

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

Гаврилова Екатерина Владимировна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ,
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ
КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 - 10 КВ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент С.В. Кузьмин

Красноярск – 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые обозначения и сокращения	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Общие положения	12
1.2 Анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10 кВ	14
1.3 Анализ существующих средств и устройств ограничения коммутационных перенапряжений	19
1.3.1 Кабельные линии.....	19
1.3.2 Нелинейные ограничители перенапряжений	21
1.3.3 Резистивно-емкостные ограничители перенапряжений (RC- ограничители).....	24
1.3.4 Резистивно-емкостные гасители перенапряжения (RC-гасители)	27
1.4 Анализ исследований коммутационных перенапряжений	27
1.5 Анализ существующих методов оценки коммутационных перенапряжений	34
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ.....	45
2.1 Методики измерения коммутационных перенапряжений и обработки статистических данных	45
2.1.1 Методика измерений коммутационных перенапряжений	45
2.1.2 Методика обработки статистических данных.....	50
2.2 Результаты обработки статистических данных при коммутации синхронных и асинхронных высоковольтных электродвигателей.....	54
2.3 Результаты обработки статистических данных при коммутации масляных и сухих трансформаторов.....	62
2.4 Экспериментальные исследования частоты коммутационного импульса.....	74
2.5 Исследование влияния высших гармоник тока на величину коммутационных перенапряжений	78
Выводы по второй главе:.....	79

3	АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....	81
3.1	Общие сведения и методика исследований.....	81
3.2	Физические процессы, возникающие при отключении электродвигателей от сети 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока	83
3.3	Математическая модель коммутационных перенапряжений при наличии высших гармоник тока в результате среза тока без повторных зажигания дуги.....	86
3.4	Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт без средств защиты от коммутационных перенапряжений.....	95
3.5	Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт со средствами защиты от коммутационных перенапряжений.....	98
	Выводы по третьей главе:.....	99
4	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 - 10 КВ.....	101
4.1	Изучение влияния класса напряжения сети на величину понижающего коэффициента	102
4.2	Изучение влияния типа кабельной линии на величину понижающего коэффициента.....	105
4.3	Влияние высших гармоник тока на перенапряжения, возникающие при коммутации силовых трансформаторов.....	107
4.4	Определение корректирующего коэффициента кратности КП	109
4.5	Комплексная методика оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ.....	111

4.5.1	Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями	115
4.5.2	Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт и до 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями.....	116
4.5.3	Оценка перенапряжений при коммутации трансформаторов и электродвигателей мощностью более 1250 кВт и 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями	117
4.6	Сравнительный анализ достоверности прогнозирования перенапряжений комплексным методом и методом экспресс оценки коммутационных перенапряжений	118
	Выводы по четвертой главе:	121
5	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....	122
5.1	Общие сведения.....	122
5.2	Сравнительный анализ эффективности средств защиты от коммутационных перенапряжений	123
5.3	Рациональные области использования и применения устройств защиты от коммутационных перенапряжений	126
5.3.1	Нелинейные ограничители перенапряжений	127
5.3.2	RC- ограничители.....	128
5.3.3	RC-гасители	129
5.4	Усовершенствованный RC-гаситель.....	130
	Выводы по пятой главе:.....	133
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137
	Приложение 1	148
	Приложение 2	159
	Приложение 3	171

Принятые обозначения и сокращения

АД – асинхронный электродвигатель

ВВ – вакуумный выключатель

ДН – делитель напряжения

КП – коммутационные перенапряжения

МВ – масляный выключатель

ОПН – ограничитель перенапряжений нелинейный

СД – синхронный электродвигатель

СЭС – система электроснабжения

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На современном этапе развития систем электроснабжения (СЭС) 6 - 10 кВ промышленных предприятий широко используются вакуумные и элегазовые выключатели, кабели из сшитого полиэтилена, тиристорные преобразователи и преобразователи частоты. Это приводит к тому, что в распределительных сетях присутствуют высшие гармоники, а при коммутации электродвигателей и трансформаторов вакуумными и элегазовыми выключателями возникают коммутационные перенапряжения (КП), величина которых может превышать номинальное напряжение сети в 5 - 7 раз.

Опыт эксплуатации электрооборудования в сетях 6 - 10 кВ показал, что основной объем аварийных отключений связан с пробоями изоляции из-за воздействия КП и естественным старением изоляции. Статистика указывает на то, что около 50% однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6 - 10 кВ горно-металлургических предприятий возникает по причине КП.

Проблема защиты изоляции высоковольтного электрооборудования от КП приобрела наибольшую актуальность после широкого внедрения вакуумных и элегазовых выключателей. Данная проблема наиболее характерна для электроприемников с пониженным уровнем прочности изоляции - электродвигателей, кабелей и трансформаторов, длительно находящихся в эксплуатации.

В период с 1975г. по 2003г. интенсивно разрабатывались средства ограничения КП, такие как ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), RC-ограничители и RC-гасители. Разработка средств защиты от КП позволила в некоторой степени снять остроту проблемы КП, так как снизилось число пробоев изоляции кабельных линий и трансформаторов, однако интенсивность пробоев изоляции обмоток электродвигателей остается весьма высокой.

Это, в первую очередь, связано с отсутствием комплексной методики оценки и прогнозирования КП в распределительных сетях 6 - 10 кВ промышленных предприятий, учитывающей влияние на величину и характер КП не только вакуумных и масляных выключателей, но и элегазовых и электромагнитных, класс напряжения сети, тип кабельной линии и наличие высших гармоник тока, что не позволяет обоснованно подойти к выбору необходимых средств защиты от КП.

Остается открытым вопрос, связанный с эффективным ограничением КП в распределительных сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник тока.

Решение указанных задач является актуальным, так как позволит спрогнозировать величину КП в системах электроснабжения 6 - 10 кВ в случае замены устаревших коммутационных аппаратов на современные и обоснованно подойти к выбору средств защиты от КП как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации систем электроснабжения, что положительно отразится на надежности СЭС.

