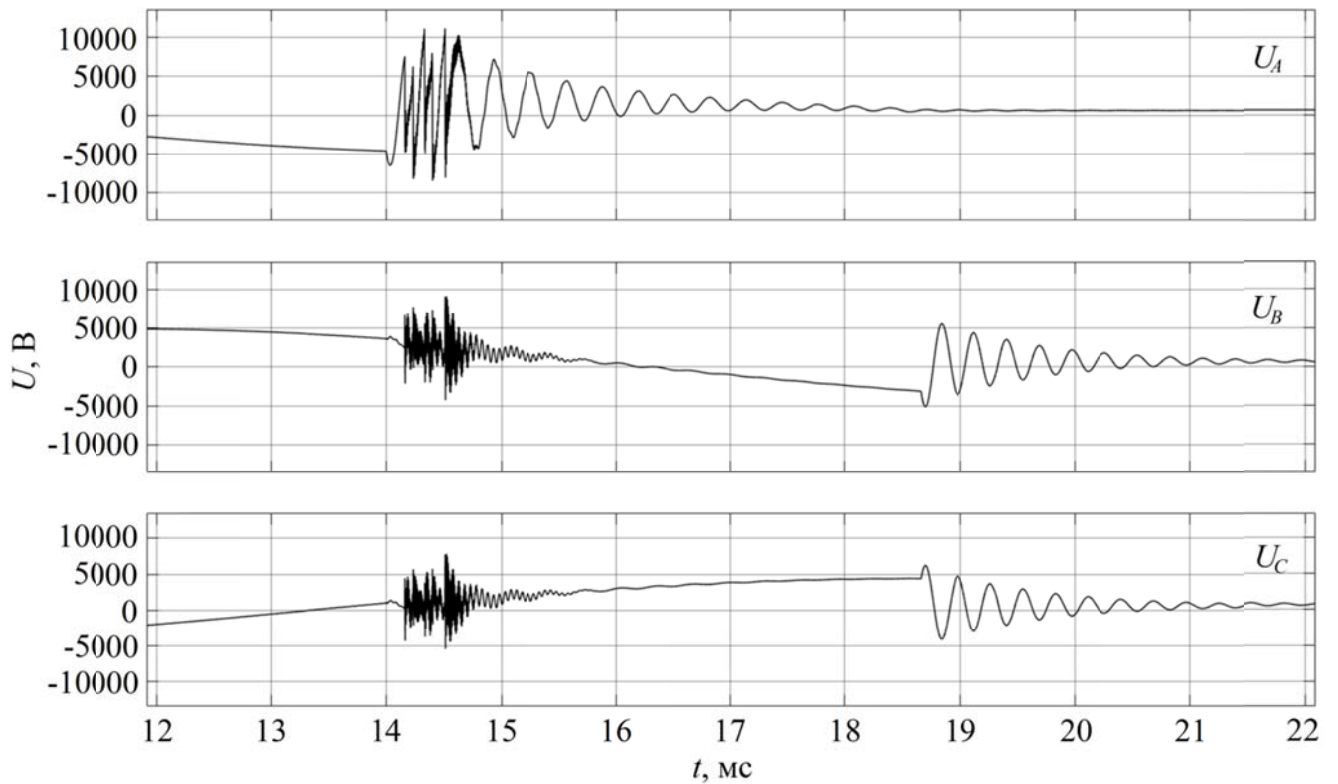


Рисунок 3.16 –Токи при включении ненагруженного трансформатора, полученные на модели

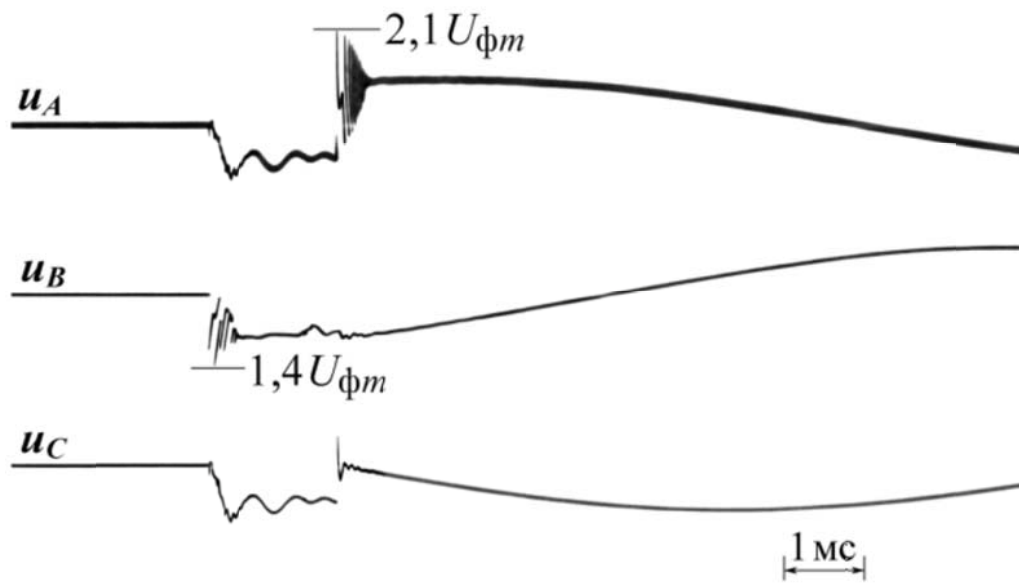


а

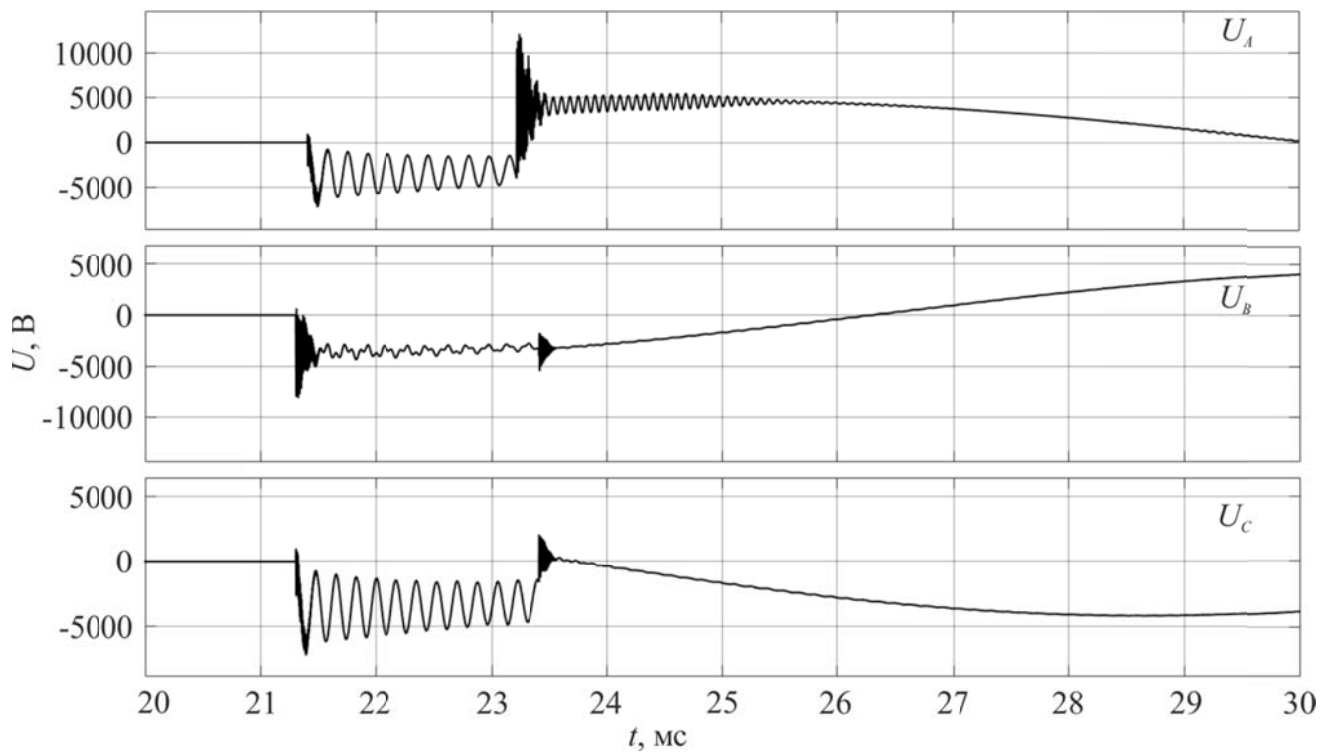


б

Рисунок 3.17 – Напряжения при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя: а – по экспериментальным данным; б – по результатам моделирования



а



б

Рисунок 3.18 – Напряжения при включении электродвигателя: а – по экспериментальным данным; б – по результатам моделирования

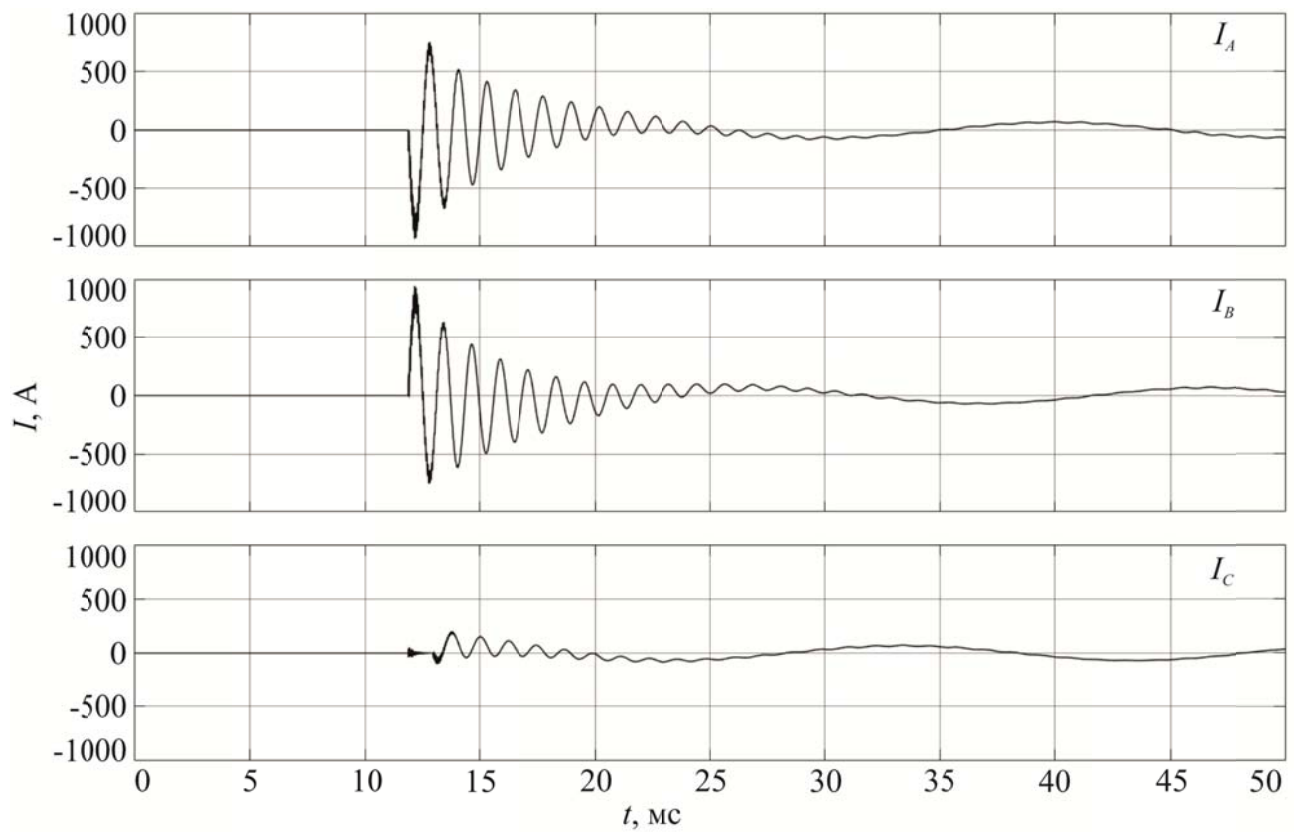


Рисунок 3.19 –Токи при включении разряженной конденсаторной батареи

### 3.5 Выводы

По данной главе можно сделать следующие выводы:

1. Разработана имитационная модель электрической сети 6 (10) кВ систем электроснабжения, позволяющая исследовать переходные процессы, возникающие при коммутациях вакуумными выключателями трансформаторов, конденсаторных батарей, электродвигателей.

2. Разработана имитационная модель синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ, учитывающая явления, характерные для реальных вакуумных выключателей: предпробой, срез тока, повторные зажигания дуги, виртуальные срезы тока. Модель предусматривает возможность осуществления коммутаций полюсов выключателя в произвольной последовательности, что позволяет реализовать принципы управляемой коммутации в электрической сети 6 (10) кВ систем электроснабжения.

3. Выполнена апробация и верификация разработанных имитационных моделей. Результаты, полученные по предложенным моделям, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕУПРАВЛЯЕМОЙ И УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 (10) КВ

### 4.1 Постановка задачи

Несмотря на наличие проведенных исследований и реализованных устройств управляемой коммутации переходные процессы в электрических сетях 6 (10) кВ при разновременном срабатывании полюсов выключателя недостаточно изучены. Данная глава посвящена комплексному исследованию, целью которого является изучение процессов коммутации, разработка оптимальных алгоритмов коммутации, анализ эффективности и определение области применения синхронного вакуумного выключателя в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения.

Коммутация фаз выключателя по оптимальным алгоритмам в строго заданные моменты времени связана с большими трудностями, так как современные синхронные аппараты имеют разбросы в работе каждого полюса. Однако при некотором разбросе времени срабатывания контактов выключателя управляемая коммутация все также позволяет эффективно снижать перенапряжения или броски тока. Таким образом, важнейшей задачей исследования является определение допустимых разбросов в работе синхронного вакуумного выключателя при коммутации различных реактивных элементов электрической сети.

Для проведения исследования приняты следующие параметры выключателя: срез тока до его естественного перехода через ноль – 5 А; скорость изменения электрической прочности межконтактного промежутка – 50 кВ/мс; максимальная скорость перехода высокочастотного тока через ноль, при которой возможно погасание дуги – 75 А/мкс.

## 4.2 Моделирование переходных процессов при коммутации трансформаторов и разработка оптимальных алгоритмов коммутации

### 4.2.1 Отключение трансформаторов

При коммутации трансформаторов наиболее вероятно появление опасных перенапряжений в случае отключения токов холостого хода ненагруженных трансформаторов. Основной особенностью таких коммутаций является высокая вероятность практически мгновенного обрыва тока после начала размыкания контактов, что связано с низкими амплитудами токов холостого хода трансформаторов, которые меньше значений среза тока выключателей. Эта особенность обуславливает низкую начальную электрическую прочность межконтактного промежутка, что в свою очередь влечет высокую вероятность возникновения повторных зажиганий дуги и высокочастотных перенапряжений.

При неизменных параметрах вакуумного выключателя основными факторами, влияющими на переходной процесс, являются соотношение индуктивности, емкости и активного сопротивления отключаемого элемента электрической сети. Они в свою очередь зависят от мощности трансформатора и длины питающей линии. На рисунке 4.1 представлены результаты моделирования отключения ненагруженного трансформатора с соединением в треугольник первичной обмотки при варьировании его мощности и длины линии.

Из полученных результатов видно, что кратности перенапряжений возрастают при увеличении мощности трансформатора и уменьшении длины питающей линии. Максимальные перенапряжения возникают при отключении ненагруженного трансформатора 2500 кВА и составляют  $3,3 \cdot U_{\text{фм}}$ . Полученные уровни перенапряжений не превышают допустимых значений, однако могут вызывать постепенное снижение электрической прочности изоляции трансформатора путем многократного воздействия на нее. При этом в большинстве случаев отключение ненагруженных трансформаторов сопровождается множественными повторными зажиганиями дуги (рисунок 4.2),



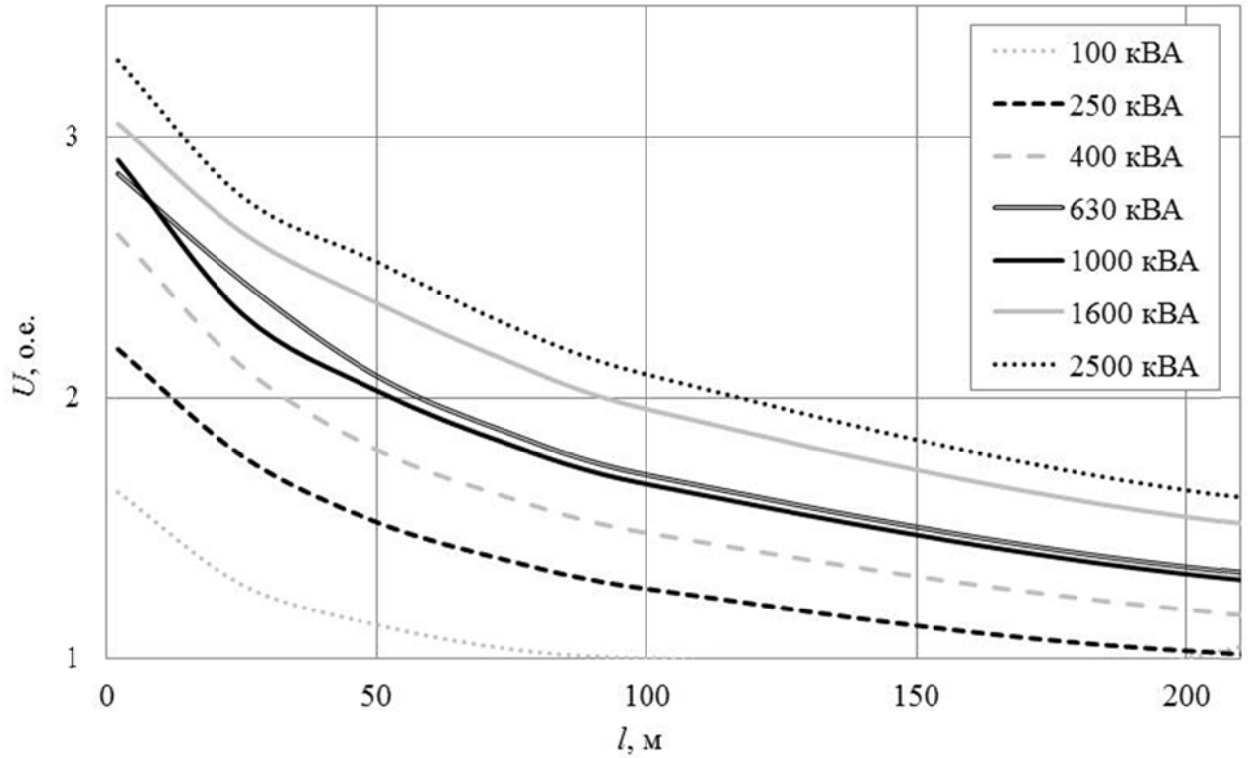


Рисунок 4.1 – Максимальные напряжения при отключении ненагруженных трансформаторов разной мощности и варьировании длины питающей линии

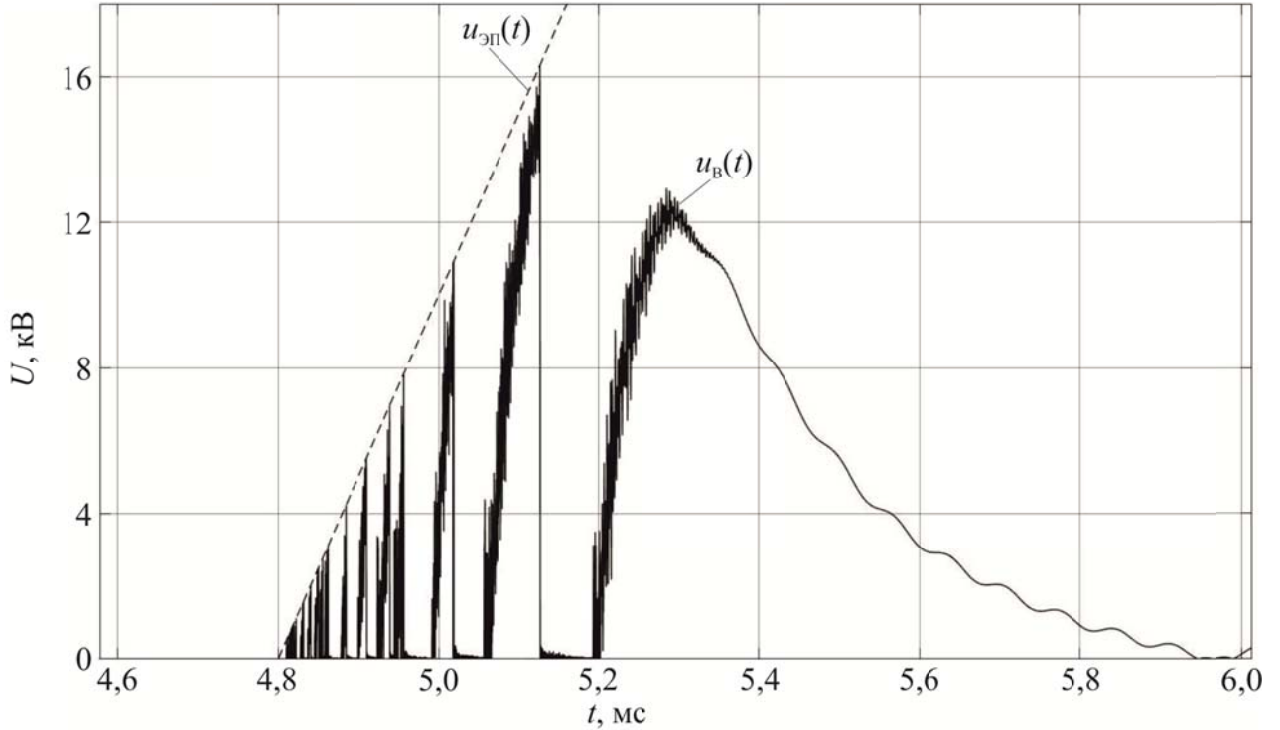


Рисунок 4.2 – Напряжение между контактами выключателя при отключении ненагруженного трансформатора 2500 кВА:  $u_{\text{В}}(t)$  – восстанавливающееся напряжение;  $u_{\text{ЭП}}(t)$  – электрическая прочность межконтактного промежутка