Целью работы является разработка комплексного метода оценки и прогнозирования КП в высоковольтной системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» и совершенствование средств защиты от КП в сетях 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока.

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

1. Проанализировать современные исследования КП в СЭС 6 - 10 кВ промышленных предприятий, а также методы их оценки и прогнозирования.
2. Выполнить экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями, с последующей статистической обработкой данных для выявления основных факторов, определяющих величину и характер КП.

3. Осуществить математическое моделирование КП в системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» для изучения влияния параметров электроприемника, высших гармоник тока и угла коммутаций на кратность КП.
4. Разработать комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10 кВ на основе совершенствования экспресс - методов за счет учета влияния электромагнитных и элегазовых выключателей, высших гармоник тока, класса напряжения сети и типа кабельной линии на величину перенапряжений.
5. Усовершенствовать конструкцию РС-гасителей, предназначенных для эффективного ограничения КП в сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник тока.

Объект исследования: высоковольтные системы «выключатель – кабельная линия – электродвигатель (трансформатор)», эксплуатируемые в распределительных сетях 6 - 10 кВ горно-металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий.

Предмет исследования: коммутационные перенапряжения, возникающие в системе напряжением 6 - 10 кВ «выключатель – кабельная линия - электроприемник».

Методы исследования. В работе использованы методы теории электрических цепей и электрических измерений, теории СЭС промышленных предприятий, теории электрических машин, численные методы решения уравнений при моделировании переходных процессов в электрических схемах замещения с помощью программного обеспечения MathCAD, методы математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования КП в системах электроснабжения 6 – 10 кВ, включающий:
 - оценку зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов;

- определение возможных диапазонов частоты коммутационного импульса в зависимости от типа и мощности нагрузки для вакуумных, элегазовых, масляных и электромагнитных выключателей, обеспечивающих обоснованный подход к выбору устройств защиты от КП электродвигателей и трансформаторов;
 - установленную зависимость понижающего коэффициента кратности КП от напряжения сети, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и типа изоляции кабельной линии.
2. По результатам математического моделирования установлено для электродвигателей мощностью свыше 1000 кВт существенное влияние на рост кратности КП угла коммутации, а для двигателей менее 1000 кВт и гармонического состава тока.

Практическая значимость:

1. Разработанный комплексный метод оценки и прогнозирования КП позволяет оценить величину КП в любой точке высоковольтной системы: «выключатель – кабель - электроприемник», определить точки с наибольшей кратностью КП и обоснованно выбрать необходимые средства защиты.
2. Разработанный и внедренный RC-гаситель с выносным блоком резисторов обладает устойчивостью к воздействию высших гармоник тока, ограничивает кратность КП в распределительных сетях 6 – 10 кВ до уровня 1,75 и менее и тем самым обеспечивает надежную защиту электродвигателей и трансформаторов от перенапряжений.
3. Для эффективного ограничения КП и снижения вероятности термического разрушения данных устройств определены рациональные области использования ОПН, RC-ограничителей и RC- гасителей.

Реализация полученных результатов. Разработанный комплексный метод оценки и прогнозирования КП использовался при расчетах перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов в системах электроснабжения 6 - 10кВ следующих промышленных предприятий: ОАО

«САЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «ИркАЗ», ОАО «АНПЗ ВНК» и ОАО «Уралкалий». Усовершенствованные РС-гасители успешно эксплуатируются на ОАО «АНПЗ ВНК», ОАО «САЗ» и ОАО «ИркАЗ». За период работы с 2008г. по 2010г. не было зафиксировано ни одного случая выхода из строя электродвигателя по причине воздействия КП.

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по электротехническим специальностям в ФГАОУ ВПО СФУ ИГДГиГ.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается совпадением расчетных значений КП на основе комплексного метода оценки и прогнозирования КП и экспериментальных данных, полученных при измерениях в системах электроснабжения 6-10 кВ таких предприятий, как ОАО «САЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «ИркАЗ», ОАО «АНПЗ ВНК» и ОАО «Уралкалий».

На защиту выносятся:

1. Полученные закономерности максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для элегазовых и электромагнитных выключателей, позволяющие оценить кратность КП на вводах электроприемников.
2. Установленные зависимости понижающего коэффициента кратности КП от класса напряжения сети, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и типа кабельной линии, которые позволяют оценить влияние высших гармоник тока и параметров кабелей на величину перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов.
3. Комплексный метод оценки и прогнозирования КП в системе «выключатель – кабельная линия – электроприемник», позволяющий определить точки с максимальной кратностью КП в зависимости от типа коммутационного аппарата, параметров кабелей и электроприемников, частоты коммутационного импульса, коэффициента искажения синусои-

дальности кривой тока и обоснованно выбрать необходимые средства защиты как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации данной системы.

4. Конструкция РС-гасителя, предназначенного для ограничения КП в сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник тока, и рациональные области использования ОПН, РС-ограничителей и РС-гасителей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: I Международная научно-практическая конференция «ИНТЕХМЕТ-2008» (г.Санкт-Петербург, 2008 г.); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2007 г.); IX Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2008 г.); X Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г.Красноярск, 2009 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 печатных работ, из которых 3 статьи в периодическом издании по списку ВАК; 1 статья в периодическом издании; 6 работ в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 91 наименования. Основной текст диссертационной работы изложен на 147 страницах, проиллюстрирован 32 рисунками и 29 таблицами.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнен анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10 кВ на горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях, расположенных в Восточной Сибири. Проанализирован опыт эксплуатации средств и устройств ограничения коммутационных перенапряжений. Рассмотрены вопросы возникновения коммутационных перенапряжений и основных факторов, определяющих величину и характер коммутационных перенапряжений. Сформулированы задачи аналитических и экспериментальных исследований.