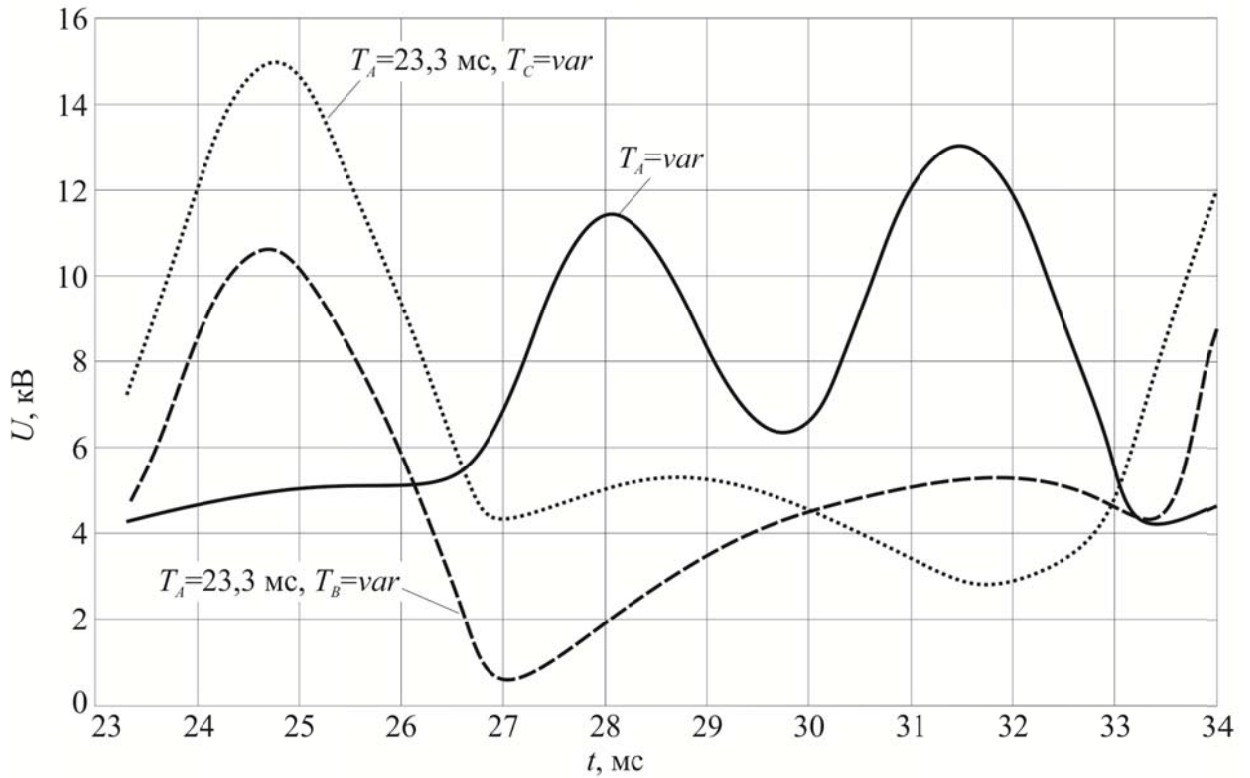
что ведет к возникновению срезов напряжения, амплитуда которых может достигать значительной величины (на рисунке 4.2 повторные зажигания сопровождаются срезом напряжения амплитудой порядка 16 кВ), а распределение таких волн напряжения вдоль обмотки имеет крайне неравномерный характер. Это обстоятельство негативно сказывается на витковой изоляции и может вывести трансформатор из строя.

Таким образом, при разработке алгоритмов управляемого отключения трансформаторов целесообразно принять в качестве критерия оптимальности минимизацию перенапряжений и отсутствие повторных зажиганий дуги.

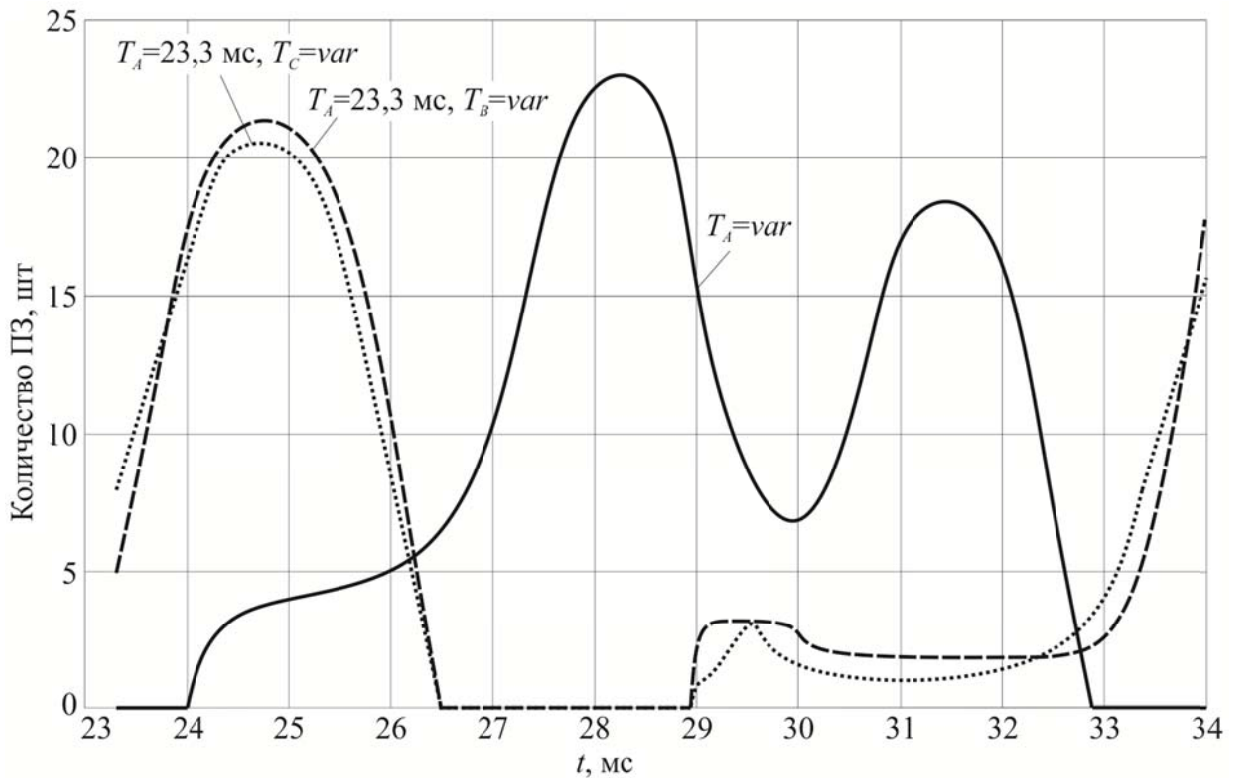
Количество возможных комбинаций порядка размыкания полюсов выключателя равно тринадцати. Из них одна относится к одновременному размыканию трех полюсов, шесть – к одновременному размыканию двух полюсов, шесть – к разновременному размыканию полюсов выключателя. При одновременном отключении трех фаз вакуумного выключателя в любой момент времени наблюдаются повторные зажигания дуги, что говорит о невозможности реализации оптимального алгоритма отключения в этом случае. При одновременном размыкании только первых двух полюсов выключателя повторные зажигания дуги также возникают при любом моменте времени отключения, что может быть объяснено наличием тока в одной из двух отключаемых фаз в момент размыкания контактов.

Учитывая вышесказанное, а также аналогичность развития переходных процессов при использовании некоторых комбинаций коммутации, достаточно рассмотреть две последовательности размыкания полюсов выключателя, на основе которых возможна реализация оптимальных алгоритмов отключения трансформаторов: *A-B-C*, *A-C-B*.

Поиск оптимального алгоритма отключения трансформаторов осуществляется варьированием времени коммутации полюсов выключателя. На рисунке 4.3 представлены уровни перенапряжений и количество повторных зажиганий дуги, соответственно, при размыкании полюсов аппарата в разные



а



б

Рисунок 4.3 – 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

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 ( $T_A = [22,9 ; 24,0]$  мс). Сравнение полученных зависимостей  $T_A = var$  (рисунок 4.3) с осциллограммами напряжения и тока в фазе  $A$  ненагруженного трансформатора (рисунок 4.4), говорит о том, что форма кривых обусловлена главным образом мгновенными значениями тока и характером изменения напряжения (возрастание или убывание) в момент коммутации. Временная зона, коммутации в которой характеризуются наименьшими перенапряжениями и не сопровождаются повторными зажиганиями дуги, соответствует наименьшим значениям тока трансформатора. Таким образом, момент времени размыкания первого полюса выключателя (а также последующих) необходимо приблизить к моменту перехода тока через ноль.

Далее при неизменном моменте времени коммутации фазы  $A$  ( $T_A = 23,3$  мс, что соответствует моменту перехода тока через ноль) производится отключение второго полюса выключателя ( $T_B = var$  по алгоритму  $A-B-C$  или  $T_C = var$  по алгоритму  $A-C-B$ ). Как видно из рисунка 4.3 повторные зажигания дуги не наблюдаются при коммутации второй фазы в промежутках времени  $T_B = T_C = [26,5 ; 28,9]$  мс, что соответствует области вблизи нулевого значения токов в этих фазах.

В электрических сетях 6 (10) кВ с изолированной нейтралью при обрыве тока в двух фазах, ток в третьей фазе также становится равен нулю. Поэтому отключение последней фазы может быть выполнено после размыкания второго полюса выключателя. А так как после отключения первой фазы токи в оставшихся фазах становятся равными друг другу и противоположно направленными, то в предельном случае возможно одновременное отключение фаз  $B$  и  $C$ , что соответствует алгоритму  $A-BC$ .

Осциллограммы напряжений и токов при управляемом отключении трансформатора по алгоритму  $A-B-C$  представлены на рисунке 4.5. Отключение

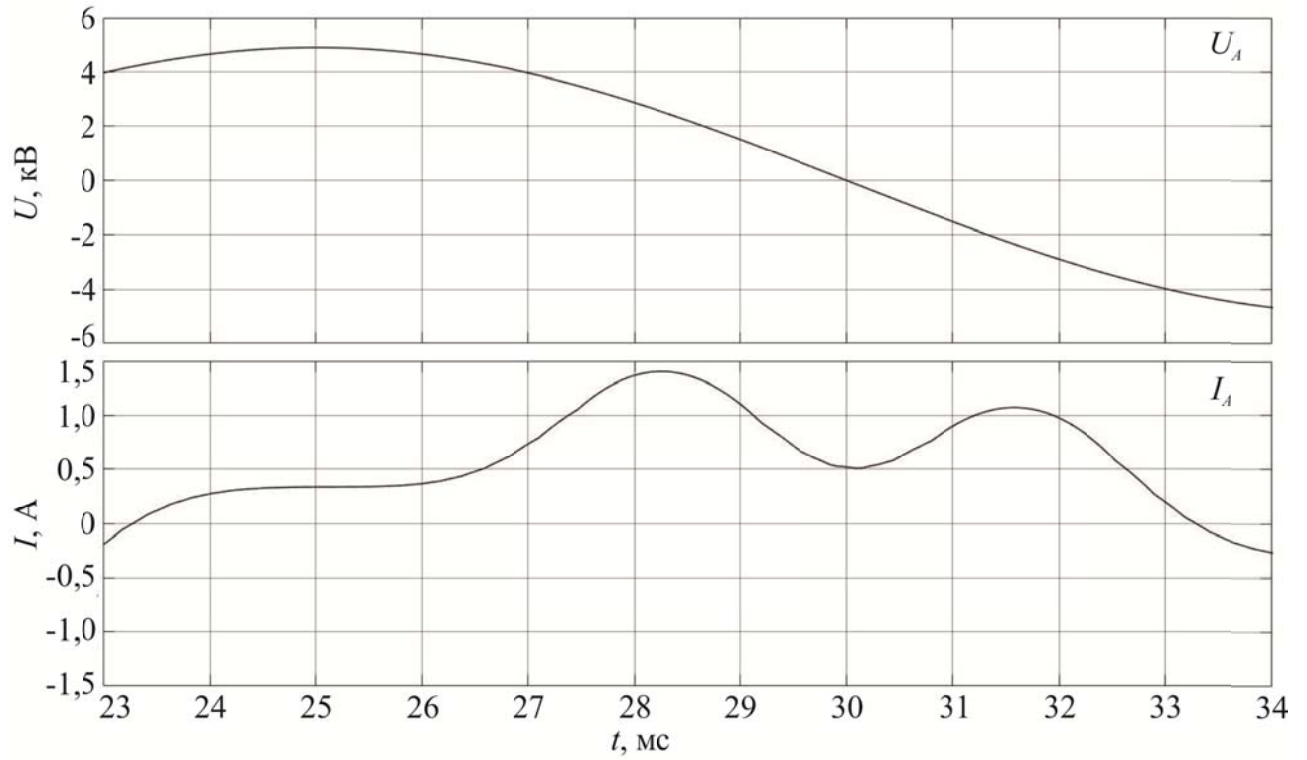


Рисунок 4.4 – Напряжение и ток в фазе  $A$  ненагруженного трансформатора  
1000 кВА

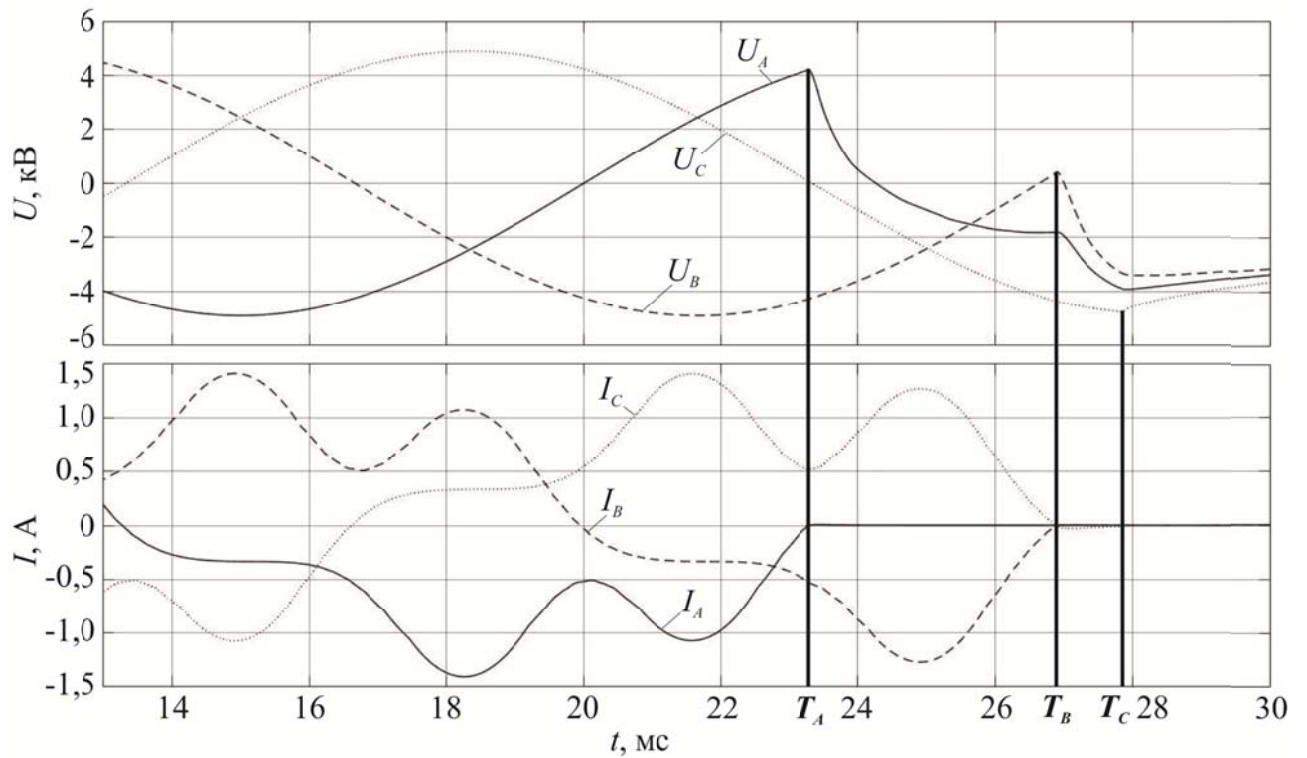


Рисунок 4.5 – Управляемое отключение ненагруженного трансформатора  
1000 кВА по алгоритму  $A-B-C$

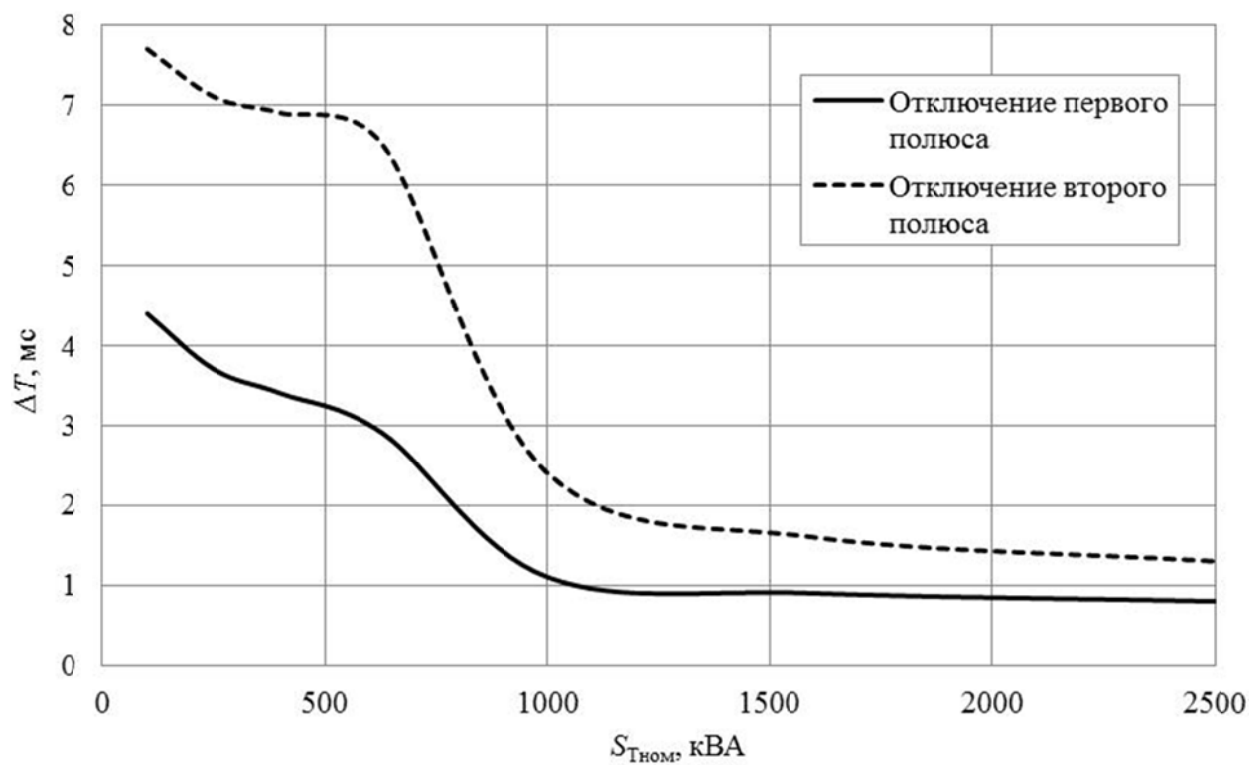
производится в моменты перехода токов в фазах через ноль, чему соответствуют  $T_A = 23,3$  мс,  $T_B = 26,8$  мс,  $T_C = 27,8$  мс.

Определение допустимых разбросов срабатывания полюсов выключателя при отключении трансформаторов связано с выявлением временного промежутка, при коммутации внутри которого не возникают повторные зажигания дуги. Для решения данной задачи применялись выше упомянутые алгоритмы управляемой коммутации:  $A-B-C$  и  $A-C-B$ . Расчетные значения допустимых разбросов при варьировании мощности трансформатора и в зависимости от скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка представлены на рисунке 4.6.

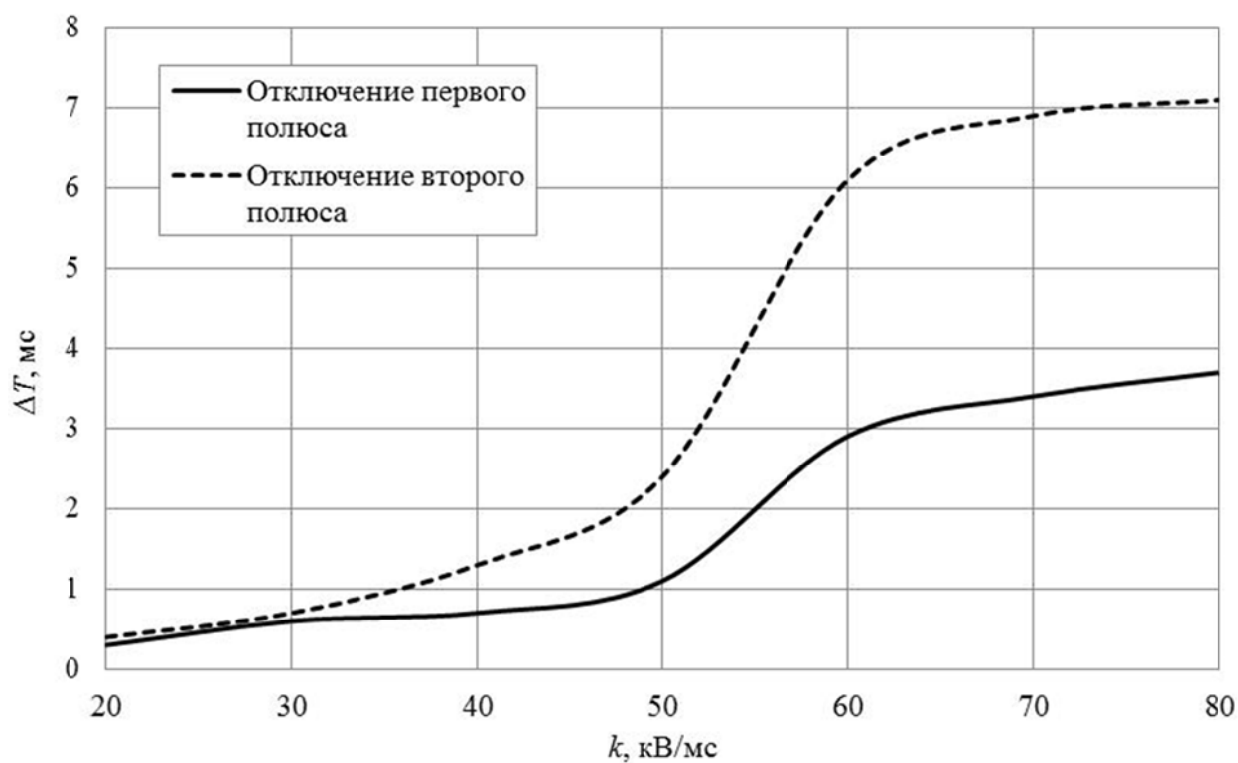
Наиболее высокие требования к точности управления предъявляются при отключении трансформаторов большей мощностью. Допустимый разброс срабатывания первого полюса выключателя (фазы  $A$ ) при отключении ненагруженного трансформатора 2500 кВА составляет 0,8 мс. Допустимый разброс при отключении второго полюса (фазы  $B$  или  $C$ ) в этом случае составляет 1,3 мс. 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, при этом происходит значительное увеличение допустимого разброса момента отключения второго полюса. Это обстоятельство позволяет найти оптимальную конструкцию синхронного вакуумного выключателя с точки зрения скорости перемещения подвижного контакта и точности срабатывания полюсов аппарата.