1.1 Общие положения

Исследования, связанные с оценкой и прогнозированием КП в сетях 6 - 10 кВ промышленных предприятий, были выполнены на горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях, расположенных в Восточной Сибири [2, 5, 16, 19, 26, 31, 37, 56]. Условия эксплуатации распределительных сетей 6 - 10 кВ и высоковольтного электрооборудования на данных предприятиях имеют много общего. Для Восточной Сибири в осенний и весенний периоды характерны значительные суточные перепады температуры и влажности. Горно-металлургические и нефтеперерабатывающие заводы характеризуются повышенной загрязненностью окружающей среды.

В процессе технологического цикла горно-металлургических предприятий на высоковольтное электрооборудование воздействуют повышенные механические и вибрационные нагрузки. Широкое использование мощных тиристорных преобразователей в металлургическом производстве, применение частотных приводов на горнодобывающих, горно-перерабатывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях приводит к снижению качества электрической энергии: коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока

и напряжения могут изменяться от 10% до 78% и от 3% до 12% соответственно, отклонения напряжения достигают 12 – 15%, а значение коэффициента мощности изменяется от 0,6 до 0,83. Основная масса высоковольтных электродвигателей (87 %) имеет мощность от 315 кВт до 2500 кВт. В системах электроснабжения 6 - 10 кВ предприятий используются однотипные кабельные линии и коммутационные высоковольтные аппараты [38]. Средний возраст эксплуатируемых кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов составляет более 10 лет [16]. Таким образом, горнодобывающие, горно-перерабатывающие, металлургические и нефтеперерабатывающие предприятия, расположенные в Восточной Сибири, можно рассматривать как единый объект для исследования.

Длительная эксплуатация высоковольтных кабельных линий, высоковольтного электрооборудования и негативное влияние внешних и технологических факторов приводит к интенсивному старению изоляции электрооборудования и кабельных линий, что впоследствии вызывает электрический пробой изоляции. За последние 6 лет наблюдается постоянный рост количества однофазных замыканий на землю. В настоящее время, по оценкам авторов [16, 21, 22, 51], доля однофазных замыканий на землю в общем числе аварийных ситуаций в сетях 6 - 35 кВ составляет 75% - 85%, в то же время в период до 2005г. на однофазные замыкания на землю приходилось 65% - 75% всех аварийных отключений [9, 38, 66, 74]. Из-за низкой селективности защит более 55% однофазных замыканий на землю переходят в двух- или трехфазные короткие замыкания [26, 83].

Период с 2005г. и по настоящее время характеризуется тем, что в системах электроснабжения широко внедряются современные быстродействующие выключатели: вакуумные и элегазовые. Опыт эксплуатации вакуумных и элегазовых выключателей и исследования в области КП показывают, что при отключении индуктивной нагрузки (электродвигатели, трансформаторы, реакторы) в системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» возникают высокие уровни КП, способные привести к электрическому про-

бою ослабленной изоляции кабельных линий и электрооборудования [18, 19, 23]. Поэтому современный анализ аварийности в распределительных сетях 6 - 10 кВ Восточной Сибири необходимо выполнить с учетом широкого внедрения вакуумных и элегазовых выключателей. Данный анализ позволит выявить наиболее слабые места систем электроснабжения, в которых эксплуатируются современные выключатели, установить причину выхода из строя оборудования и разработать комплекс мер, приводящих к повышению надежности сетей электроснабжения.

В настоящей работе в качестве базовых объектов для исследования были выбраны следующие профильные предприятия: горнодобывающие – угольные разрезы Красноярского края (разрез «Бородинский», разрез «Березовский - 1») ОАО «СУЭК»; нефелиновые рудники, принадлежащие компании РУСАЛ; горно-перерабатывающие – ОАО «РУСАЛ - Ачинск» (Ачинский глиноземный комбинат); металлургические – Красноярский, Саяногорский, Хакасский и Братский алюминиевые заводы компании РУСАЛ; нефтеперерабатывающие – Ачинский, Ангарский нефтеперерабатывающие заводы компании ОАО «Роснефть».

1.2 Анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10 кВ

Анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10 кВ был выполнен на базе данных, собранных за период с 1985г. по 2009г. За указанный период было проанализировано более 9000 аварийных отключений, из них на горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях соответственно зафиксировано 5866, 868, 1485 и 781 аварийных отключений.

Значительное число аварийных отключений на угольных разрезах и нефелиновых рудниках связано с тяжелыми условиями эксплуатации распределительных сетей и электрооборудования [4]. К таким условиям относятся: отсутствие кабельных галерей, значительные механические и вибра-

ционные воздействия, резкий перепад температуры в течение суток в весенне-осенний период, ведение буровзрывных работ, наличие развитого железнодорожного или автомобильного транспорта и постоянное перемещение фронта работ при добыче полезных ископаемых. На горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях отсутствуют технологические условия для постоянного перемещения кабельных и воздушных линий. Кабельные линии проложены в специальных траншеях и галереях, что уменьшает негативное воздействие внешних факторов на их изоляцию, степень запыленности электрооборудования несколько ниже, чем на горнодобывающих предприятиях. В совокупности это приводит к более щадящим условиям эксплуатации кабельных линий и электрооборудования, что положительно отражается на надежности систем электроснабжения данных предприятий. Число аварийных отключений в системах электроснабжения горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий значительно ниже, чем на горнодобывающих предприятиях.

Обработка данных по аварийным отключениям в распределительных сетях 6 - 10 кВ показала, что процентное соотношение между однофазными замыканиями на землю, короткими замыканиями и обрывом фаз следующее: 83%, 8% и 6%. В 3% случаев тип аварии установить не удалось. По результатам исследований [50], соотношение между однофазными замыканиями на землю, короткими замыканиями и обрывом фаз на рассматриваемых предприятиях за период с 1985г. по 2003г. следующее: 66%, 17% и 14%. В 3% случаев тип аварии также не был установлен. Таким образом, доля однофазных замыканий на землю за последние 6 лет возросла с 66% до 83%, то есть однофазные замыкания на землю являются основным видом аварий в распределительных сетях 6 - 10 кВ промышленных предприятий, расположенных в Восточной Сибири, поэтому в дальнейшем ограничимся анализом причин и факторов, приводящих к возникновению однофазных замыканий на землю.