Из рисунка 4.6 видно, что требования к точности срабатывания полюсов синхронного выключателя для рассматриваемых алгоритмов одинаковы, однако предпочтение следует отдать отключению по алгоритму  $A-B-C$ , так как при работе по данному алгоритму возникают меньшие перенапряжения (рисунок 4.3).



а



б

Рисунок 4.6 – Допустимые разбросы времени срабатывания полюсов синхронного выключателя в зависимости от мощности трансформатора (а) и скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка (б)

Отключение последнего полюса выключателя должно быть осуществлено после размыкания второго полюса и окончания переходных процессов. С точки зрения снижения остаточного магнитного потока, коммутация последнего полюса может быть проведена в области максимального напряжения на этой фазе, что позволит облегчить режим включения трансформатора.

#### 4.2.2 Включение трансформаторов

При подключении силовых трансформаторов к электрической сети могут возникать значительные броски тока намагничивания, величина которых в несколько раз превышает номинальные токи коммутируемых трансформаторов. Наличие таких токов может приводить к снижению ресурса силового трансформатора, вследствие возникновения больших электродинамических усилий в его обмотках. Также токи намагничивания имеют сложный гармонический состав, что может негативно воздействовать на связанное с трансформатором оборудование, на работу узла нагрузки в целом и на питающую сеть.

Основными факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении трансформатора, являются остаточный магнитный поток в сердечнике трансформатора и момент замыкания контактов выключателя [35]. На рисунке 4.7 представлены результаты моделирования одновременного включения двух первых фаз трансформатора 1000 кВА ( $T_A = T_B = var$ ), имеющего соединение в треугольник первичной обмотки, при разных значениях остаточного магнитного потока и варьировании момента времени коммутации.

Из полученных результатов видно, что уровни бросков тока возрастают при увеличении остаточного магнитного потока трансформатора. При этом для каждого значения остаточного магнитного потока бросок тока намагничивания достигает максимальной амплитуды в различные моменты времени включения, что связано с неравенством остаточного магнитного потока в магнитопроводе трансформатора и вынужденного магнитного потока в момент коммутации ( $\Phi_{ост}$  и  $\Phi_{уст}$  на рисунке 4.8). При наибольшем различии этих потоков результирующий



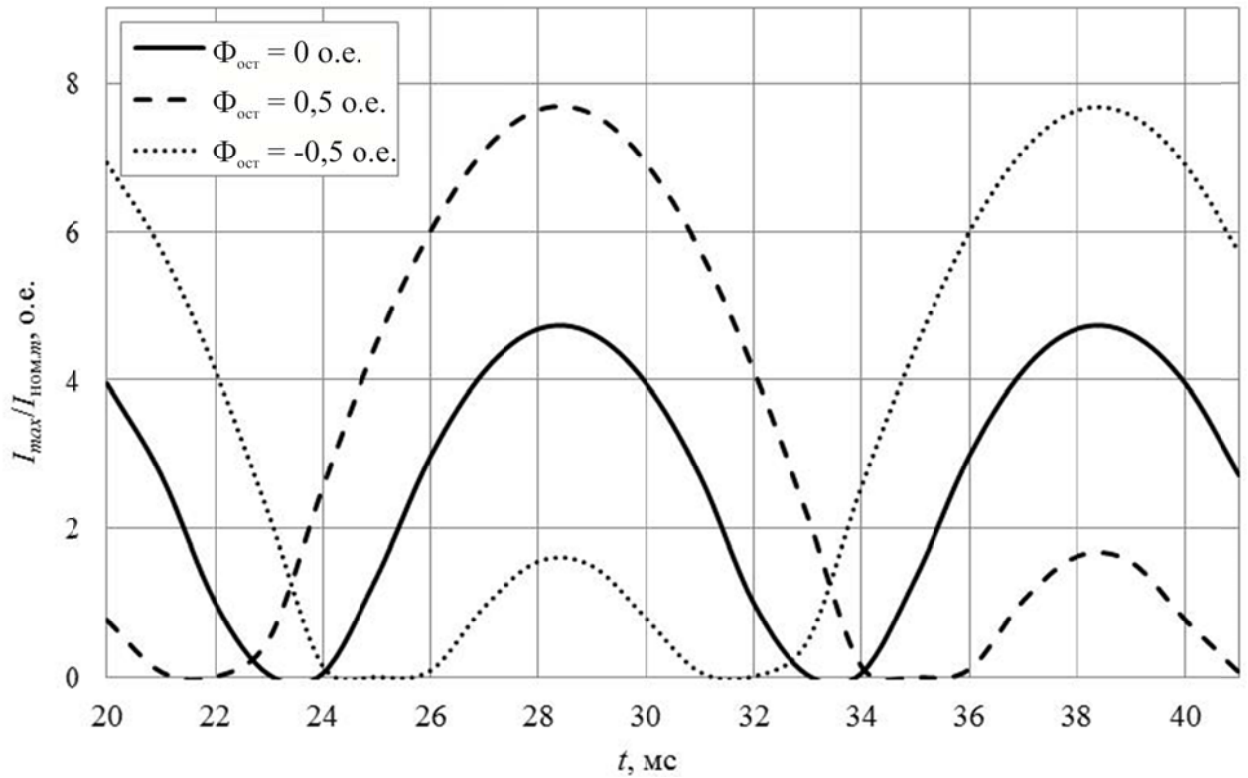


Рисунок 4.7 – Максимальные уровни бросков тока намагничивания при включении трансформатора 1000 кВА с разными значениями остаточного магнитного потока и варьировании момента времени коммутации

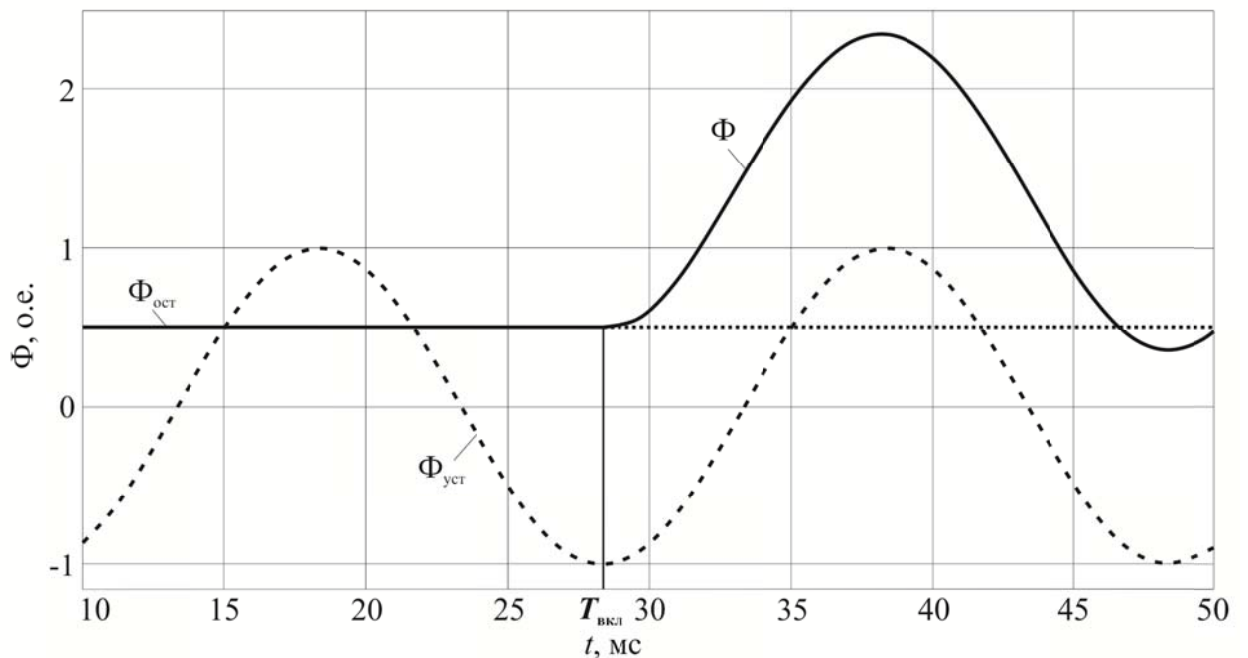


Рисунок 4.8 – Магнитные потоки при включении трансформатора:  $\Phi_{уст}$  – в установившемся режиме;  $\Phi_{ост}$  – остаточный в магнитопроводе трансформатора;  $\Phi$  – результирующий при включении в момент  $T_{вкл}$ , соответствующий наибольшей разнице между  $\Phi_{уст}$  и  $\Phi_{ост}$

магнитный поток ( $\Phi$ ) может в два раза и более превышать номинальный магнитный поток, что приводит к насыщению стали трансформатора, снижению его индуктивного сопротивления и, как результат, возникновению максимальных бросков тока намагничивания.

Уровень бросков тока намагничивания при включении трансформатора зависит и от ряда других факторов [35], что подтверждено в данной работе. Увеличение номинальной мощности, длины питающей линии, а также наличие предпробоев приводят к его снижению.

Управление моментом коммутации дает возможность существенно снизить броски тока намагничивания (рисунок 4.7). Это обстоятельство позволяет разработать оптимальные алгоритмы включения трансформатора с наименьшими переходными токами. В работах [93, 112] для снижения токов намагничивания при включении трансформатора с соединением первичной обмотки в звезду с изолированной нейтралью предложено проводить коммутацию по алгоритмам вида *CB-A* и *C-B-A*. Отмечается, что второй алгоритм является доработанной версией первого, так как позволяет уменьшить количество предпробоев при включении трансформатора.

Исследование процессов включения трансформатора с соединением первичной обмотки в треугольник позволяет утверждать о целесообразности применения алгоритма *CB-A*, как способа существенного снижения бросков тока намагничивания. В этом случае необходимо одновременно произвести коммутацию двух фаз в момент перехода установившегося потокосцепления включаемой обмотки трансформатора через ноль, что соответствует максимальному линейному напряжению между этими фазами ( $T_C = T_B = 20$  мс). Далее произвести коммутацию третьей фазы в момент равенства установившихся потокосцеплений оставшихся обмоток трансформатора, что соответствует максимальному напряжению включаемой фазы ( $T_A = 25$  мс). Осциллограммы включения трансформатора по оптимальному алгоритму коммутации представлены на рисунке 4.9.

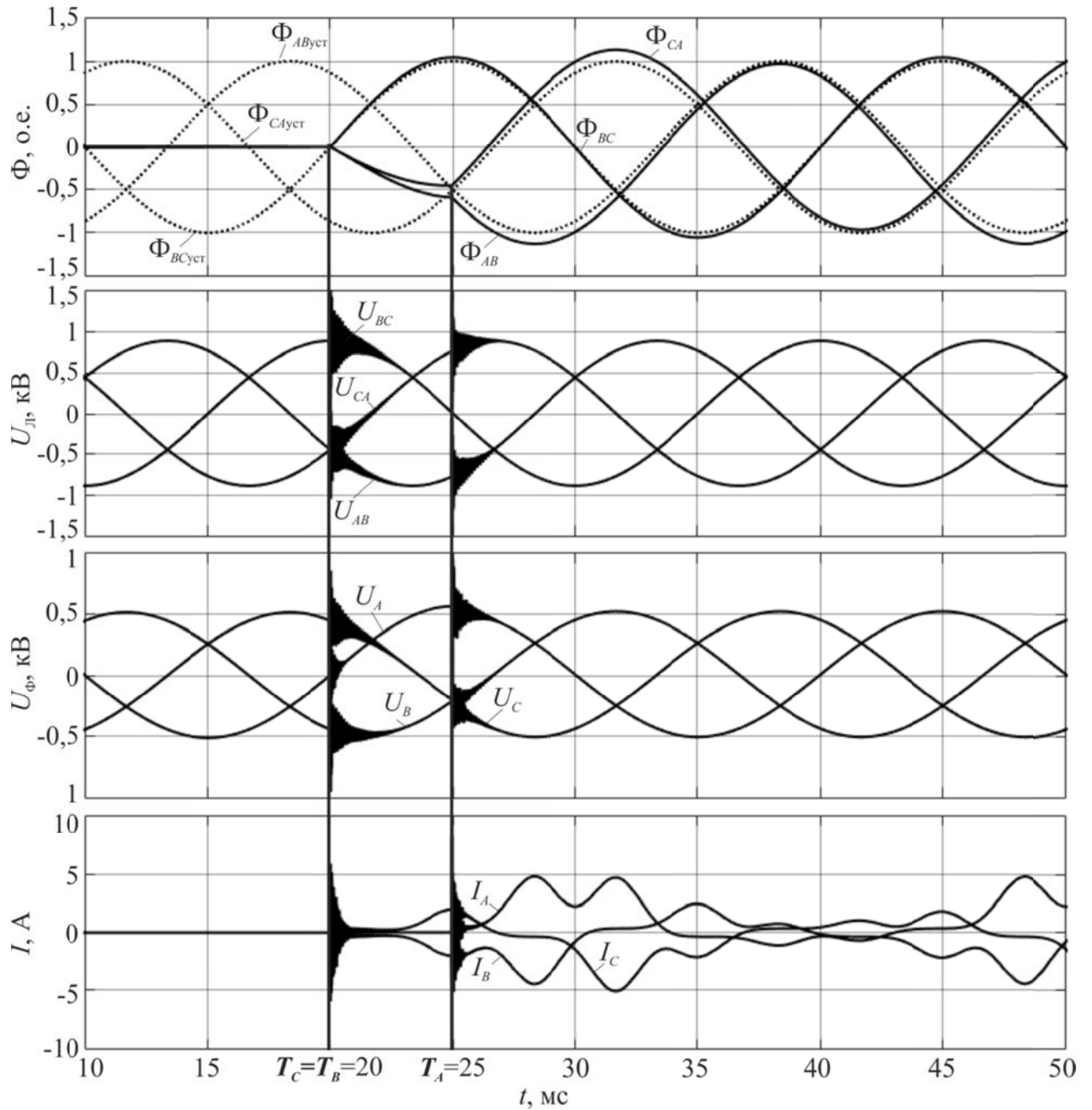


Рисунок 4.9 – Управляемое включение трансформатора 1000 кВА с соединением первичной обмотки в треугольник по алгоритму *CB-A*:  $\Phi$  – магнитный поток в сердечнике трансформатора;  $U_{л}$ ,  $U_{\phi}$  – линейное и фазное напряжение в электрической сети до выключателя;  $I$  – ток трансформатора

Включение трансформатора по данному алгоритму при отсутствии остаточного магнитного потока позволяет снизить броски тока намагничивания до значения, не превышающего номинальный ток трансформатора, с разбросом момента срабатывания каждого полюса выключателя не более 1,2 мс.

Наличие остаточной намагниченности трансформатора, при известных ее значениях, предъявляет к выключателю более высокие требования по точности срабатывания полюсов: в случае не превышения номинального тока трансформатора допустимый разброс должен составлять не более 0,8 мс. При этом коммутация должна проводиться в следующей последовательности: в первую очередь включается обмотка с наименьшим по модулю остаточным потокосцеплением, путем одновременного замыкания двух полюсов выключателя в момент совпадения остаточного и установившегося потокосцеплений первой включаемой обмотки. Далее замыкается третий полюс выключателя в момент наименьшего расхождения между соответствующими потокосцеплениями оставшихся обмоток трансформатора.

Определение и контроль остаточной магнитной индукции в стали трансформатора представляет собой довольно сложную задачу и связано с необходимостью применения специальных устройств и проведения экспериментов, направленных на изучение характеристик стали магнитопровода конкретного трансформатора [21]. Поэтому при недостатке такого рода информации включение трансформатора следует проводить по алгоритму *СВ-А* для случая отсутствия остаточной намагниченности. Такой способ включения трансформатора дает возможность снизить уровень бросков тока до значений, не превышающих  $3 \cdot I_{\text{ном.т}}$ , с разбросом момента срабатывания полюсов выключателя не более 0,5 мс.

Включение по алгоритму *С-В-А* подразумевает коммутацию первой фазы при переходе напряжения через ноль, второй – при максимальном линейном напряжении между первыми включаемыми фазами, третьей – при максимальном фазном напряжении [59]. Использование алгоритма *С-В-А* в случае включения трансформатора с соединением первичной обмотки в треугольник является менее

предпочтительным, так как требует более высокой точности срабатывания полюсов выключателя, не обеспечивает заданного уровня переходного тока во всех случаях распределения остаточной намагниченности и не имеет преимуществ, связанных с уменьшением количества предпробоев при сближении контактов выключателя.

### **4.3 Моделирование переходных процессов при коммутации электродвигателей и разработка оптимальных алгоритмов коммутации**

#### *4.3.1 Отключение электродвигателей*

При неизменных параметрах выключателя на величину перенапряжений при отключении электродвигателей оказывают влияние: режим работы двигателя, его мощность, длина кабельной линии и момент коммутации полюсов выключателя. Наибольшие значения перенапряжений возникают при отключении практически неподвижного электродвигателя в режиме пуска [6, 13, 29]. Особенностью такой коммутации является освобождение значительной энергии, накопленной на индуктивности двигателя, в момент обрыва тока. Дальнейшее исследование переходных процессов проведено для пускового режима.

На рисунке 4.10 представлены результаты моделирования отключения двигателя в зависимости от его мощности и длины кабельной линии. Как видно, наиболее высокие перенапряжения возникают при отключении двигателей меньшей мощности (200 – 500 кВт), подключенных короткими кабельными линиями. Увеличение длины линии в этом случае приводит к снижению кратности перенапряжений. Для более мощных электродвигателей (1000 – 2000 кВт) перенапряжения имеют менее опасные значения. Увеличение длины для мощных двигателей в некоторых случаях ведет к возрастанию кратности перенапряжений.

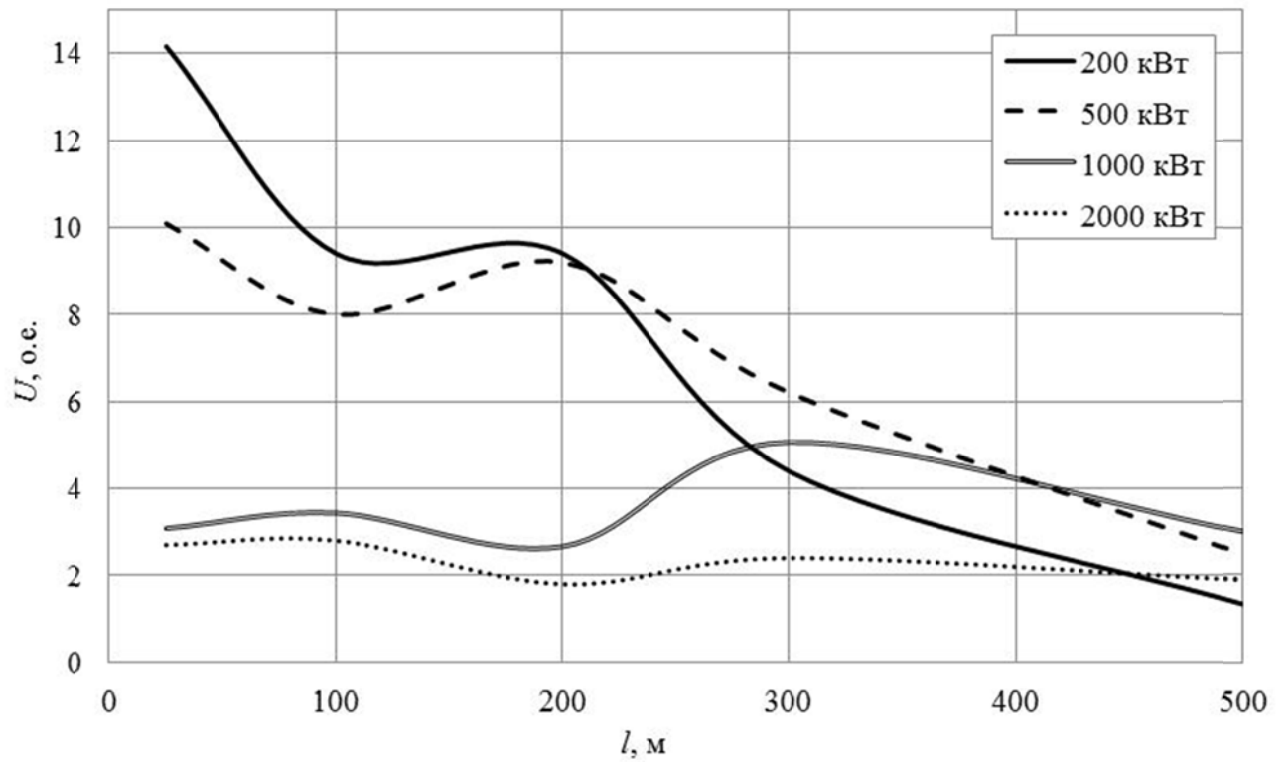
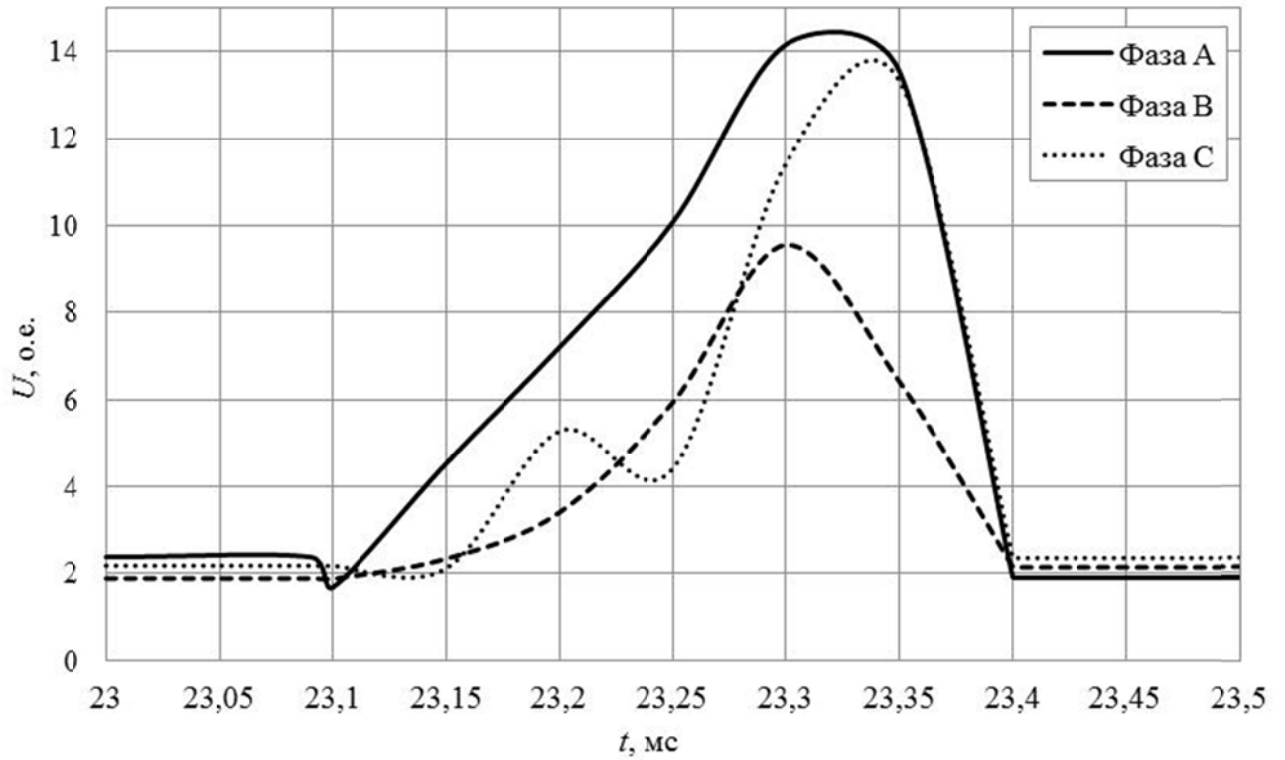