При анализе распределения однофазных замыканий на землю по годам временной промежуток был разбит на три части в зависимости от количества вакуумных и элегазовых выключателей, эксплуатируемых в сетях 6 - 10 кВ. Первая часть охватывала период с 1985г. по 1995г., когда доля вакуумных и элегазовых выключателей от общего числа высоковольтных выключателей, эксплуатируемых на горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях составляла, 22%, 6%, 5% и 7%. Вторая часть охватывала период с 1996г. по 2003г., в этот период доля вакуумных и элегазовых выключателей от общего числа высоковольтных выключателей, эксплуатируемых на рассматриваемых предприятиях, составила 65%, 12%, 7% и 15% соответственно. В период с 2003г. по 2009г. происходит интенсивное внедрение вакуумных и элегазовых выключателей на горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях. Доля современных быстродействующих выключателей, эксплуатируемых на горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях, в настоящее время составляет 75%, 56%, 78% и 69%. При этом доля вакуумных и элегазовых выключателей соответственно составляет 56% и 27%.

Анализ аварийных отключений показывает, что использование современных выключателей в сетях 6 - 10 кВ приводит к росту однофазных замыканий на землю. Например, для угольных разрезов увеличение числа вакуумных выключателей в период с 1985г. по 2003г. с 22% до 65% привело к тому, что число однофазных замыканий на землю возросло в 4 раза [50]. Увеличение числа быстродействующих выключателей на горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях за период с 2003г. по 2009г. с 12% до 56%, с 7% до 78% и с 15% до 69% соответственно привело к тому, что количество однофазных замыканий на землю возросло в 2,5 - 4,8 раза, это связано с тем, что вакуумные и элегазовые выключатели инициируют возникновение более высоких уровней КП по сравнению с масляными и электромагнитными выключателями. Величина КП может превы-

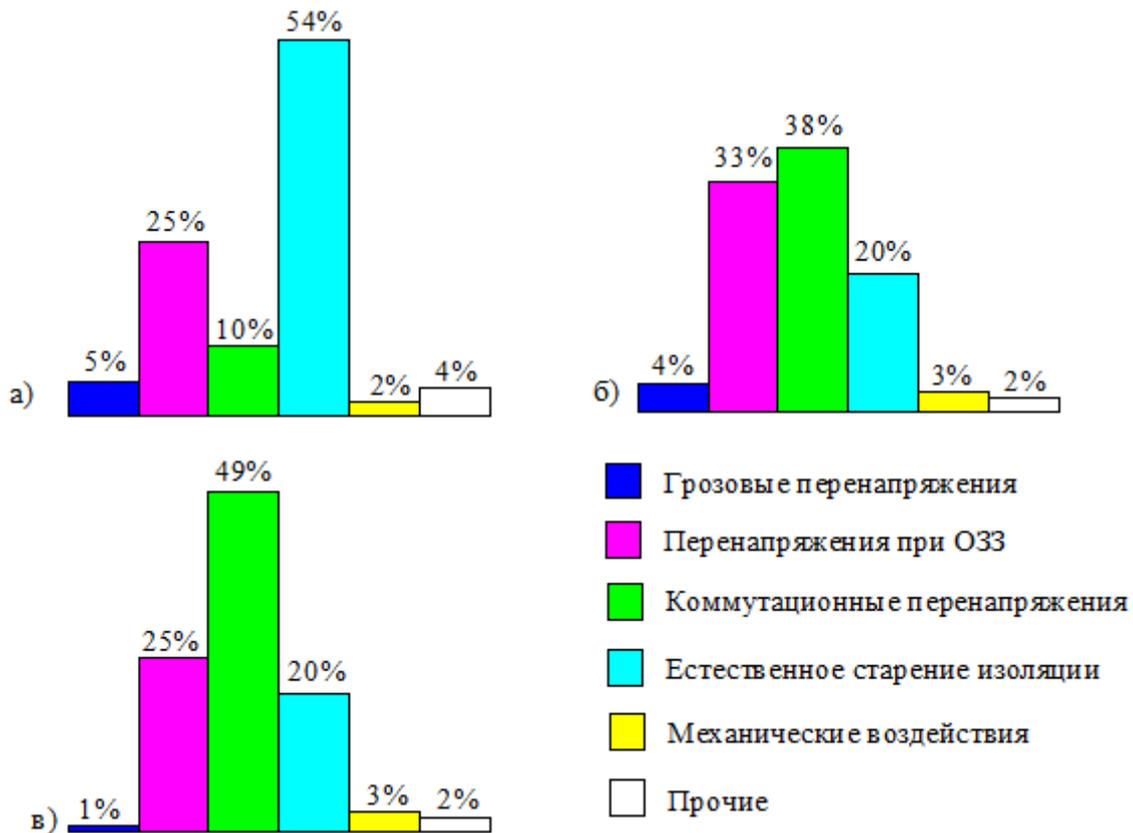
шать номинальное напряжение сети в 5 - 7 раз. Подобные перенапряжения представляют серьезную опасность для изоляции кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов [6, 20, 31, 49, 56].

Для определения удельного веса КП в образовании однофазных замыканий на землю были детально проанализированы условия, при которых наступал пробой изоляции электродвигателей, трансформаторов и кабельных линий. Если пробой изоляции происходил во время грозы, за основополагающий фактор принималось грозовое перенапряжение. Если пробой изоляции был зафиксирован после коммутационных операций, за основу принимали КП. Если пробой изоляции происходил в рабочем режиме, основной причиной считалось естественное старение изоляции. Механическое воздействие на изоляцию принималось за причину пробоя изоляции, если при осмотре места аварии были отчетливо видны механические повреждения изоляции. Если в режиме однофазных замыканий на землю наблюдались множественные повреждения кабельных линий и электрооборудования, основной причиной пробоя изоляции считались перенапряжения, возникающие в режиме однофазных замыканий на землю. На рисунке 1.1 показан удельный вес основных причин, приводящих к возникновению однофазных замыканий на землю за три временных периода.