Рисунок 4.10 – Максимальные напряжения при отключении электродвигателей в режиме пуска разной мощности и варьировании длины кабельной линии

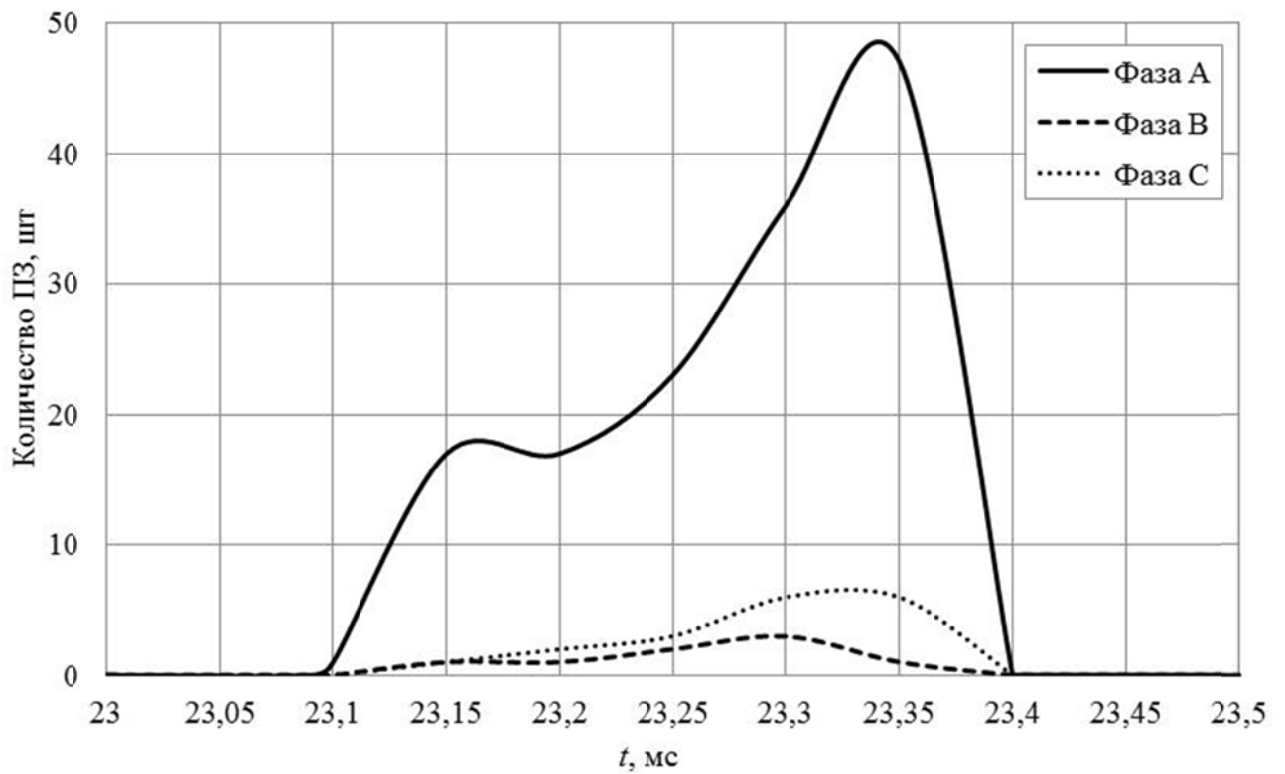
На рисунке 4.11 представлены напряжение и количество повторных зажиганий дуги при одновременном отключении трех полюсов выключателя в зависимости от момента коммутации. Из полученных результатов следует, что опасные для изоляции электродвигателя перенапряжения образуются при коммутации в течение ограниченного промежутка времени, что соответствует области наименьших значений тока в фазе  $A$ . При этом, максимальные уровни перенапряжений возникают при виртуальных срезах тока, причиной появления которых являются повторные зажигания дуги в первой отключаемой фазе ( $A$ ), вызывающие высокочастотные колебания тока в соседних фазах ( $B$  и  $C$ ).

Таким образом, при разработке оптимального алгоритма отключения электродвигателей необходимо исключить условия для возникновения повторных зажиганий дуги и, как следствие, возникновения виртуальных срезов тока, что позволит минимизировать перенапряжения. Для этого требуется, во-первых, разнести моменты коммутации полюсов выключателя во времени, во-вторых, проводить коммутацию с опережением перехода отключаемого тока через естественный ноль.

На рисунке 4.12 представлены уровни перенапряжений и количество повторных зажиганий дуги при размыкании полюсов аппарата в разные моменты времени. Отключение первой фазы ( $T_A = var$ ), в большинстве случаев не сопровождается повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями, однако имеются временные промежутки, при коммутации внутри которых повторные зажигания возникают ( $T_A = [23,05 ; 23,35]$  мс). Эта временная зона соответствует наименьшим значениям тока. Таким образом, для исключения вероятности появления повторных зажиганий размыкание первого полюса выключателя необходимо производить заблаговременно до перехода тока через ноль. В тоже время для снижения времени горения дуги и повышения ресурса выключателя требуется приблизить момент отключения к нулю тока. Исходя из заданных условий, при обеспечении надежного отключения, момент коммутации первого полюса выключателя составляет  $T_A = 22$  мс, что опережает момент перехода тока через ноль на 1,25 мс.



а



б

Рисунок 4.11 – Напряжение (а) и количество повторных зажиганий (б) при одновременном отключении фаз электродвигателя ( $P_{дв} = 200$  кВт,  $L = 25$  м)



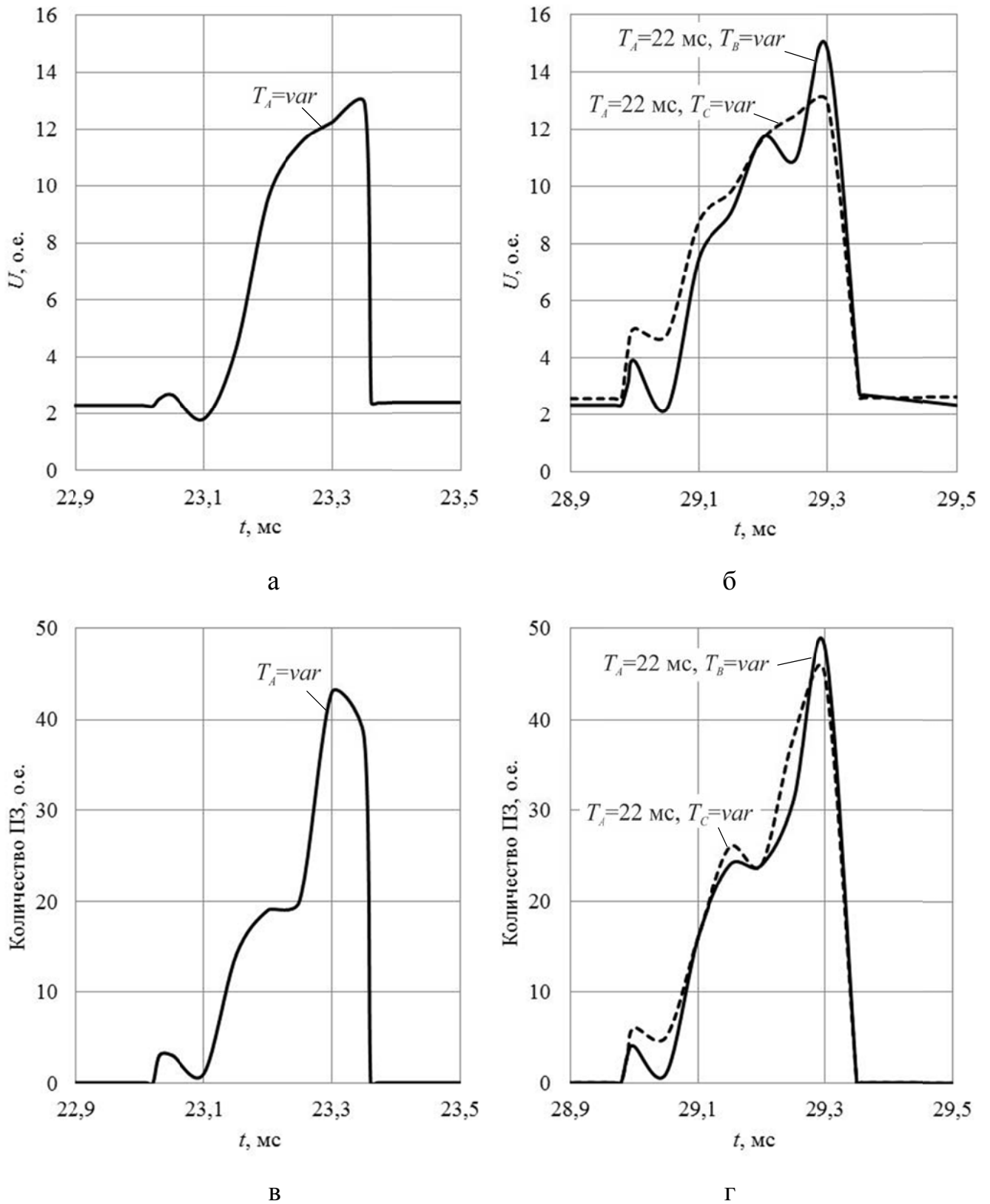


Рисунок 4.12 – Зависимость напряжения (а, б) и количества повторных зажиганий дуги (б, г) от момента отключения пускового тока электродвигателя

( $P_{\text{дв}} = 200 \text{ кВт}$ ,  $L = 25 \text{ м}$ )

Далее при неизменном моменте времени коммутации фазы  $A$  производится отключение второго полюса выключателя ( $T_B = var$  или  $T_C = var$ ). Как видно из рисунка 4.12 повторные зажигания дуги наблюдаются при коммутации второй фазы в промежутках времени  $T_B = T_C = [29,00 ; 29,35]$  мс, что так же соответствует области вблизи нулевого значения токов в этих фазах.

Напряжения и токи при управляемом отключении электродвигателя по алгоритму  $A-BC$  представлены на рисунке 4.13. Отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль на 1,25 мс, чему соответствуют  $T_A = 22$  мс,  $T_B = 28$  мс,  $T_C = 28$  мс. Управляемое отключение позволяет исключить появление виртуальных срезов тока и повторных зажиганий дуги, и уменьшить возникающие перенапряжения до уровня  $2,3 \cdot U_{\phi m}$ .

Допустимый разброс срабатывания контактов выключателя при управляемой коммутации двигательной нагрузки определяется главным образом заданным временем начала размыкания контактов до перехода тока через ноль. При невозможности обеспечения требуемой точности срабатывания выключателя необходимо отдалить момент отключения от нуля тока.

В случае отключения пускового тока электродвигателя (мощность 200 кВт, длина кабеля 25 м) по алгоритму  $A-BC$  за 1,25 мс до перехода токов через ноль разброс времени срабатывания каждого полюса выключателя должен составлять не более 2 мс. Увеличение мощности двигателя и длины кабельной линии приводит к незначительному послаблению требований к точности управления. Также наблюдается снижение требований к точности срабатывания полюсов выключателя с ростом скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка выключателя.

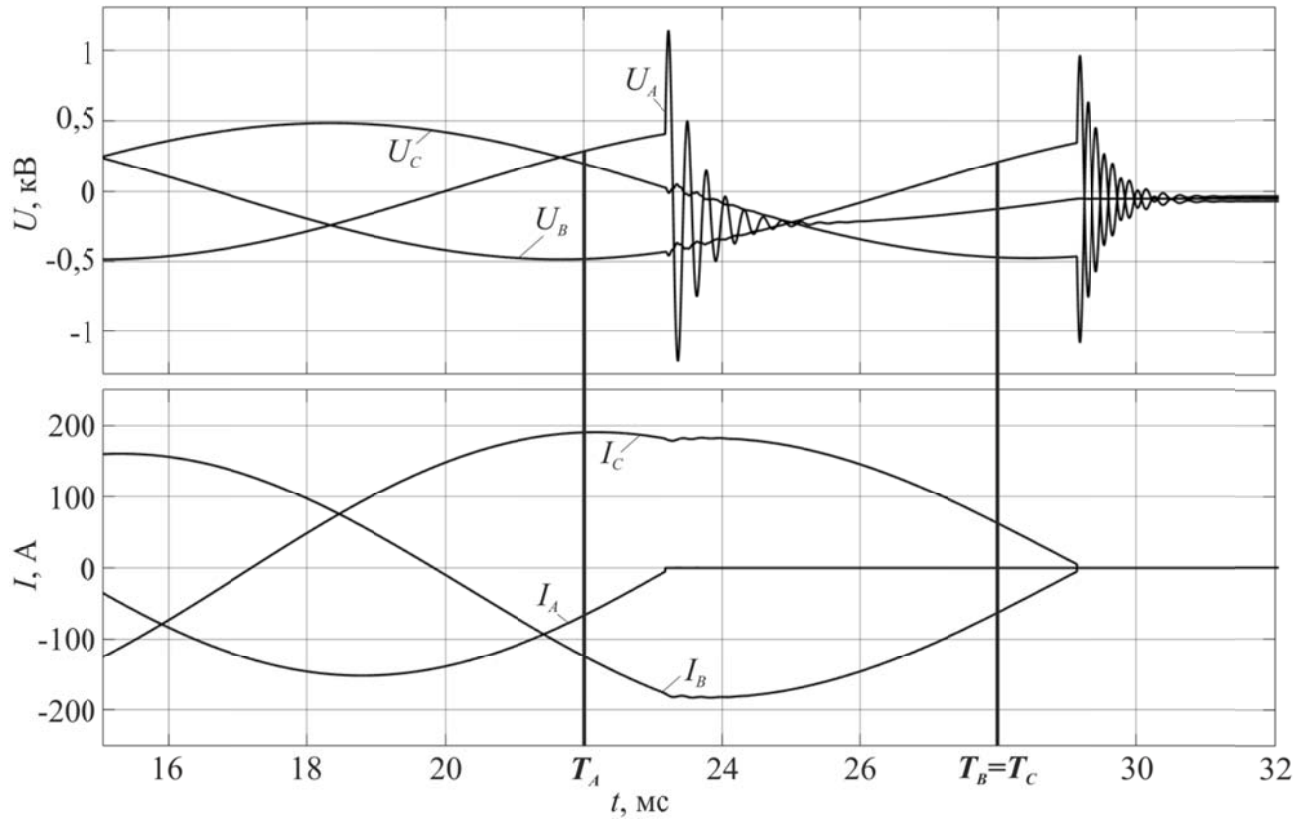


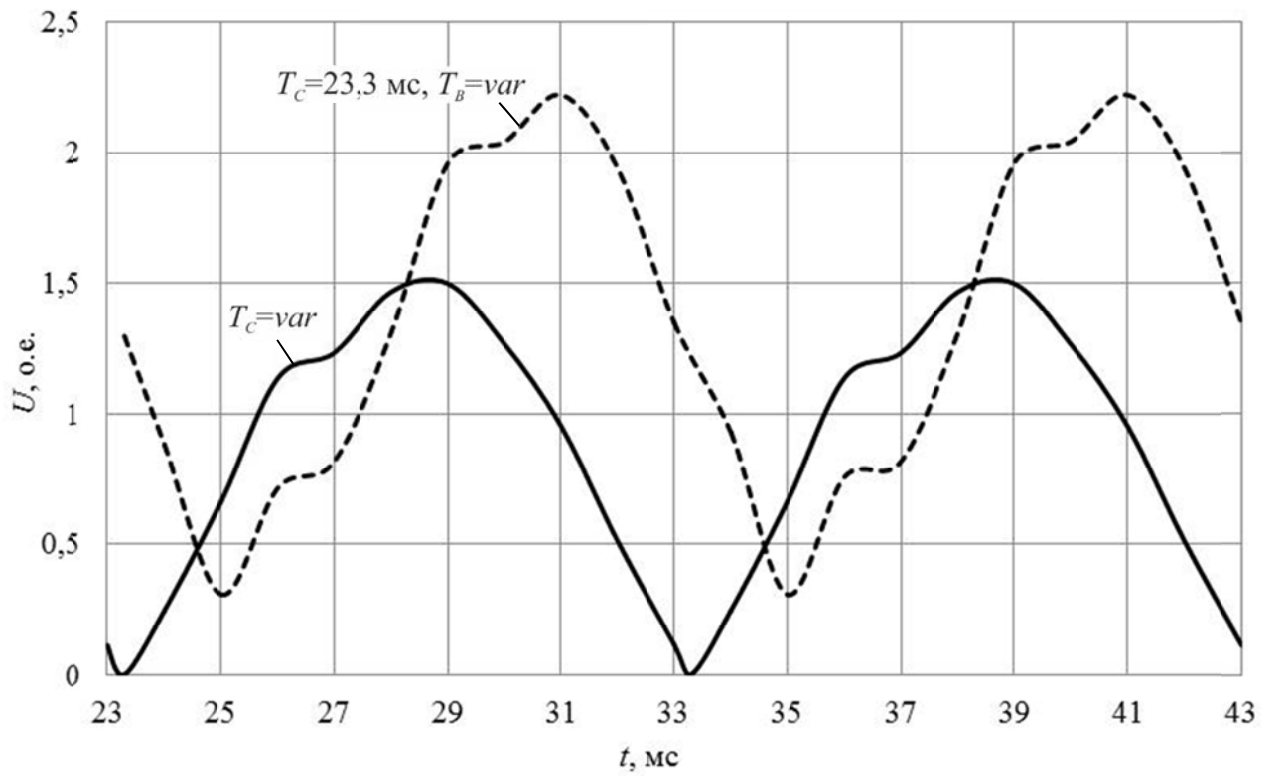
Рисунок 4.13 – Управляемое отключение пускового тока электродвигателя  
 ( $P_{\text{дв}} = 200 \text{ кВт}$ ,  $L = 25 \text{ м}$ ) по алгоритму *A-BC*

### 4.3.2 Включение электродвигателей

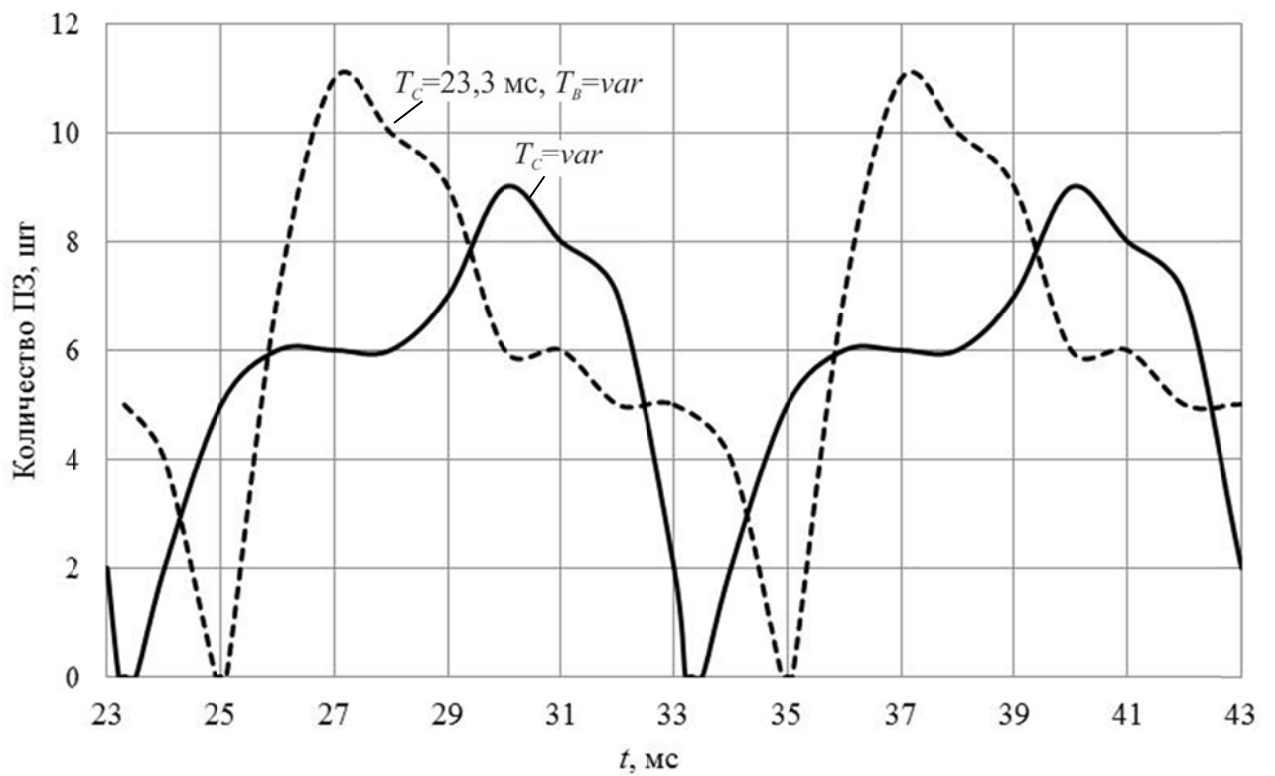
Включение электродвигателей может сопровождаться перенапряжениями, кратность которых не превышает  $3 \cdot U_{\text{фн}}$  [6]. Значительную роль в возникновении перенапряжений оказывает коммутационный аппарат. Разброс в действии отдельных полюсов выключателя и низкая скорость снижения электрической прочности межконтактного промежутка способствуют длительному существованию повторных пробоев и появлению высокочастотных перенапряжений, представляющих опасность главным образом для витковой изоляции электродвигателей [1, 4].

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 *C-B-A*, так как в этом случае возможно исключить возникновение предпробоев. При включении двигателя по алгоритму *CB-A* повторные зажигания дуги наблюдаются в любой момент коммутации первых двух фаз.

На рисунке 4.14 представлены уровни перенапряжений и количество предпробоев, соответственно, при замыкании полюсов аппарата в разные моменты времени. Включение первой фазы ( $T_C = var$ ) вблизи нулевого значения напряжения не сопровождается предпробоями и характеризуется минимальными напряжениями. Включение второй фазы ( $T_B = var$ ) производится при неизменном моменте коммутации фазы *C* ( $T_C = 23,3$  мс, что соответствует моменту перехода фазного напряжения через ноль). Из рисунка 4.14 видно, что включение второго полюса выключателя вблизи нулевого значения линейного напряжения между первой и второй фазами (*C* и *B*) характеризуется минимальными напряжениями и отсутствием предпробоев. Включение оставшейся фазы вблизи нулевого значения напряжения на фазе также не сопровождается предпробоями.



а



б

Рисунок 4.14 – Зависимость напряжения (а) и количества предпробоев (б) от момента включения электродвигателя ( $P_{дв} = 200 \text{ кВт}, L = 250 \text{ м}$ )

Напряжения и токи при управляемом включении электродвигателя по алгоритму *C-B-A* представлены на рисунке 4.15. В этом случае включение первого полюса выключателя производится в момент перехода фазного напряжения через ноль ( $T_C = 23,3$  мс), второго – в момент перехода линейного напряжения между этими фазами через ноль ( $T_B = 25$  мс), третьего – в момент перехода фазного напряжения через ноль ( $T_A = 30$  мс).

Включение электродвигателей без предпробоев является сложной задачей и требует от выключателя высокой точности срабатывания. Допустимый разброс в работе каждого полюса аппарата должен составлять не более 0,05 мс. Увеличение длины кабельной линии ведет к снижению требований к точности срабатывания. При скорости спада электрической прочности межконтактного промежутка ниже 20 кВ/мс реализация управляемого включения электродвигателей без возникновения предпробоев невозможна.

#### **4.4 Моделирование переходных процессов при коммутации конденсаторных батарей и разработка оптимальных алгоритмов коммутации**

##### *4.4.1 Отключение конденсаторных батарей*

Как уже отмечалось в п. 1.5 отключение конденсаторных батарей без возникновения повторных пробоев в выключателе не создает опасных уровней перенапряжений. Наибольшие значения возникают на этапе коммутации первой фазы выключателя [14] и составляют на отключаемой фазе не более  $2 \cdot U_{\text{фм}}$ , а между контактами выключателя не более  $3 \cdot U_{\text{фм}}$ , что подтверждается на рисунке 4.16.

Отключение конденсаторной установки в естественной последовательности переходов токов фаз через ноль несколько снижает уровни возникающих перенапряжений. В этом случае напряжение на первой отключаемой фазе составляет  $1,5 \cdot U_{\text{фм}}$  (рисунок 4.17).

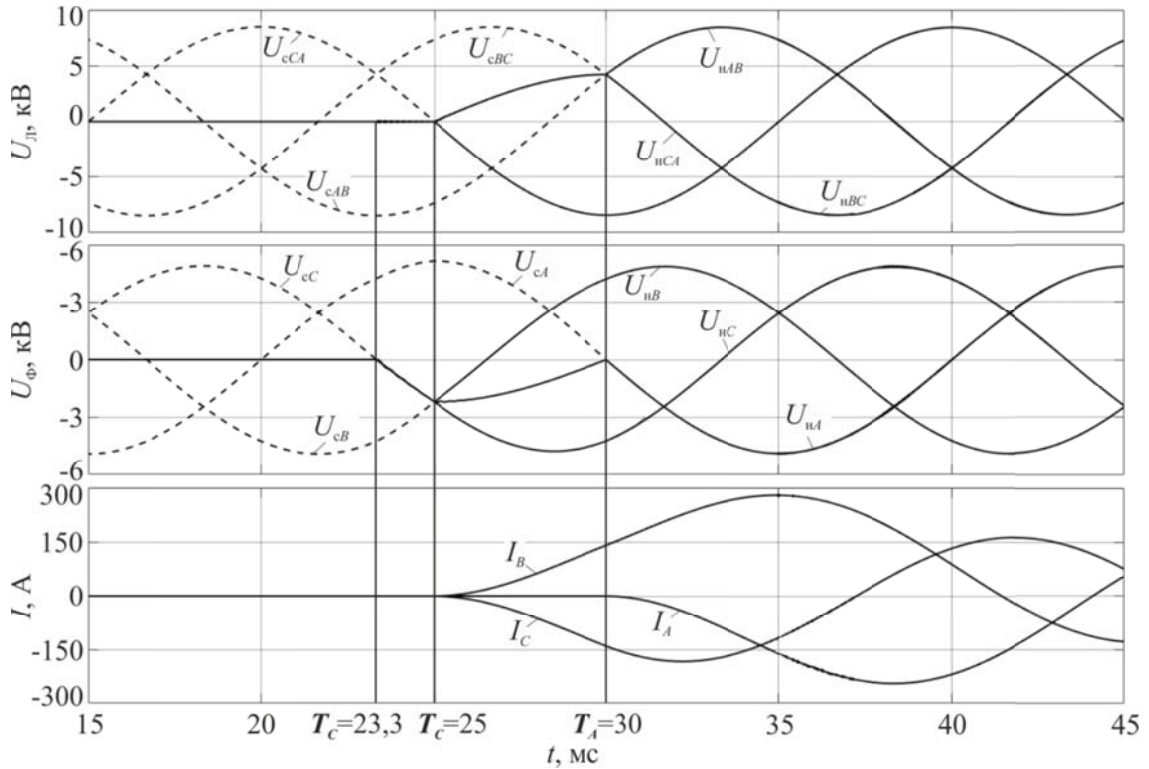


Рисунок 4.15 – Управляемое включение электродвигателя ( $P_{дв} = 200$  кВт,  $L = 250$  м) по алгоритму C-B-A:  $U_c$ ,  $U_n$  – напряжения на выключателе со стороны системы и нагрузки

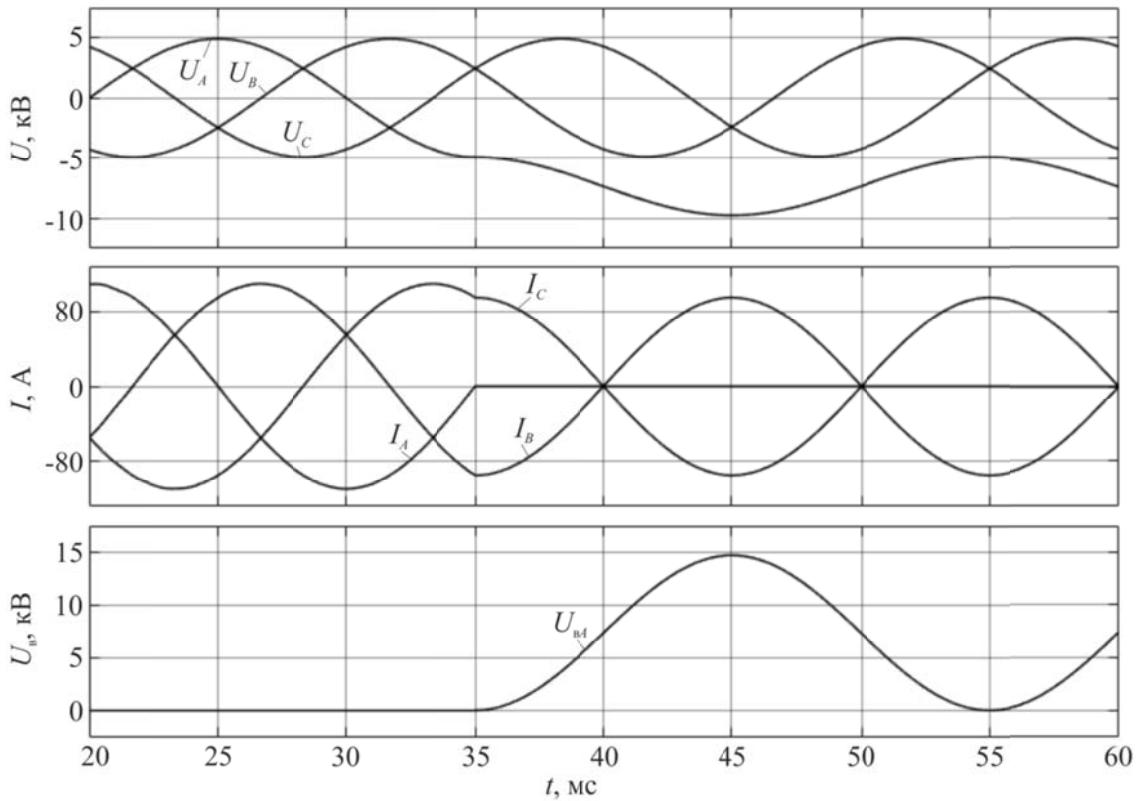


Рисунок 4.16 – Отключение одной фазы конденсаторной батареи 500 квар:

$U_B$  – напряжение между контактами выключателя

Возникновение повторных зажигания дуги при отключении конденсаторных установок возможно при достаточно низкой скорости нарастания электрической прочности расходящихся контактов выключателя. На рисунке 4.18 представлены напряжения и токи, сопровождающиеся повторными зажиганиями дуги в первой отключаемой фазе. В этом случае межконтактный промежуток характеризуется малой электрической прочностью в первый момент времени после прекращения тока, так как момент начала движения контактов близок к току среза, а скорость восстановления электрической прочности между контактами составляет 1,5 кВ/мс. Для современных вакуумных выключателей вероятность возникновения повторных зажигания дуги очень низкая, что объясняется быстрым ростом электрической прочности межконтактного промежутка ( $k = 20 - 80$  кВ/мс [4, 6, 27, 29, 32]).

Таким образом, для уменьшения уровня возникающих перенапряжений и исключения условий возникновения повторных зажигания дуги целесообразно проводить отключение конденсаторной батареи по алгоритму *A-BC*: отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль, чему соответствуют  $T_A = 33$  мс,  $T_B = T_C = 38$  мс на рисунке 4.17. При этом разброс момента срабатывания каждого полюса выключателя может составлять не более 2 мс.

#### *4.4.2 Включение конденсаторных батарей*

Включение конденсаторных батарей в электрическую сеть может сопровождаться значительными бросками тока, величина которых в несколько десятков раз превышает номинальные токи батареи. Подобные токовые нагрузки вызывают при отсутствии токоограничивающих устройств повышенные электродинамические усилия на токоведущие элементы и ускоряют износ контактов высоковольтного выключателя, коммутирующего батарею. Также высокочастотный переходный ток может наводить во вторичных обмотках трансформаторов тока значительные перенапряжения, способные повредить контрольные кабели и электронные блоки релейной защиты [15, 22].



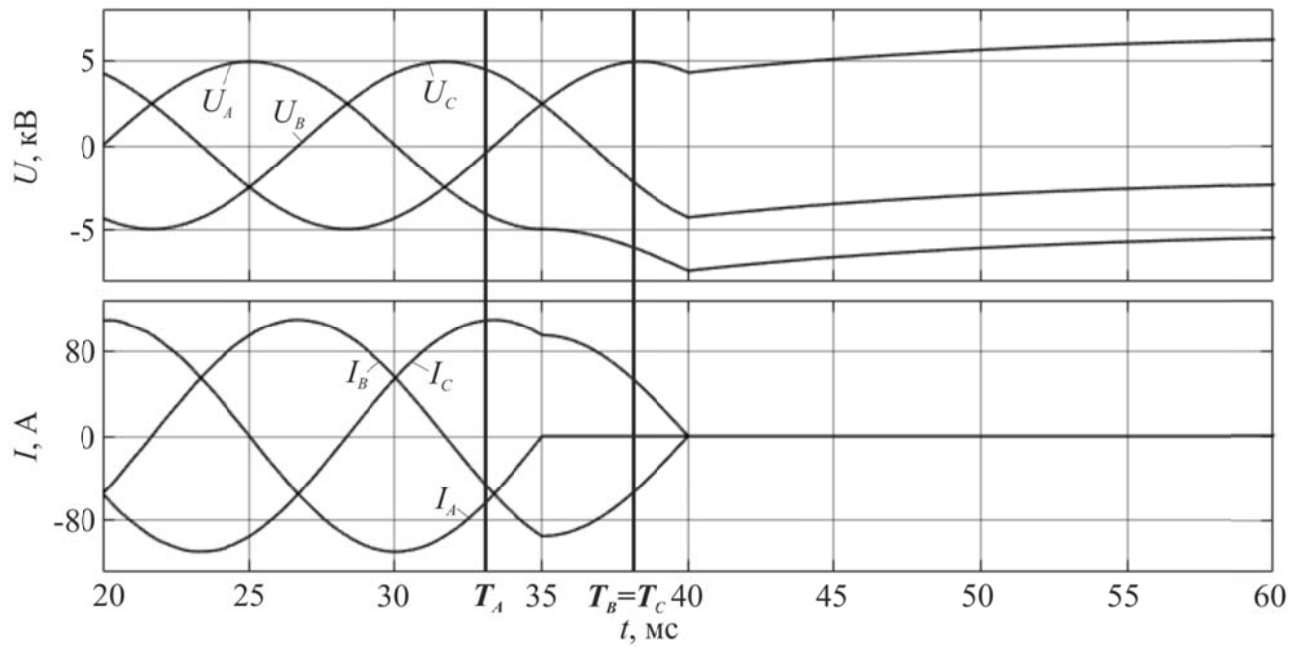


Рисунок 4.17 – Отключение трех фаз конденсаторной батареи 500 квар

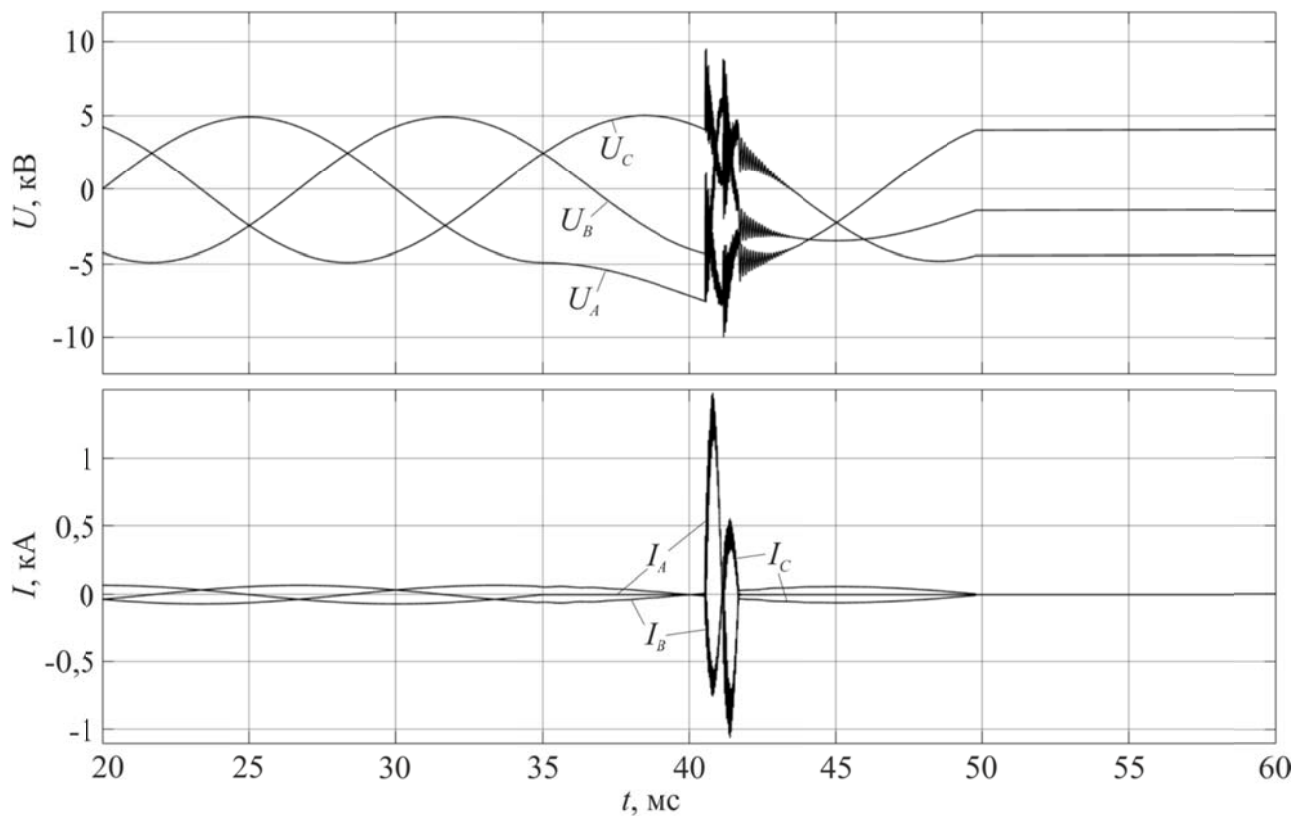


Рисунок 4.18 – Отключение конденсаторной батареи 500 квар с повторными зажиганиями дуги в фазе  $A$

Основными факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении конденсаторной батареи, являются остаточный заряд на конденсаторе и момент замыкания контактов выключателя [14]. Конденсаторные батареи в электрических сетях 6 (10) кВ России имеют изолированную нейтраль, поэтому переходной процесс возникает только при замыкании контактов по крайней мере в двух полюсах выключателя. На рисунке 4.19 представлены результаты моделирования одновременного включения двух первых фаз конденсаторной батареи 500 квар, выполненной по схеме звезда с изолированной нейтралью при разных значениях остаточного напряжения и варьировании момента времени коммутации.

Рисунок 4.19 подтверждает зависимость амплитуды броска тока конденсаторной батареи от момента ее включения и наличия остаточного заряда. Условием возникновения наибольшего переходного тока является включение конденсаторной установки в некоторый момент времени  $T_{\text{вкл}}$  (рисунок 4.20), соответствующий максимальному различию напряжений на выключателе со стороны системы ( $U_c$ ) и со стороны нагрузки – остаточного напряжения конденсаторной батареи ( $U_{\text{ост}}$ ). При наличии остаточного напряжения на конденсаторе максимальный бросок тока может принимать значения в два раза больше (рисунок 4.19).