Данные, представленные на рисунке 1.1, наглядно показывают, что КП являются основополагающим фактором возникновения однофазных замыканий на землю на современном этапе развития систем энергоснабжения 6 - 10 кВ промышленных предприятий. Практически 50% однофазных замыканий на землю происходит за счет КП.

За счет перенапряжений, возникающих в режиме однофазных замыканий на землю, происходит множественное повреждение изоляции кабельных линий или электрооборудования в каждом четвертом случае, что ниже по сравнению с 2003г. на 8%. Это связано с тем, что на Ачинском глиноземном комбинате, на некоторых подстанциях угольного разреза «Бородинский» используются резисторы в нейтрали сетей 6 - 10 кВ. Использование резистивно-

го режима нейтрали позволяет ограничить перенапряжения в режиме однофазных замыканий на землю до уровня $(2,1 - 2,3)U_{ном}$, что приводит к снижению пробоев изоляции в режиме однофазных замыканий на землю [66, 74, 80].



а) период 1985г. - 1995г.; б) период 1996г. - 2003г.; в) период 2004г. - 2009г.;

Рисунок 1.1 – Удельный вес основных причин однофазных замыканий на землю

Снижение пробоев изоляции из-за грозовых перенапряжений уменьшилось в 4 раза, так как для ограничения грозовых перенапряжений широко используются нелинейные ограничители перенапряжений, которые по эффективности превосходят вентильные разрядники [13].

Возникновение аварийных отключений в системе электроснабжения 6 - 10 кВ за счет естественного старения изоляции не увеличилось, это связано с тем, что изношенные кабельные линии заменяют современными кабельными линиями из сшитого полиэтилена, обладающими высокой электрической прочностью изоляции [47].

Удельный вес причин, приводящих к возникновению однофазных замыканий на землю за счет механических воздействий и прочих причин, остался на прежнем уровне.

Таким образом, для снижения аварийности в системах электроснабжения 6 - 10 кВ и, как следствие, повышения её надежности необходимо эффективно ограничивать КП. Эффективного ограничения КП можно достичь за счет комплексного подхода, связанного с использованием методов оценки и прогнозирования КП как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации системы электроснабжения, с применением необходимых устройств ограничения КП и рациональным выбором места установки и подключения данных средств к объектам защиты. Для этого необходимо рассмотреть эффективность эксплуатируемых устройств ограничений КП, выполнить анализ исследований КП в сетях 6 - 10 кВ, проанализировать существующие методы и способы оценки и прогнозирования КП.

1.3 Анализ существующих средств и устройств ограничения коммутационных перенапряжений

В настоящее время для ограничения КП используют следующие естественные средства и устройства: кабельные линии, ОПН, РС-ограничители и РС-гасители.

1.3.1 Кабельные линии

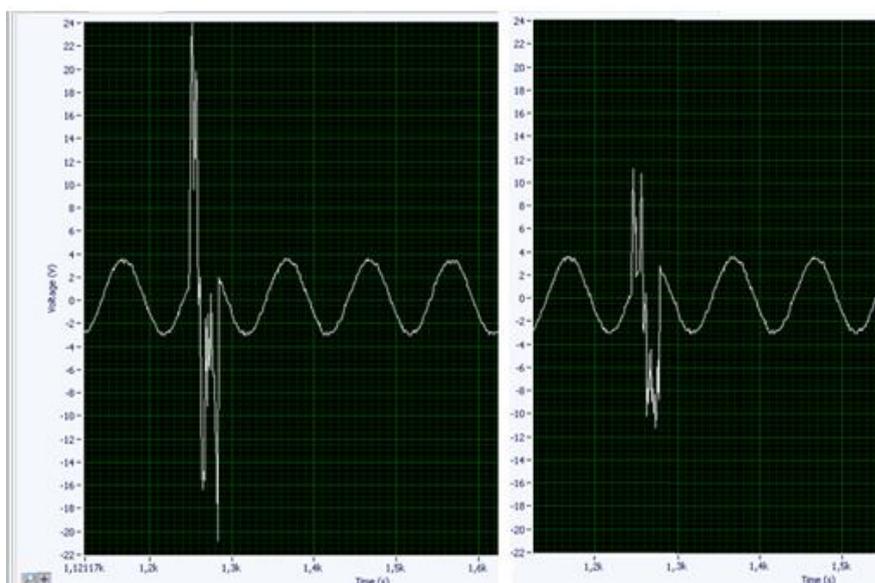
Принято считать [46, 63, 70], что ограничение КП может быть достигнуто нормированием минимальной длины кабеля между высоковольтным выключателем и коммутируемой нагрузкой. Защитное действие кабельной линии основано на уменьшении волнового сопротивления коммутируемого контура за счет собственной емкости кабеля. Параметры кабеля, выключателя и индуктивной нагрузки являются определяющими в формировании КП [57].

Например, считается, что увеличение емкости системы «кабель – электродвигатель» и активно-индуктивного сопротивления кабеля приводит к снижению амплитуды и крутизны импульсов КП, а также уменьшает число повторных зажиганий дуги в выключателе. В работе [57] доказывается, что при длине кабельной линии более 100м между выключателем и нагрузкой перенапряжения из-за среза тока в выключателе не возникают. Данное заключение было сделано без учета частоты коммутационного импульса.

В институте Горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского Федерального университета на кафедре «Электрификация горно-металлургического производства» группой исследователей при участии автора данной диссертации были получены иные результаты. Установлено, что при частоте коммутационного импульса свыше 45кГц кабельная линия из «сглаживающего» фильтра превращается в «запирающий» фильтр. Это связано с тем, что при высокой частоте коммутационного импульса ($f \geq 45$ кГц) возрастает продольное индуктивное сопротивление кабеля, а также увеличивается его активное продольное сопротивление за счет поверхностного эффекта. Это приводит к тому, что на зажимах электродвигателя или трансформатора при их отключении от сети вакуумным или элегазовым выключателем возникают максимальные КП, а в месте соединения кабельной линии с выключателем КП минимальные [24, 53].