Также из рисунка 4.19 видно, что существуют моменты времени, в которых включение конденсаторной батареи сопровождается наименьшими бросками тока. На основании проведенного исследования в качестве оптимального алгоритма включения конденсаторной установки, выполненной по схеме звезда с изолированной нейтралью, выбран алгоритм *СВ-А*. 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. На рисунке 4.21 представлены напряжения и токи при включении конденсаторной установки без остаточного

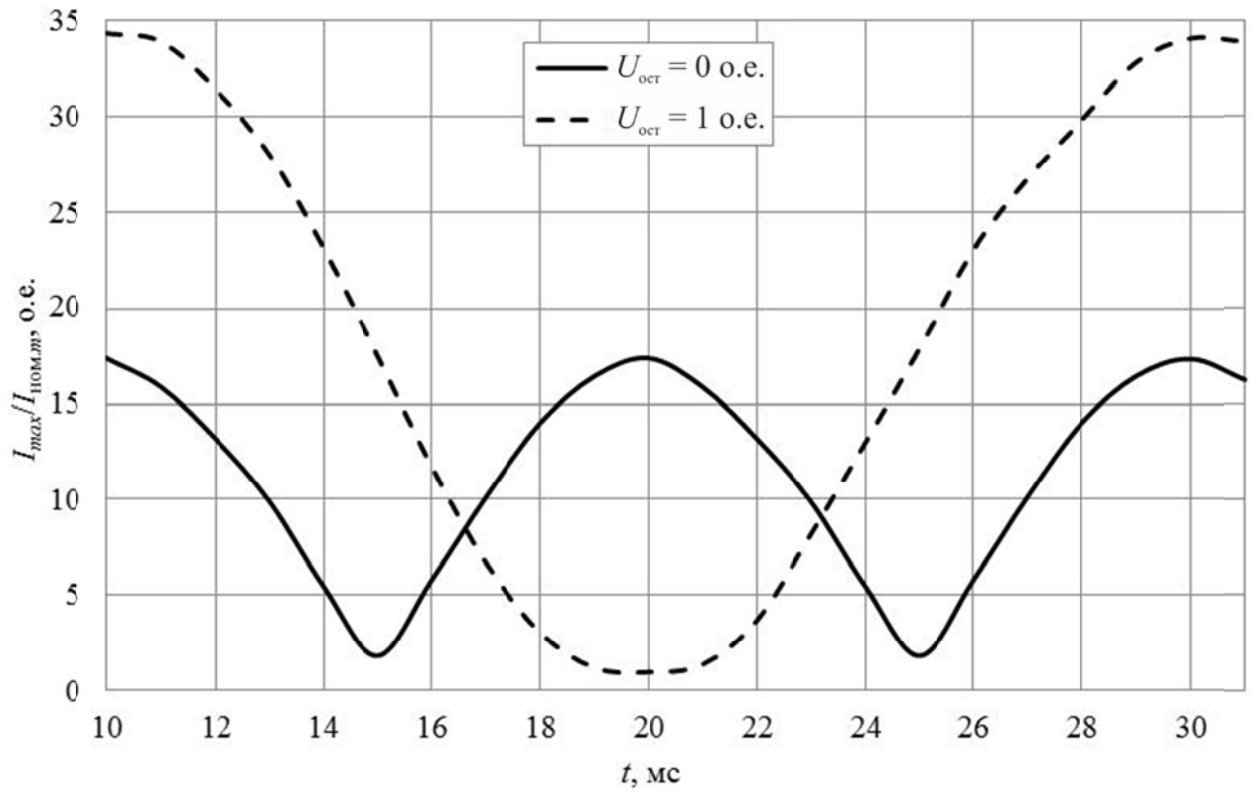


Рисунок 4.19 – Максимальные уровни бросков тока при включении конденсаторной батареи 500 квар с разными значениями остаточного напряжения

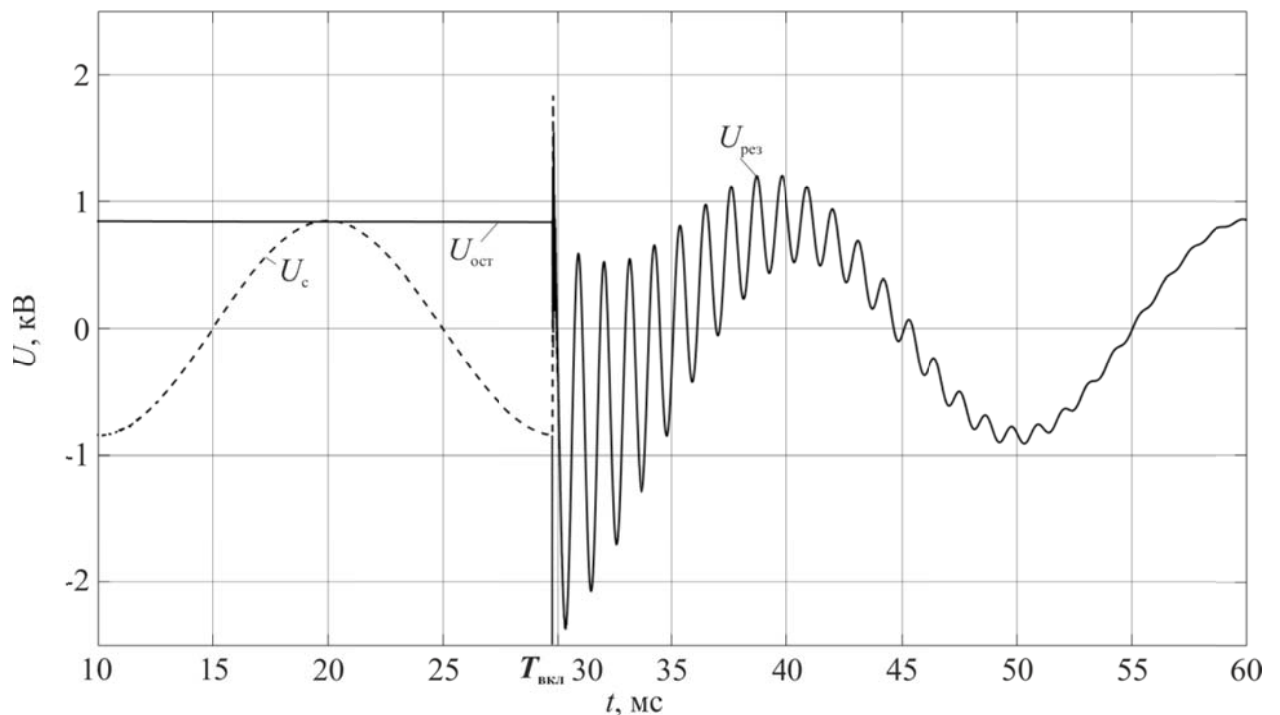
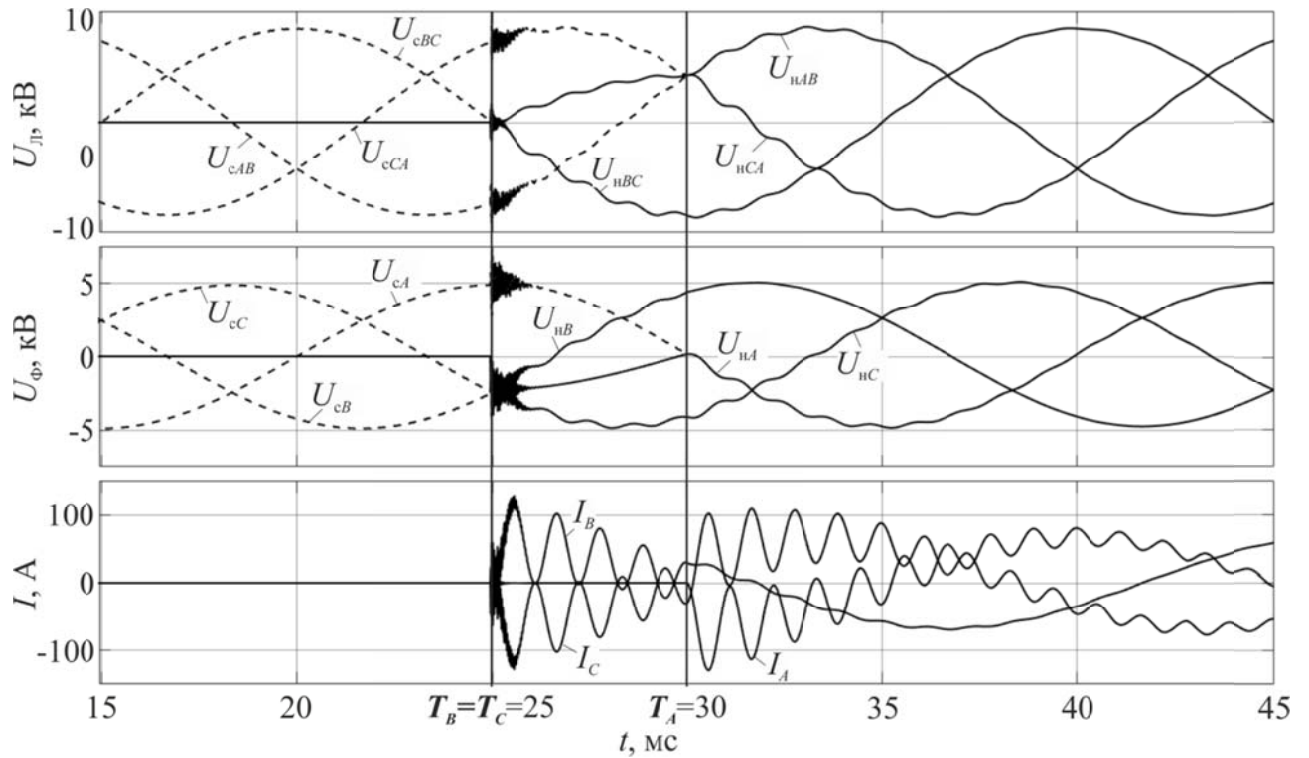
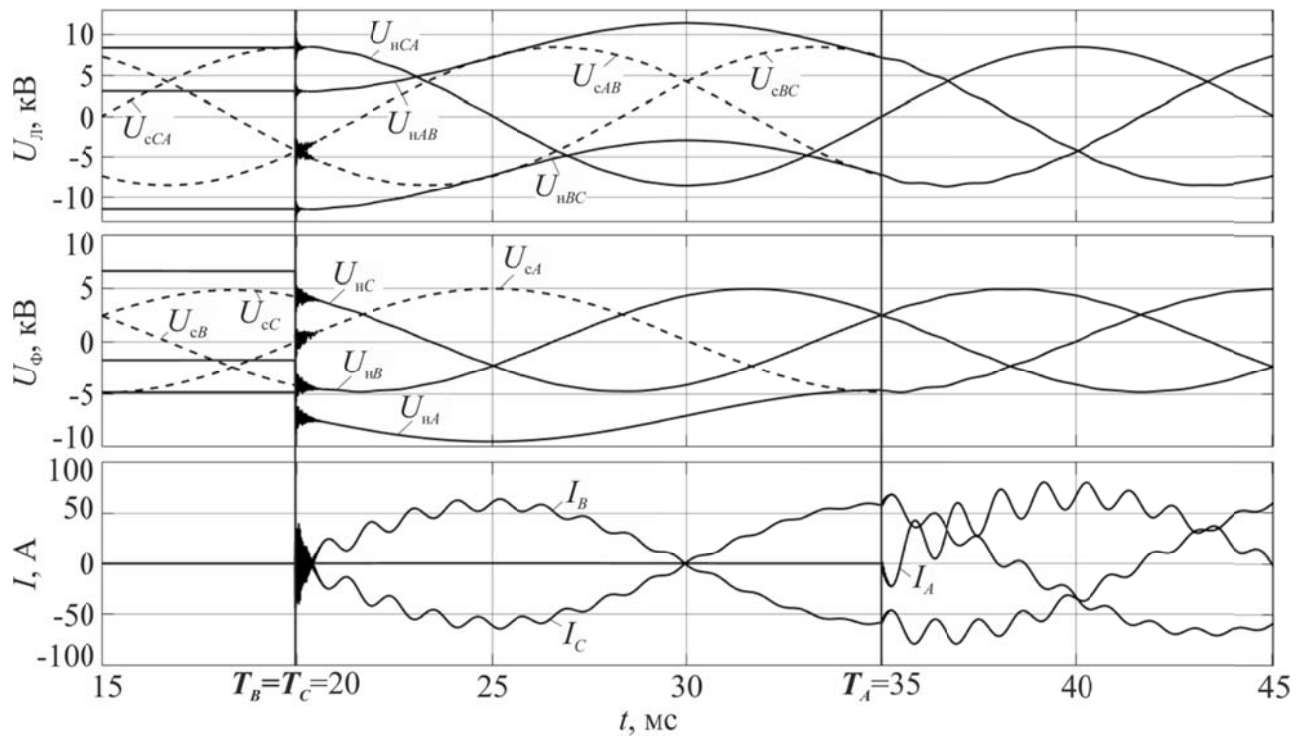


Рисунок 4.20 – Напряжения при включении конденсаторной батареи:  $U_c$  – напряжение на выключателе со стороны системы;  $U_{ост}$  – напряжение на выключателе со стороны нагрузки;  $U_{рез}$  – результирующее напряжение после включения выключателя в момент  $T_{вкл}$



а



б

Рисунок 4.21 – Управляемое включение конденсаторной батареи 500 квар без остаточного заряда (а) и с остаточным зарядом (б) по алгоритму *CB-A*:  $U_{л}$ ,  $U_{ф}$  – линейное и фазное напряжения в электрической сети;  $I$  – ток конденсаторной батареи;  $U_{с}$ ,  $U_{н}$  – напряжения на выключателе со стороны системы и нагрузки

заряда и с остаточным зарядом по предложенному алгоритму управляемой коммутации. Включение конденсаторной батареи при отсутствии остаточного заряда производится в моменты перехода соответствующих напряжений через ноль, что совпадает с  $T_C = T_B = 25$  мс,  $T_A = 30$  мс на рисунке 4.21, а.

Определение допустимых разбросов срабатывания полюсов выключателя при включении конденсаторной батареи связано с выявлением временного промежутка, при коммутации внутри которого не превышает заданное значение броска тока. Расчетные значения допустимых разбросов при разных значениях максимального переходного тока представлены на рисунке 4.22. Включение конденсаторной батареи по алгоритму *CB-A* позволяет снизить броски тока до значений не более  $3 \cdot I_{\text{ном.}m}$  с точностью срабатывания первых двух полюсов не хуже 0,9 мс, третьего полюса – 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.

#### **4.5 Определение области эффективного применения устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ**

Использование оптимальных алгоритмов для управляемой коммутации реактивных нагрузок предотвращает появление опасных бросков тока и высокочастотных перенапряжений. Область наилучшего применения устройств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ может быть определена из ожидаемого эффекта снижения амплитуды переходного процесса и соответствия коммутационного аппарата специальным требованиям.

На рисунке 4.23 представлены перенапряжения и броски тока при неуправляемой и управляемой коммутации реактивных элементов электрической

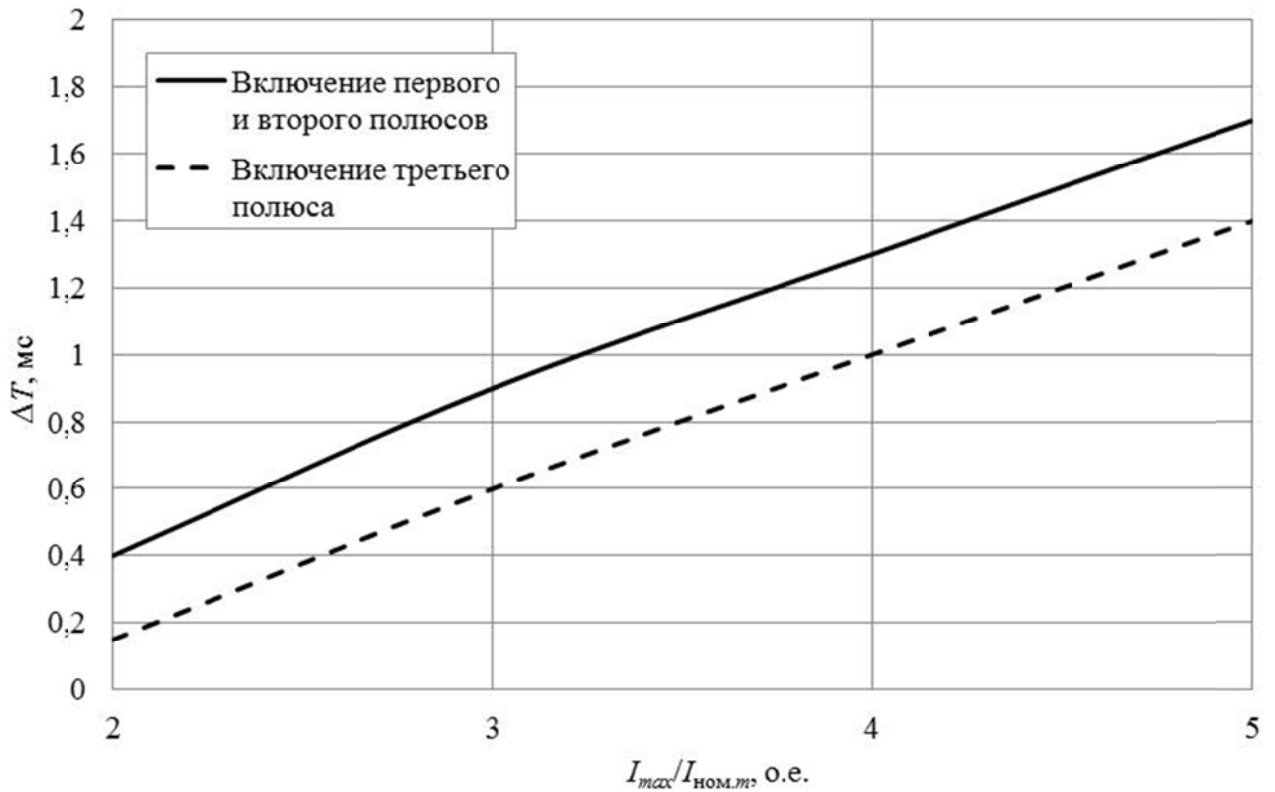


Рисунок 4.22 – Допустимые разбросы времени срабатывания полюсов синхронного выключателя в зависимости от максимального броска тока при включении конденсаторной батареи

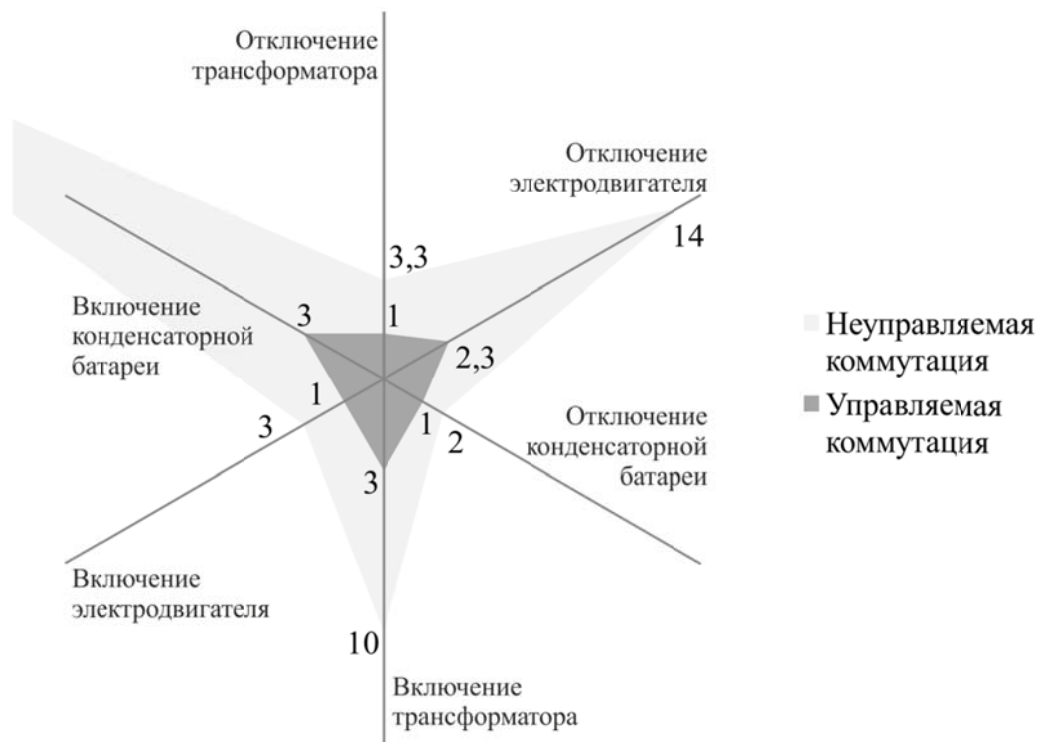


Рисунок 4.23 – Перенапряжения и броски тока при неуправляемой и управляемой коммутации, о.е.

сети 6 (10) кВ систем электроснабжения, из которого видно, что во всех случаях управляемая коммутация позволяет существенно ограничить перенапряжения и броски тока. Наибольший эффект наблюдается при коммутации ненагруженного трансформатора и заторможенного электродвигателя, а также при включении конденсаторной батареи. Отключение конденсаторной батареи современными вакуумными выключателями с высокими скоростями нарастания электрической прочности (от 20 кВ/мс) не сопровождается возникновением повторных зажиганий дуги, поэтому в этом случае применение устройств управляемой коммутации является не эффективным.

При управляемом отключении индуктивных нагрузок удается исключить появление повторных зажиганий дуги, что позволяет предотвратить высокочастотные перенапряжения. Управляемое включение электродвигателя также позволяет исключить появление повторных зажиганий. При управляемом включении трансформатора и конденсаторной батареи наблюдается значительное ограничение бросков тока, что снижает электродинамические усилия на токопроводящие элементы электрической сети.

Важным аспектом при нахождении области эффективного применения устройств управляемой коммутации является определение требований к их точности срабатывания. Допустимые разбросы времени срабатывания полюсов синхронного выключателя представлены на рисунке 4.24. Требования к управляемому отключению реактивных нагрузок несколько ниже, чем к управляемому включению. При этом требования к включению электродвигателя весьма высокие, что делает практически неосуществимым реализацию его управляемого включения без возникновения предпробоев в настоящее время.