Данный эффект иллюстрируется с помощью осциллограммы, представленной на рисунке 1.2.

Из представленных осциллограмм видно, что на зажимах электродвигателя кратность перенапряжения составляет $4,9U_{ном}$, а на зажимах выключателя кратность перенапряжения равна $2,4U_{ном}$, то есть амплитуда коммутационного импульса снижается по мере удаления в сторону выключателя от индуктивной нагрузки. Частота коммутационного импульса составляла 63 кГц при длине кабельной линии равной, 370м, сечением жилы кабеля 70 мм². Детальное изучение влияния длины и сечения кабельной линии на величину и характер КП изложено в работе [5].



а)

б)

а) коммутационные перенапряжения на зажимах электродвигателя;

б) коммутационные перенапряжения на зажимах выключателя

Рисунок 1.2 – Осциллограмма отключения синхронного электродвигателя мощностью 500 кВт с помощью элегазового выключателя

Таким образом, использование кабельной линии как средства ограничения КП возможно, если частота коммутационного импульса не превышает 45 кГц. В противном случае кабельная линия не способствует снижению кратности КП на зажимах нагрузки.

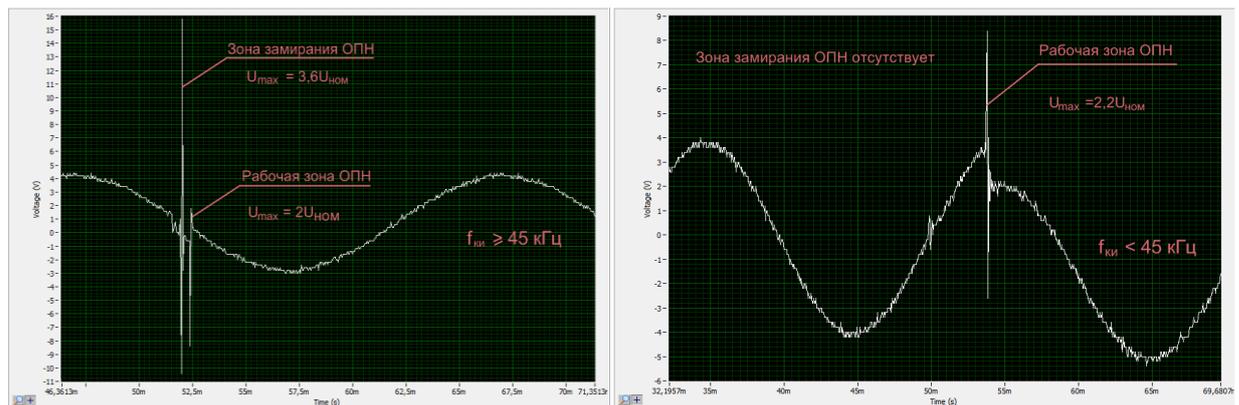
1.3.2 Нелинейные ограничители перенапряжений

Для защиты электродвигателей и силовых трансформаторов от КП широко используются нелинейные ограничители перенапряжений.

Анализ технических характеристик современных ОПН, которые эксплуатируются в сетях 10 кВ, показывает, что остаточное напряжение на ОПН в момент его срабатывания может изменяться от 22 до 24 кВ, а для ограничителей перенапряжений в сетях 6 кВ остаточное напряжение изменяется от 13 до 14 кВ [2, 42, 43]. Следовательно, современные ОПН ограничивают КП до уровня $(2,2 - 2,4)U_{ном}$. Подобный уровень ограничения КП представляет серьезную опасность для изоляции электродвигателей, так как превышает допу-

стимулю кратность перенапряжения, равную 1,8, и не оказывает опасного влияния на изоляцию обмоток силовых трансформаторов, так как допустимая кратность перенапряжений для трансформаторов составляет 2,8, что выше уровня ограничения КП ОПНОм [50].

Последние исследования, выполненные в Сибирском Федеральном университете при участии автора, показали, что при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц в работе ОПН наблюдается «зона замирания». «Зона замирания» характеризуется тем, что ОПН не реагирует на возникновение перенапряжения, амплитуда которого в несколько раз может превышать порог срабатывания (уровень ограничения) ОПН. Это может привести к пробую изоляции обмоток высоковольтных электродвигателей, так как частота коммутационного импульса свыше 45 кГц наблюдается при коммутации электродвигателей мощностью от 200 кВт до 2500 кВт. Длительность «зоны замирания», как правило, не превышает 2 - 3 периодов колебаний напряжения коммутационного импульса и составляет менее $4 \cdot 10^{-5}$ с [17]. Данный эффект иллюстрируется осциллограммами, представленными на рисунке 1.3



а)

б)

- а) отключение синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем;
- б) отключение синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем

Рисунок 1.3 – «Зона замирания» в работе ОПН

высоковольтной сети при срабатывании ОПН в режиме однофазного замыкания на землю

Например, средняя наработка на отказ для нелинейных ограничителей перенапряжений, которые эксплуатируются на угольных разрезах Красноярского края, составляет 14 месяцев [52]. Характерный вид термического разрушения ОПН представлен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Характерный вид термического разрушения ОПН в режиме однофазного замыкания на землю

Таким образом, основными недостатками в работе ОПН является «зона замирания» при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц и низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю.

1.3.3 Резистивно-емкостные ограничители перенапряжений (РС-ограничители)

Принцип работы РС-ограничителей основан на уменьшении волнового сопротивления защищаемого объекта за счет увеличения присоединенной емкости. В работе РС-ограничителя не обнаружена «зона замирания», так как за счет его емкости частота коммутационного импульса не превышает 3,5 кГц.

Кроме этого, использование в конструкции РС-ограничителя конденсатора позволяет снизить скорость нарастания напряжения переднего фронта коммутационного импульса, так как за счет емкости конденсатора возрастает присоединенная емкость на зажимах электроприемника:

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{i_0}{C}, \quad (1.1)$$

Это благоприятно отражается на эксплуатации изоляции обмоток электродвигателей.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений РС-ограничителями находится в диапазоне $(1,45 - 1,7)U_{ном}$, что ниже допустимого уровня перенапряжений, которые могут выдержать изоляции высоковольтных электродвигателей и трансформаторов.

Недостатком РС-ограничителя является увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю. В режиме однофазного замыкания на землю РС-ограничитель генерирует в сеть добавочный емкостной ток, величина которого составляет 0,7А. Это связано с тем, что базовые элементы (РС-цепи) собраны по схеме «звезда» с заземленной нейтральной точкой. Увеличение емкостного тока ОЗЗ негативно отражается на условиях электробезопасности, так как с ростом тока однофазного замыкания на землю увеличивается напряжение прикосновения и шага.

Массовое использование РС-ограничителей может привести к изменению режима нейтрали сети 6 - 10 кВ с изолированного на компенсированный режим нейтрали, а в сетях с компенсированным режимом нейтрали потребуется установка более мощных дугогасящих реакторов, что влечет дополнительные экономические затраты.

Следует отметить, что РС-ограничители могут быть подвержены термическому разрушению из-за длительного воздействия токов высших гармоник. Это связано с конструкцией РС-ограничителя.

Современные РС-ограничители имеют емкость, равную 0,25 мкФ на фазу. Последовательно с емкостью включен резистор величиной 50 Ом, мощностью 60 Вт. РС-цепь помещена в специальный герметичный корпус. Вследствие протекания токов высших гармоник емкостное сопротивление уменьшается и на резисторе возрастает мощность рассеяния. При длительном

протекании токов высших гармоник резисторы интенсивно нагреваются и вызывают термическое разрушение РС-ограничителя. С учетом того, что РС-цепи собраны по схеме «звезда» с заземленной нейтральной точкой, по фазным РС-цепям может протекать весь спектр токов высших гармоник, что способствует более интенсивному нагреву РС-ограничителя.

Опыт эксплуатации РС-ограничителей для подавления КП на печных трансформаторах оказался отрицательным. Средняя наработка на отказ составляла 18 месяцев, так как при работе печных трансформаторов генерируется широкий спектр высших гармоник тока. Длительность существования высших гармоник тока ограничивается временем плавки, которое изменяется от 1,5 до 3 часов.

На рисунке 1.6 приведен пример термического разрушения РС-ограничителя.



Рисунок 1.6 – Характерный вид термического разрушения РС-ограничителя

Таким образом, главным недостатком РС-ограничителя является его влияние на величину и характер тока однофазного замыкания на землю, следовательно, на условия электробезопасности и недостаточная термическая устойчивость к воздействию токов высших гармоник.

1.3.4 Резистивно-емкостные гасители перенапряжения (RC-гасители)

Принцип действия RC-гасителя аналогичен принципу действия RC-ограничителя. Отличительной чертой RC-гасителя от RC-ограничителя является схема соединения RC-цепей. RC-цепи RC-гасителей собраны по схеме «треугольник». Это позволяет ограничить спектр протекающих токов по RC-цепям. По RC-цепям не будут протекать гармоники кратные трем, что приводит к повышению термической устойчивости RC-гасителя от воздействия внешних гармоник тока. Соединение RC-цепей, собранных по схеме «треугольник», не оказывает влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю.

Таким образом, RC-гасители более устойчивы к термическому воздействию к токам высших гармоник и не оказывают влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю.

На основании материала, изложенного в разделе 1.3, можно сделать вывод, что наиболее надежным устройством ограничения КП на современном этапе является RC-гаситель.

Для повышения эффективности существующих средств защиты от КП необходимо проанализировать результаты исследований КП.

1.4 Анализ исследований коммутационных перенапряжений

Состояние изоляции электрооборудования, определяющее надёжность работы и безопасность его обслуживания, во многом зависит от воздействующих на неё перенапряжений. Наряду с атмосферными перенапряжениями и перенапряжениями, обусловленными однофазными замыканиями на землю, в сетях с изолированной нейтралью существенное влияние на изоляцию электрооборудования оказывают КП, особенно в установках с частыми коммута-

циями, которые коммутируются вакуумными или элегазовыми выключателями.

С физической точки зрения, КП возникают при отключении индуктивной нагрузки - трансформаторов или электрических двигателей.

Проблема КП была обнаружена на стадии исследований, направленных на использование вакуума в системах дугогашения выключателей.

На первоначальном этапе научных исследований основное внимание было направлено на изучение механизма возникновения среза тока и факторов, влияющих на его величину.

В работах [11, 14, 15] приводятся результаты исследований по данному вопросу. В них показано, что срез тока возникает при отключении незначительных по величине токов нагрузки вследствие нестабильного горения дуги в вакуумной дугогасящей среде межконтактного промежутка вакуумного коммутационного аппарата. Исследования выявили, что на процессы, ведущие к преждевременному обрыву тока, основное влияние оказывают теплофизические параметры контактных материалов выключателей.

В работах [11, 14] приведены результаты исследований зависимости уровня среза тока от индуктивности нагрузки и напряжения питающей сети, из которых видно, что ни индуктивность, ни напряжение не оказывают существенного влияния на уровень среза тока. Дальнейшие исследования подтвердили, что основное влияние на срез тока в выключателе оказывают контактные материалы [11]. Было определено, что снижения возникающего переходного напряжения вследствие преждевременного обрыва дуги можно добиться путем применения контактных материалов с продолжительным временем горения дуги, т.е. с применением мягких материалов.