Наглядным решением для уточнения области применения управляемой коммутации является сравнение требований, предъявляемых к синхронным выключателям и характеристик имеющихся выключателей (рисунок 4.25). Среди существующих коммутационных аппаратов 6 (10) кВ универсальным устройством, способным реализовать все возможности управляемой коммутации, является

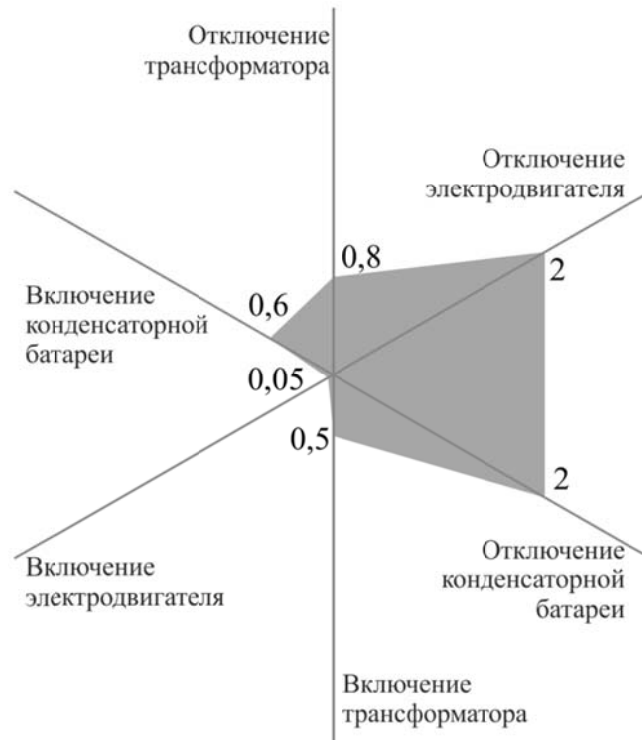


Рисунок 4.24 – Допустимый разброс времени срабатывания полюсов устройства управляемой коммутации, мс

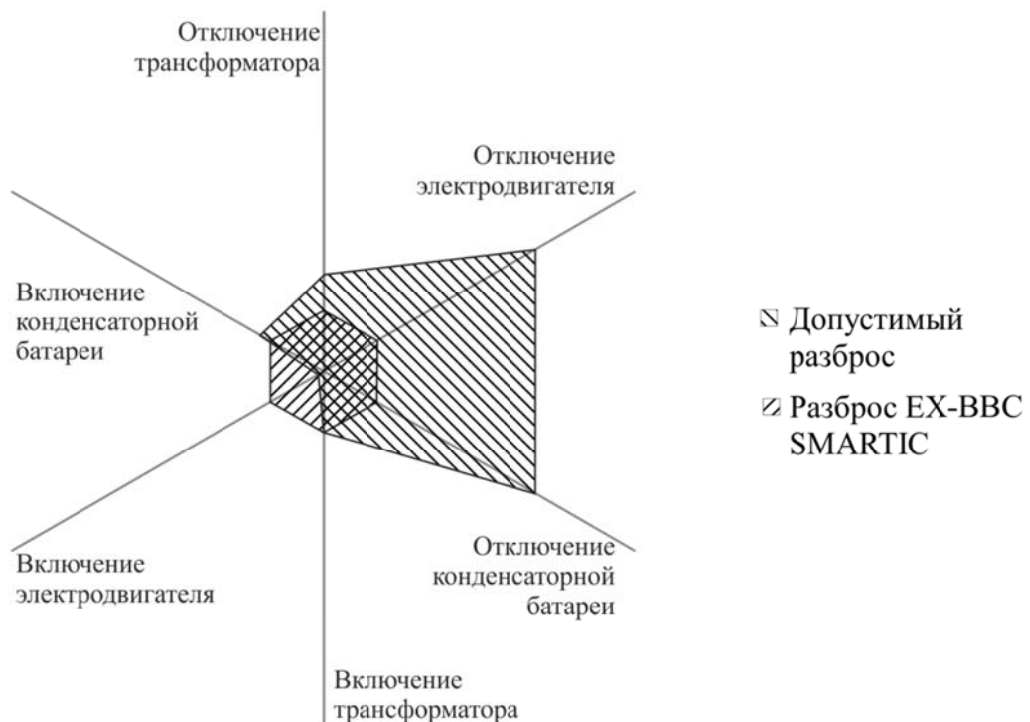


Рисунок 4.25 – Соответствие механических характеристик синхронного вакуумного выключателя *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* требованиям, предъявляемым к устройствам управляемой коммутации



синхронный вакуумный выключатель *EX-BBC SMARTIC* 6(10)-20/1000 производства ООО «КЭПС» [56]. По результатам исследования точности работы данного выключателя, проведенного в п. 3.2.1 настоящей работы, максимальные разбросы срабатывания полюсов не превышают 0,5 мс при отключении и включении.

Из рисунка 4.25 следует, что управляемое включение электродвигателей без предпробоев современными выключателями не осуществимо, как и отмечалось выше. В остальных случаях выключатели типа *EX-BBC SMARTIC* удовлетворяют требованиям, предъявляемым к устройствам управляемой коммутации, и позволяют эффективно отключать реактивную нагрузку без возникновения повторных зажиганий дуги и высокочастотных перенапряжений, а также включать с минимальными бросками тока.

#### 4.6 Выводы

По данной главе можно сделать следующие выводы:

1. Каждое отключение ненагруженных трансформаторов сопровождается повторными зажиганиями дуги и высокочастотными перенапряжениями. Значительное влияние на уровень перенапряжений оказывают параметры нагрузки: увеличение мощности трансформатора и уменьшение длины питающего кабеля ведут к возрастанию перенапряжений.

2. Наилучшим алгоритмом отключения ненагруженного трансформатора является последовательность коммутации фаз *A-B-C*, при этом отключение двух первых осуществляется при переходе токов в этих фазах через ноль ( $T_A = 23,3$  мс,  $T_B = 26,8$  мс), отключение оставшейся фазы выполняется после окончания переходных процессов в предшествующей фазе ( $T_C = 27,8$  мс).

3. С точки зрения снижения остаточного магнитного потока, отключение последнего полюса выключателя может быть проведено в области максимального напряжения на этой фазе, что позволит облегчить режим включения трансформатора.

4. Определены требования к точности работы синхронных вакуумных выключателей при отключении ненагруженных трансформаторов: разброс времени срабатывания каждого полюса выключателя не должен превышать 0,8 мс при  $k=50$  кВ/мс.

5. Существенное влияние на допустимый разброс времени срабатывания синхронного вакуумного выключателя при отключении ненагруженных трансформаторов оказывают параметры нагрузки и характеристики выключателя: снижение мощности трансформатора, увеличение длины питающей линии и рост скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка ведут к снижению требований к точности срабатывания полюсов выключателя.

6. При включении трансформаторов существенное влияние на бросок тока намагничивания оказывают остаточный магнитный поток и момент времени коммутации. Максимальный бросок тока возникает при включении трансформатора с наибольшим остаточным магнитным потоком в момент максимального различия между этим потоком и вынужденным магнитным потоком.

7. Оптимальным алгоритмом включения трансформатора является алгоритм *CB-A*. В этом случае необходимо одновременно произвести коммутацию двух первых фаз в момент перехода установившегося потокосцепления включаемой обмотки трансформатора через ноль, что соответствует максимальному линейному напряжению между этими фазами ( $T_C = T_B = 20$  мс). Далее произвести коммутацию третьей фазы в момент равенства установившихся потокосцеплений оставшихся обмоток трансформатора, что соответствует максимальному напряжению включаемой фазы ( $T_A = 25$  мс).

8. Включение трансформатора по алгоритму *CB-A* при отсутствии остаточной намагниченности позволяет снизить броски тока до значений, не превышающих номинальный ток трансформатора, с разбросом момента срабатывания каждого полюса выключателя не более 1,2 мс. При неизвестных значениях остаточной намагниченности такой способ включения дает

возможность снизить броски тока до уровня, не превышающего  $3 \cdot I_{\text{ном.т}}$ , с разбросом момента срабатывания полюсов выключателя не более 0,5 мс.

9. При известных значениях остаточной намагниченности включение трансформатора необходимо проводить по алгоритму *СВ-А* в следующей последовательности: в первую очередь включается обмотка с наименьшим по модулю остаточным потокосцеплением, путем одновременного замыкания двух полюсов выключателя в момент совпадения остаточного и установившегося потокосцеплений первой включаемой обмотки. Далее замыкается третий полюс выключателя в момент наименьшего расхождения между соответствующими потокосцеплениями оставшихся обмоток трансформатора. В этом случае имеется возможность снизить броски тока до значений, не превышающих номинальный ток трансформатора, с разбросом момента срабатывания каждого полюса выключателя не более 0,8 мс.

10. На уровень перенапряжений при коммутации электродвигателей значительное влияние оказывают режим работы двигателя, его мощность, длина кабельной линии. Наибольшие значения перенапряжений достигают  $14 \cdot U_{\text{фм}}$  и возникают при отключении пускового тока двигателей небольшой мощности, подключенных короткими кабельными линиями. Отключение двигателей может сопровождаться виртуальными срезами тока.

11. Оптимальным алгоритмом отключения пускового тока двигателя является алгоритм *А-ВС*. Отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль, чему соответствуют  $T_A = 22$  мс,  $T_B = T_C = 28$  мс. Управляемое отключение позволяет исключить появление виртуальных срезов тока и повторных зажиганий дуги, и уменьшить возникающие перенапряжения до уровня  $2,3 \cdot U_{\text{фм}}$ .

12. Допустимый разброс срабатывания контактов выключателя при управляемом отключении двигательной нагрузки определяется главным образом 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 времени срабатывания каждого полюса выключателя должен составлять не более 2 мс.

13. Оптимальным алгоритмом включения двигателя является алгоритм *C-B-A*. В этом случае включение первого полюса выключателя производится в момент перехода фазного напряжения через ноль ( $T_C = 23,3$  мс), второго – в момент перехода линейного напряжения между этими фазами через ноль ( $T_B = 25$  мс), третьего – в момент перехода фазного напряжения через ноль ( $T_A = 30$  мс). Управляемое включение электродвигателя позволяет исключить появление предпробоев и снизить возникающие перенапряжения.

14. Допустимый разброс в работе каждого полюса выключателя при управляемом включении двигателя должен составлять не более 0,05 мс при  $k=50$  кВ/мс. При скорости спада электрической прочности межконтактного промежутка ниже 20 кВ/мс реализация управляемого включения электродвигателей без возникновения предпробоев невозможна.

15. Отключение конденсаторных батарей современными вакуумными выключателями с высокими скоростями нарастания электрической прочности (от 20 кВ/мс) характеризуется низкой вероятностью возникновения повторных зажиганий дуги.

16. Для снижения амплитуды перенапряжений и исключения вероятности появления повторных зажиганий дуги целесообразно проводить отключение конденсаторной батареи по алгоритму *A-BC*: отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль, чему соответствуют  $T_A = 33$  мс,  $T_B = T_C = 38$  мс. При этом разброс момента срабатывания каждого полюса выключателя может составлять не более 2 мс.

17. Основными факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении конденсаторных батарей, являются остаточный заряд на конденсаторе и момент замыкания контактов выключателя. Максимальный бросок тока возникает при включении конденсаторной батареи с наибольшим остаточным зарядом в момент максимального различия напряжений со стороны питающей системы и со стороны нагрузки.

18. Оптимальным алгоритмом включения конденсаторной установки является алгоритм *CB-A*. 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. Включение конденсаторной батареи при отсутствии остаточного заряда производится в моменты перехода соответствующих напряжений через ноль, что совпадает с  $T_C = T_B = 25$  мс,  $T_A = 30$  мс.

19. Включение конденсаторной батареи по алгоритму *CB-A* позволяет снизить броски тока до значений не более  $3 \cdot I_{ном.м}$  с точностью срабатывания полюсов выключателя не более 0,6 мс.

20. 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.

21. Выключатели типа *EX-BBC SMARTIC* удовлетворяют требованиям, предъявляемым к устройствам управляемой коммутации, и позволяют эффективно отключать реактивную нагрузку без возникновения повторных зажиганий дуги и высокочастотных перенапряжений, а также включать ее с минимальными бросками тока.

## 5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ

### 5.1 Постановка задачи

Практическая реализация состояла в настройке системы управления синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* согласно разработанным в данной диссертационной работе алгоритмам управляемой коммутации и его внедрении в электрические сети 6 (10) кВ систем электроснабжения.

В задачу практической реализации алгоритмов управляемой коммутации входила проверка их эффективности в действующих электрических сетях 6 (10) кВ, а также возможности их практического применения в современных выключателях.

Исследование проводилось совместно с научно-производственным предприятием ООО «КЭПС», которое занимается разработкой вакуумных аппаратов для коммутации электрических сетей среднего напряжения, микропроцессорных устройств управления, и АО «Региональные электрические сети» филиалом «Новосибирские городские электрические сети».

### 5.2 Опытно-промышленная эксплуатация

Среди современных коммутационных аппаратов 6 (10) кВ универсальным устройством, способным осуществить возможности управляемой коммутации, является синхронный вакуумный выключатель типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производства ООО «КЭПС». Данный выключатель имеет гибкую автоматическую систему управления, которую имеется возможность настроить в зависимости от нужной последовательности коммутации фаз.

Первый этап решения поставленной задачи заключался в настройке совместно с ООО «КЭПС» синхронного вакуумного выключателя *EX-BBC*

*SMARTIC* 6(10)-20/1000 по алгоритмам управляемой коммутации. В качестве алгоритма отключения выбран алгоритм *A-BC*, согласно которому отключение производится с опережением момента перехода токов в фазах через ноль. Для включения использован алгоритм *CB-A*, в соответствии с которым необходимо одновременно произвести коммутацию первых двух фаз в момент максимального линейного напряжения между этими фазами, далее произвести коммутацию третьей фазы в момент максимального напряжения включаемой фазы.

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». Синхронный выключатель был установлен в ячейке 13 РП-3 взамен существующего (выполнен ретрофит камеры типа КСО-2). Место расположения выключателя и защищаемая им электрическая сеть представлены на рисунке 5.1.

Участок электрической сети, выбранный для защиты синхронным вакуумным выключателем, выполнен на напряжение 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Данный участок характеризуется большой протяженностью и разветвленностью. В составе защищаемого участка электрической сети находятся кабельные и воздушные линии различного сечения, соединенные кабельными муфтами, в том числе кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, подверженные негативному влиянию высокочастотных перенапряжений, инициализируемых вакуумными выключателями. По магистральной схеме получают питание трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ преимущественно коммунально-бытового сектора.

Место размещения выключателя является типовым для городских электрических сетей и характеризуется относительно невысоким уровнем перенапряжений вследствие активно-индуктивного характера коммутируемой нагрузки и значительной разветвленности и протяженности защищаемого присоединения. Однако и в этих условиях возможно возникновение повторных зажиганий дуги между контактами выключателя.

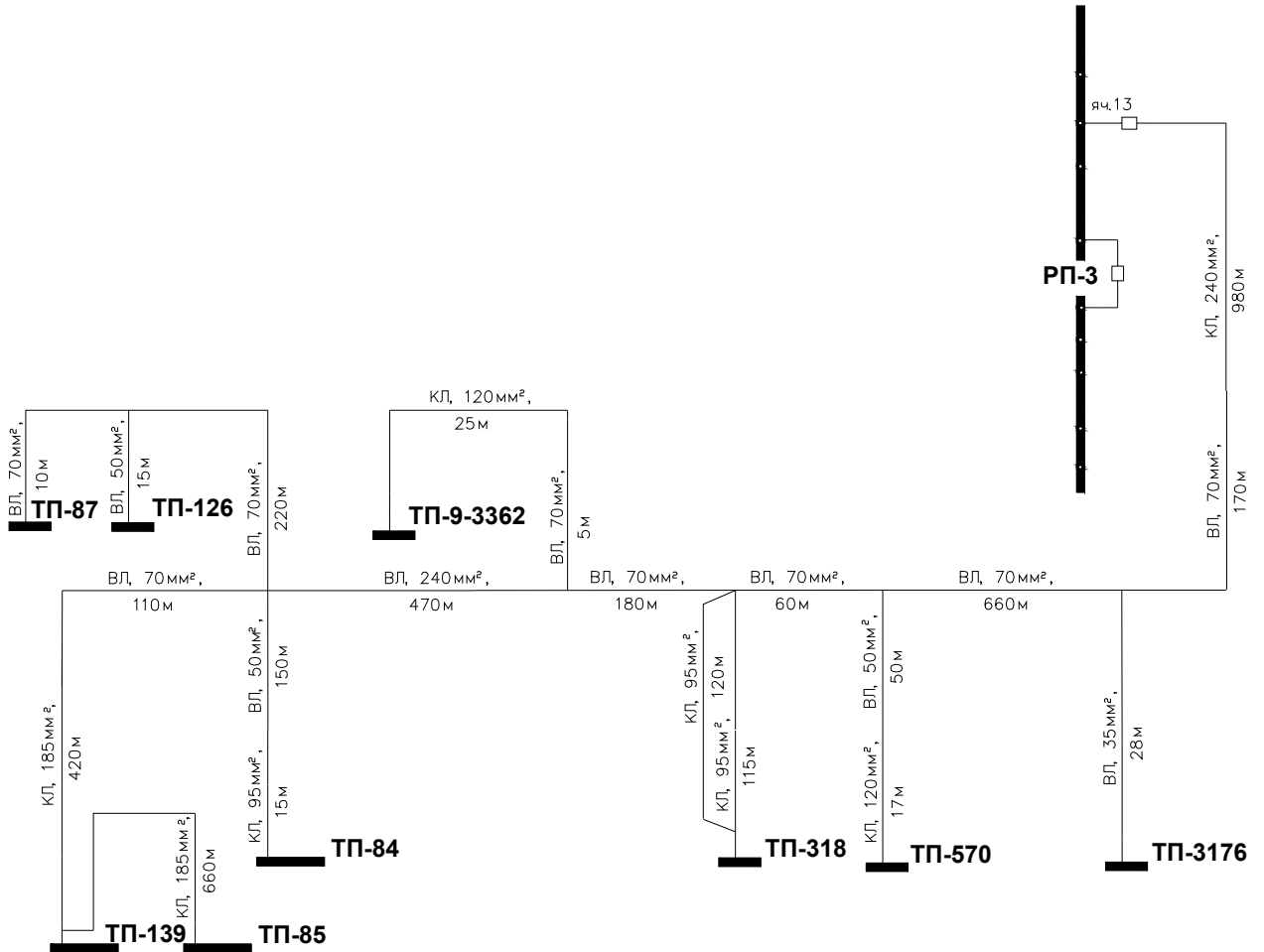


Рисунок 5.1 – Схема электрической сети:

РП – распределительный пункт, ТП – трансформаторная подстанция, ВЛ – воздушная линия, КЛ – кабельная линия



В процессе опытно-промышленной эксплуатации синхронного вакуумного выключателя производились плановые и аварийные коммутации. В результате было установлено, что выключатель представляет собой надежный коммутационный аппарат, как с точки зрения отключения токов короткого замыкания, так и с точки зрения оперативных переключениях. Во время проведения коммутаций при помощи встроенных в выключатель датчиков были получены осциллограммы токов и напряжений, которые отображают алгоритмы управляемой коммутации, фиксируют возможные перенапряжения.

На рисунке 5.2 в качестве примера представлена одна из осциллограмм напряжений при плановом отключении выключателя. Как видно, предустановленный алгоритм управляемого отключения *A-BC* полностью отрабатывается: в момент времени 18,7 мс происходит прерывание тока в фазе *A*, далее через 5 мс одновременно прерываются токи в фазах *B* и *C*. При управляемом отключении повторных зажиганий дуги не наблюдалось. Использование алгоритма управляемого включения позволило уменьшить броски тока [63].

Полученные результаты практической реализации алгоритмов управляемой коммутации позволяют утверждать об их эффективности и возможности внедрения в синхронный выключатель, что подтверждается актами внедрения результатов диссертационной работы в ООО «КЭПС» г. Новосибирск (Приложение А) и в АО «РЭС» г. Новосибирск (Приложение Б).

Кроме того 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» (Приложение В).

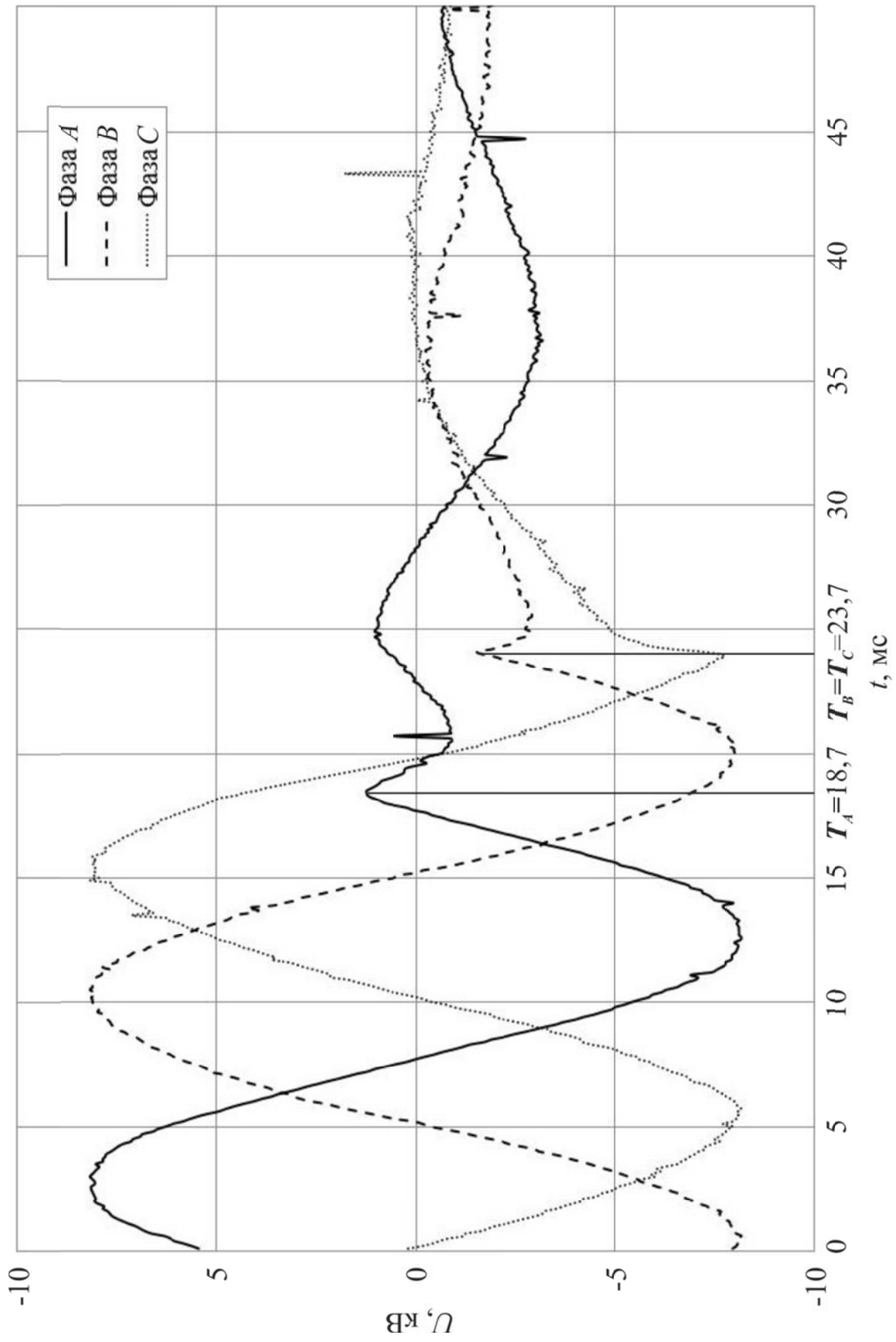


Рисунок 5.2 – Осциллограмма напряжений при плановом отключении выключателя

### 5.3 Выводы

1. Подтверждена эффективность алгоритмов управляемой коммутации с точки зрения снижения высокочастотных перенапряжений при отключении и бросков тока при включении.

2. Полученные в результате исследования алгоритмы управляемой коммутации могут быть использованы в современных синхронных вакуумных выключателях.

3. 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*.

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

5. Результаты исследований 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»).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные и практические результаты проведенных исследований могут быть сформулированы следующим образом.

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  $3 \cdot I_{ном.л}$  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  $2,3 \cdot U_{фм}$ . 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 *С-В-А*. 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 настоящее время.

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 *А-ВС*: 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 *СВ-А*. 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  $3 \cdot I_{ном.т}$  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 «РЭС» 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокунин, Г.А., Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) [Текст] / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2000. – 114 с.: ил.
2. Кравченко, А. Вакуумные выключатели нагрузки зарубежных производителей [Текст] / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. – 2013. – № 3. – С. 14–17.
3. Назарычев, А.Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей [Текст] / А.Н. Назарычев // Энергоэксперт. – 2007. – № 4–5. – С. 58–63.
4. Иванов, А.В. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей [Текст] / А.В. Иванов, И.Л. Дегтярев // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 1 – С. 1–10.
5. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в сетях 6(10) кВ [Текст] / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков // Новости электротехники. – 2002. – № 5 (17). – С. 27–29.
6. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки [Текст] / С.А. Борисов, В.Е. Качесов, А.В. Кукавский, С.С. Шевченко // Электрические станции. – 2006. – № 11. – С. 51–59.
7. Перенапряжения при коммутациях вакуумных выключателей [Текст] / А.А. Базавлук, Л.И. Сарин, Г.Г. Михайловский, И.Е. Наумкин, В.В. Гоголюк // Энергоэксперт. – 2011. – № 2. – С. 27–32.
8. *Popov, M. Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker [Text] / M. Popov, E. Acha // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – No. 4. – P. 1317–1326.*
9. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой [Текст] / А.М. Рывкин,

И.А. Лукацкая, А.Л. Буйнов, С.М. Давыдов, В.Д. Ляшенко // Электрические станции. – 1990. – № 5. – С. 62–67.

10. Куликовский, В.С. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями [Текст] / В.С. Куликовский, О.А. Ковалева // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 5. – С. 337–343.

11. *Colombo, E. Results of an investigation on the overvoltages due to a vacuum circuit breaker when switching an H.V. motor [Text] / E. Colombo, G. Costa, L. Piccarreta // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3. – No. 1. – P. 205–213.*

12. Шпиганович, А.Н. Имитационная модель системы электроснабжения кислородноконвертерного производства для анализа коммутационных перенапряжений [Текст] / А.Н. Шпиганович, К.А. Пушница // Электротехника. – 2016. – № 6. – С. 21–25.

13. Качесов, В.Е. Перенапряжения и их ограничение при отключении заторможенных электродвигателей вакуумными выключателями [Текст] / В.Е. Качесов // Электричество. – 2008. – № 3. – С. 15–26.

14. Евдокунин, Г.А. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ [Текст] / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков. – СПб.: Изд-во Терция, 2004. – 188 с.: ил.

15. *Working group 13.04. Shunt capacitor bank switching stresses and test methods (1st part) [Text] // Electra. – 1999. – No. 182. – P.165–189.*

16. Фельдман, М.Л. Расчет токов коммутации конденсаторных батарей [Текст] / М.Л. Фельдман // Промышленная энергетика. – 2001. – № 1. – С. 38–41.

17. Кулик, Ю.А. Электрические машины [Текст] / Ю.А. Кулик. – М.: Высш. шк., 1966. – 362 с.

18. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

19. Васильев, А.Б. Расчет магнитного поля и электродинамической стойкости трансформаторов при бросках намагничивающего тока [Текст] / А.Б. Васильев, А.И. Лурье // Электричество. – 1992. – № 1. – С. 21–26.



20. Славутский, А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов [Текст] / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 122–130.
21. Засыпкин, А.С. Остаточная индукция в ненагруженных силовых трансформаторах после отключения от сети [Текст] / А.С. Засыпкин // Известия высших учебных заведений: Электромеханика. – 1977. – № 2. – С. 168–172.
22. *Smith, L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications to calculating, limiting and reducing the effects of transient currents [Text] // IEEE Transactions on industry applications. – 1995. Vol. 31, iss. 4. – P. 721–724.*
23. СТО 56947007-29.130.10.095-2011. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору : стандарт организации [Текст]. – Введ. 2011.06.02. – Москва, 2011. – 28 с.
24. Халилов, Ф.Х. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений [Текст] / под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 270 с.
25. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6-35 кВ [Текст] / Б. Абрамович, С. Кабанов, А. Сергеев, В. Полищук // Новости электротехники. – 2002. – № 5 (17). – С. 22–24.
26. Кадомская, К.П. Системный подход к обеспечению надежной эксплуатации изоляции электрооборудования в электрических сетях среднего и высокого напряжения [Текст] / К.П. Кадомская // Главный энергетик. – 2006. – № 1. – С. 54–60.
27. Кадомская, К.П. Требования к вакуумной дугогасительной камере и специальным мерам для обеспечения надежного отключения заторможенных двигателей [Текст] / К.П. Кадомская, Р.В. Копылов // Электрические станции. – 2002. – № 9. – С. 56–60.
28. Защита электрооборудования собственных нужд электростанций от перенапряжений, вызываемых вакуумными выключателями [Текст] / О.А. Аношин, А.И. Барсуков, Б.К. Максимов и др. // Электричество. – 1997. – № 9. – С. 9–15.

29. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение [Текст] / Г.А. Евдокунин, А.А. Корепанов // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 2–14.
30. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учеб. [Текст] / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхерд – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 367 с.
31. Коновалов, Е.Ф. О защите действующих электрических сетей от перенапряжений [Текст] / Е.Ф. Коновалов, Н.В. Дроздов, А.В. Забрилин // Электрические станции. – 2000. – № 10. – С. 12–14.
32. Лавров, Ю.А. О повышении эксплуатационной надежности кабелей с пластмассовой изоляцией в городских распределительных сетях [Текст] / Ю.А. Лавров // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ : труды 4-ой всероссийской науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2006. – С. 75–84.
33. Буткевич, Г.В., Наибольшее допустимое время расхождения контактов воздушных выключателей для синхронизированного отключения [Текст] / Г.В. Буткевич, Л.Г. Клепарская, В.Ф. Набатов // Электричество. – 1969. – № 8. – С. 64–67.
34. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью управления моментами коммутации выключателей [Текст] / К.П. Кадомская, Е.С. Несговоров, Л.В. Петракова, В.С. Пономарев // Электричество. – 1969. – № 9. – С. 10–13.
35. Снижение тока включения трансформаторов [Текст] / В.А. Кузьменко, А.И. Лурье, А.П. Панибратец, В.С. Чуприков // Электротехника. – 1997. – № 2. – С. 22–27.
36. Алферов, Д.Ф. Быстродействующие вакуумные аппараты с управляемой коммутацией [Текст] / Д.Ф. Алферов, Г.С. Белкин, В.П. Иванов и др. // Электро. – 2006. – № 1. – С. 14–18.
37. Белкин, Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения [Текст] / Г.С. Белкин // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 3–9.

38. Белкин, Г.С. Перспективные виды электротехнического оборудования [Текст] / Г.С. Белкин, А.А. Дробышевский, В.Н. Ивакин и др. // Электротехника. – 2006. – № 9. – С. 2–9.
39. Лебедев, И.А. Исследование возможности создания вакуумного выключателя для синхронного отключения ненагруженных трансформаторов [Текст] / И.А. Лебедев, Е.В. Прохоренко // Электро. – 2011. – № 3. – С. 40–44.
40. *Andersen, E. Synchronous energizing of shunt reactors and shunt capacitors* [Text] / E. Andersen, S. Berneryd, S. Lidahl // *SIGRE Rep.* – 1988. – No. 13–12.
41. *Controlled switching of HVAC circuit breakers : application examples and benefits* [Text] / D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras, J. Pope // *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 2008.* – No. 197. – P. 520–535.
42. *Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers : guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (first part)* [Text] // *Electra.* – 1999. – No. 183. – P. 43–73.
43. *Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers : guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd part)* [Text] // *Electra.* – 1999. – No. 185. – P. 37–57.
44. *Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit breakers : planning, specification and testing of controlled switching systems* [Text] // *Electra.* – 2001. – No. 197. – P. 23–33.
45. *Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers – benefits and economic aspects* [Text] // *CIGRE Technical Brochure.* – 2004. – No. 262. – 34 p.
46. *Working group 13.07. Controlled Switching of HVAC circuit-breakers – guidance for further applications including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit-breaker uprating* [Text] // *CIGRE Technical Brochure.* – 2004. – No. 263. – 56 p.
47. *Working group 13.07. Controlled Switching of HVAC circuit-breakers – planning, specification and testing of controlled switching systems* [Text] / *CIGRE Technical Brochure.* – No. 264. – 56 p.

48. Тихончук, Д.А. Механический разнос выключателей для коммутации батареи статических конденсаторов 110 кВ [Текст] / Д.А. Тихончук // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 1 (62). – С. 64–72.

49. Клепарская, Л.Г. Синхронизированные выключатели [Текст] / Л.Г. Клепарская. – М.: Энергия. – 1973. – 112 с.: ил.

50. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях [Текст] / В.А. Веников, Л.А. Жуков, И.И. Караташев, Ю.П. Рыжов. – М.: Энергия, 1975. – 136 с.: ил.

51. *Controlled switching. Buyer's and application guide* [Electronic resource]. – 4th ed. – Ludvika, Sweden : ABB High Voltage Products, August 2013. – 54 p. – ABB ID 1HSM9543 22-01 en. – Mode of access :  
<https://library.e.abb.com/public/d85e18212da04bb9c1257bcc001f2d5e/ABB%20B.G.%20Controlled%20Switching%20Ed4.pdf>.

52. Справочник покупателя по выключателям колонковым элегазовым [Электронный ресурс]. – Выпуск 1. – Людвика, Швеция : Высоковольтные продукты, январь 2014. – 76 с. – ABB ID 1HSM9543 22-00 ru. – Режим доступа:  
<https://library.e.abb.com/public/ac5a6dd239036c5bc1257cfc002260d8/Live%20Tank%20Circuit%20Breakers%20Buyers%20Guide.pdf>.

53. *Switching control sentinel. For all ABB independent pole operated circuit breakers : brochure* [Electronic resource]. – Pennsylvania, U.S.A.: Joslyn Hi-Voltage, November 2008. – 8 p. – ABB ID 2GNM11001B. – Mode of access :  
[https://library.e.abb.com/public/c45a405c8a4d28c4852575080064770d/SCS\\_2GNM110018\\_new.pdf](https://library.e.abb.com/public/c45a405c8a4d28c4852575080064770d/SCS_2GNM110018_new.pdf).

54. *Transmaster : Electric ARC furnace switches : brochure* [Electronic resource]. – Cleveland, U.S.A.: Joslyn Hi-Voltage, January 2007. – 10 p. – ID DB 750-205. – Mode of access :  
<http://www.industrycortex.com/products/profile/500961969/electric-arc-furnace-switch-vbu-t-transmaster>.

55. *Joslyn Hi-Voltage capacitor switching : brochure [Electronic resource]. – Cleveland, U.S.A.: Joslyn Hi-Voltage September 2013. – 38 p. – Mode of access : [http://www.tnb.ca/aus/pdfs/Joslyn\\_Hi-Voltage\\_Capacitor\\_Switches.pdf](http://www.tnb.ca/aus/pdfs/Joslyn_Hi-Voltage_Capacitor_Switches.pdf).*

56. Синхронные вакуумные выключатели типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000*. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.keps.pro/sites/default/files/resvv216.pdf>.

57. ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий [Текст]. – Введ. 2003–07–01. – М.: Госстандарт России : Изд-во стандартов, 2003. – 27 с.

58. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнергет. спец. вузов [Текст] / В.А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.: ил.

59. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 3-х т. Т. 2. [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.: ил.

60. Основы теории цепей : учеб. для вузов [Текст] / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

61. Перенапряжения в электрических системах и защита от них : учеб. для вузов [Текст] / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ие, 1995. – 320 с.: ил.

62. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками [Текст] / РД 34.20.574: утв. главным техническим управлением по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР 03.09.1984. – М.: Технорматив, 2007. – 16 с.

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

64. Фомин, А.В. Элегазовые выключатели: современное состояние, проблемы, тенденции развития [Текст] / А.В. Фомин // Современная техника и

технологии : сб. трудов XVI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12–16 апр. 2010. – Томск : ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 491–493.

65. Повышение качества функционирования линий электропередачи [Текст] / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников ; под ред. В.П. Горелова и В.Г. Сальникова. – Новосибирск : НГАВТ, 2013. – 559 с.

66. Управление коммутацией батарей статических конденсаторов в электроэнергетических системах [Текст] / P. Taillefer, Г.С. Нудельман, С.В. Балашов, Д.М. Журавлев // Релейщик. – 2014. – № 1. – С. 16–19.

67. *Working group 13.02. Interruption of small inductive currents. Chapter 3. Part A [Text] // Electra. – No. 75. – 1981. – P. 16–17.*

68. *Kano, I. Switching surge phenomena in induction motor windings and their endurance [Text] / I. Kano, T. Nakamada, Y. Kurosawa // Hitachi Review. – 1975. – Vol. 24. – No. 5. – P. 225–232.*

69. Техника высоких напряжений [Текст] / под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ие, 2003. – 608 с.: ил.

70. 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.

71. *A method of evaluating a circuit breaker for a capacitor bank and suppression of restriking overvoltages [Text] / H. Nishikawa, K. Yokokura, S. Matsuda, M. Okawa, H. Koike, T. Kato // IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 1983. – Vol. PAS-102. – No. 6. – P. 1574–1581.*

72. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники : учеб. для студ. электротехн. и приборостроит. специальностей [Текст] / Л.А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с., ил.

73. Бунин, Р.А. Управляемый вакуумный разрядник с высокой отключающей способностью [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. : защищена 11.12.2014 : утв. 27.04.2015 / Р.А. Бунин. – Москва, МЭИ. – 2014. – 167 с.: ил.

74. ГОСТ 17703-72. Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия [Текст]. – Введ. 1973-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 17 с.

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

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

77. Шевцов, Д.Е. Основные принципы синхронной коммутации электрических сетей среднего напряжения / Д.Е. Шевцов // Современная 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.

78. 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. – 70 экз. – ISBN 978-5-7782-2543-5, ISBN 978-5-7782-2544-2 (ч. 1).

79. *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.*

80. 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.

81. Павлюченко, Д.А. Управляемая коммутация токов короткого замыкания [Текст] / Д.А. Павлюченко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2016. – № 1. – С. 45–50.

82. IEC/TR 62271-302. *High-voltage switchgear and controlgear – Part 302 : Alternating current circuit-breakers with intentionally non-simultaneous pole operation* [Text]. – Publ. 2010-06-21. – Int. electrotech. commission, 2010. – 138 p.

83. Дмитриев, М.В. Коммутационное оборудование [Электронный ресурс] / М.В. Дмитриев // Новости Электротехники. – 2012. – № 5 (77). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/77/10.php>.

84. Павлюченко, Д.А. Оценка коммутационного ресурса синхронного вакуумного выключателя [Текст] / Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2016. – № 2. – С. 34–41.

85. А.с. 782007 СССР. Синхронный вакуумный коммутатор [Текст] / А.И. Ковалев, А.Н. Филиппов, М.В. Чалый, О.И. Червинский. – № 2719006/24-07 ; заявл. 29.01.79 ; опубл. 23.11.80, бюл. № 13. – 4 с: ил.

86. А.с. 1138849 СССР. Трехфазный синхронный выключатель [Текст] / В.И. Верескун, А.Т. Чалая, А.М. Чалый и др. – № 3598065/24-07 ; заявл. 03.06.83 ; опубл. 07.02.85, бюл. № 5. – 5 с.: ил.

87. А.с. 1149322 СССР. Устройство для синхронного отключения выключателя [Текст] / Д.А. Сергеев, В.И. Мрыхин, А.Ф. Коломейцев, И.И. Костенко. – № 3484733/24-07 ; заявл. 27.08.82 ; опубл. 07.04.85, бюл. № 13. – 5 с.: ил.

88. Чалый, А.М. Создавая новые стандарты электрооборудования [Электронный ресурс] / А.М. Чалый // Новости электротехники. – 2006. – № 2. – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/38/51.php>.

89. Патент на полезную модель 55222 РФ, МПК Н 02 J 3/18. Устройство управления конденсаторным регулятором напряжения [Текст] / Д.Ф. Алферов, Г.С. Белкин, Ю.А. Горюшин и др. – № 2006105728 ; заявл. 26.02.2006 ; опубл. 27.07.2006, бюл. № 21. – 6 с.: ил.



90. Патент на изобретение 2432635, РФ, МПК *H01H 33/666, H01H 83/00*. Синхронный вакуумный коммутационный аппарат [Текст] / Е.В. Прохоренко, С.И. Одокиенко, И.А. Лебедев – № 2010121938/07 ; заявл. 28.05.2010 ; опубл. 27.10.2011, бюл. № 30. – 7 с. : ил.
91. Васильев, А.Н. *MATLAB*. Самоучитель. Практический подход [Текст] / А.Н. Васильев. – СПб.: Наука и Техника, 2012. – 448 с.: ил.
92. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB. SimPowerSystems* и *Simulink* [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил.
93. Лебедев, И.А. Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.12. : защищена 17.05.2012 / И.А. Лебедев. – Новосибирск, НГТУ. – 2012. – 142 с.: ил.
94. *Pavlyuchenko, D.A. Controlled Vacuum 6 (10) kV Circuit Breaker Model [Text] / 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.*
95. Шевцов, Д. Е. Модель синхронного выключателя 6 (10) кВ [Текст] / Д. Е. Шевцов // Материалы 54-ой международной научной студенческой конференции (МНСК-2016): Энергетика, Новосибирск, 16-20 апреля 2016. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 57.
96. Шевцов, Д. Е. Исследование управляемой коммутации двигательной нагрузки [Текст] / 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.
97. Шевцов, Д. Е. Управляемая коммутация силовых трансформаторов среднего напряжения [Текст] / 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.

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

99. *Dommel, H.W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiple Networks [Text] / H.W. Dommel // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1969. – Vol. PAS#88, iss. 4. – P. 388–399.*

100. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения [Текст] / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.: ил.

101. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. 3-е изд. [Текст] / РД 153-34.0-20.527-98 : утв. Департаментом стратегии развития и научно-технической политики 23.03.1998. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.

102. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ [Текст] / составлены проектно-исследовательским и научно-исследовательским институтом энергетических систем и электрических сетей Энергосетьпроект : утв. Главниипроектom и Главтехуправлением Министерства энергетики и электрификации СССР. – М.: Энергия, 1979. – 151 с.

103. Новаш, И.В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования [Текст] / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 3. – С. 12–24.

104. Вольдек, А.И. Электрические машины : учеб. для студентов вузов [Текст] / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

105. Герман-Галкин, С.Г. *MatLab and Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

106. Справочник по проектированию электроснабжения [Текст] / под ред. Ю.Г. Барыбина, Л.Е. Федорова, М.Г. Зименкова, А.Г. Смирнова – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с. – (Электроустановки промышленных предприятий / под ред. Ю.Н. Тищенко, Н.С. Мовсесова, Ю.Г. Барыбина).

107. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций : справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учеб. пособие для вузов [Текст] / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил.

108. *SimPowerSystems for use with Simulink* [Text] // *The MathWorks, Inc*, 2003. – 620 p.

109. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным [Текст] / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 38–42.

110. Правила устройства электроустановок. 7-е издание [Текст]: утв. Министерством энергетики Российской Федерации 08.07.2002. – М.: НЦ ЭНАС, 2011. – 552 с.

111. Шишкин, С.А. Разряд конденсаторных батарей установок компенсации реактивной мощности [Текст] / С.А. Шишкин // *Силовая электроника*. – 2006. – № 2. – С. 50–52.

112. Осипов, А.В. Повышение надежности электрооборудования установки печь-ковш за счет улучшения условий коммутации вакуумного выключателя [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Осипов. – Магнитогорск, – 2007. – 20 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



**Общество с ограниченной ответственностью  
"Коммутационные, Электронные,  
Преобразовательные Системы"**

630099, Новосибирск,  
ул. Щетинкина, 49 оф.521

Phone: (383) 2279009,  
E-mail: keps.pro@keps.pro

ИНН 5404473749  
ОГРН 1125476198264



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «КЭПС»

Е. В. Прохоренко

«21» декабря 2016 г.

**АКТ**

внедрения результатов кандидатской диссертации

Д. Е. Шевцова в ООО «КЭПС»

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в диссертационной работе Шевцова Д. Е. алгоритмы управляемой коммутации реактивных нагрузок (трансформаторов, электродвигателей, конденсаторных батарей) используются научно-производственным предприятием ООО «КЭПС» (г. Новосибирск) при настройке системы управления синхронного вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000*.

Коммутация синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ согласно предложенным алгоритмам позволяет уменьшить уровень высокочастотных перенапряжений при отключении и амплитуду бросков тока при включении реактивных нагрузок.

Технический директор

А.Н. Черепанский



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»

630005, г. Новосибирск, ул. С.Шамшиных, 80, тел. (383) 289-45-60, факс (383) 224-60-08, e-mail: info@eseti.ru  
Получатель: АО "РЭС" р/счет 40702810100000003612 в Сибирской дирекции ПАО "Межтопэнергобанк" г. Новосибирск  
к/счет 30101810300000000728 в Сибирском ГУ Банка России, ИНН 5406291470, КПП 546050001, БИК 045004728

14.12.2016г

Проректору по научной работе  
ФГБОУ «НГТУ»  
А.Г. Вострецову

620073, г. Новосибирск, пр. К-Маркса, 20

**АКТ**

использования результатов кандидатской диссертации  
Д. Е. Шевцова в АО «Региональные электрические сети»

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы «Модели и методы управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ систем электроснабжения» Шевцова Д. Е., представляют практический интерес для АО «Региональные электрические сети» и используются в филиале «Новосибирские городские электрические сети» для снижения бросков тока и перенапряжений при плановых коммутациях вакуумного выключателя, установленного в ячейке 13, РП-3.

**Первый заместитель генерального директора  
технический директор**



**А.Ф. Челюк**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе НГТУ  
Заслуженный деятель науки РФ,  
д.т.н., профессор



А. Г. Вострецов

» 16 января 2017 г.

## АКТ

использования результатов диссертационной работы

Д. Е. Шевцова в учебном процессе

Результаты диссертационной работы, полученные Д. Е. Шевцовым, используются в учебном процессе на факультете энергетики Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», и магистров по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (в лекционных курсах, а также при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Системы электроснабжения», «Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения»).

Декан факультета энергетики  
к.э.н., доцент

С. С. Чернов