Однако такой путь не всегда является приемлемым, так как необходимо учитывать взаимоисключающие требования к коммутационному аппарату: сваривание контактов, их износ и способность отключать большие токи. В то же время продолжающиеся научно-исследовательские работы в этой области позволили создать новые контактные материалы. Уровень среза тока та-

ких контактов снизился в несколько раз. Так, в вакуумных коммутационных аппаратах напряжением 10 кВ с номинальным током до 400А используется сплав Fe(70%)-Cu(27%)-Bi(3%) марки ЖДВ, дающий максимальный срез тока $i_{cp}=1A$ (камера КДВ2-10/5/400УХЛ2) [45].

Для ранее выпускавшихся аналогичных коммутационных аппаратов максимальный срез тока равнялся 2,5А (камера КДВ-6/400У2).

Одной из отраслей в нашей стране, где были внедрены первые вакуумные выключатели и начаты экспериментальные исследования перенапряжений при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумной коммутационной аппаратурой, является горнодобывающая промышленность. В работе [72] приведены результаты экспериментальных исследований перенапряжений, проведенных в 1975 году институтом ВНИИГидропром в Кузбассе. Измерения проводились при коммутации вакуумными выключателями электродвигателей типа ДАЗ мощностью 1500 кВт углесосных установок пульпоперекачивающей станции. Максимальные перенапряжения после статистической обработки экспериментальных данных имели следующие значения: в режиме рабочей нагрузки – $2,2U_{фм}$ при токах среза не более 20А; в процессе пуска – $1,8 U_{фм}$; в режиме холостого хода – $2,94 U_{фм}$.

Практически в то же время в Красноярском институте цветных металлов и золота им. М.И. Калинина совместно с представителями Канско-Ачинского теплоэнергетического комплекса были выполнены одни из первых измерения КП на сетевых высоковольтных электродвигателях экскаваторов. Измерения проводились на электродвигателях мощностью 520 кВт, 1250 кВт и 1500 кВт. В результате были получены следующие максимальные значения КП для указанных двигателей: $6,5U_{фм}$; $4,4U_{фм}$ и $4,1U_{фм}$ [29, 78, 79, 84, 85].

Значительные расхождения в полученных результатах объясняются несовершенством методик и средств измерения.

Дальнейшие исследования в области КП были направлены на разработку более точных средств измерений и более глубокое изучение влияния основных физических факторов на величину КП: физический и виртуальный

срез тока, повторное зажигание дуги в системе дугогашения выключателя и эскалация напряжения.

Для измерения КП использовались клидонографы, тениографы, пиковые вольтметры, лучевые осциллографы [71]. Для подключения указанных приборов, как правило, использовались измерительные трансформаторы напряжения, активные и емкостные делители напряжения. Применение указанных делителей и измерительных трансформаторов напряжения приводило к существенным отклонениям зафиксированных значений перенапряжений от реальных значений. Кроме этого, активные и емкостные делители напряжения обладали большими габаритами и весом, что затрудняло их использование в промышленных условиях.

Поэтому основная масса исследований в период с 1975г. по 1985г. производилась в лабораторных условиях и на основе математического моделирования.

В результате исследований было установлено, что срез тока характерен для выключателей любого применяющегося в настоящее время типа (маломасляных, электромагнитных, воздушных, вакуумных, элегазовых). Причиной среза тока в выключателях с гашением дуги в газовой среде являются интенсивное дутье и развитие высокочастотных колебаний на спадающем участке синусоиды отключаемого тока [90]. Дутье вызывает значительное охлаждение плазмы в дуговом промежутке и быстрое уменьшение ее проводимости.

В вакуумных выключателях причиной среза тока является неустойчивость дуги при малых токах, так как она горит в парах металла контактов.

При срезе тока в индуктивности нагрузки «запирается» энергия, которая затем освобождается на емкость присоединения и может вызывать перенапряжения. Считается, что кратность перенапряжений при этом определяется индуктивностью нагрузки, емкостью присоединения (в основном длиной кабельной или воздушной линии) и величиной среза тока. Последний параметр различается для выключателей с разными дугогасящими средами. На рисун-

ке 1.7 приведена диаграмма относительных токов среза для выключателей разного типа [87].

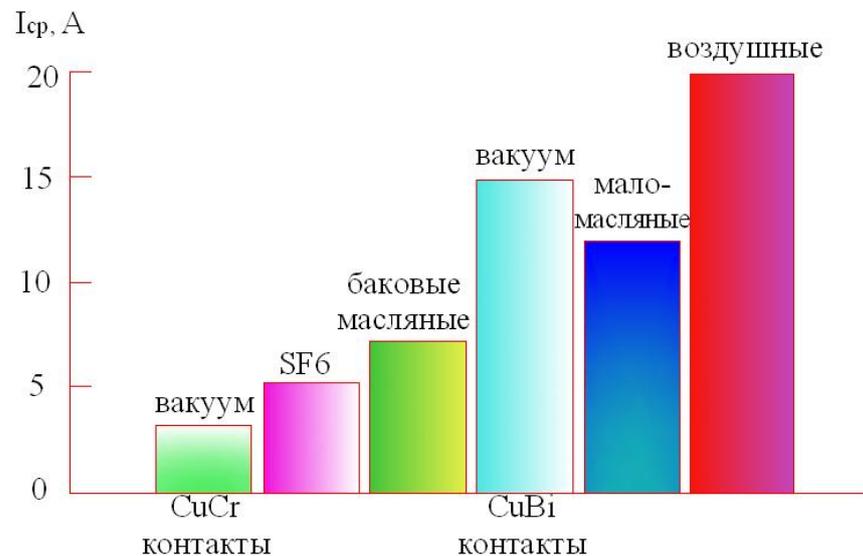


Рисунок 1.7 – Относительные токи среза выключателей с разными дугогасящими средами

Как видно из рисунка 1.7, вакуумные выключатели с хромомедными контактами имеют наименьший срез тока. Он составляет 5 - 6 А по данным различных исследований, информация о которых приведена в [36]. Большинство производителей вакуумных выключателей используют для изготовления контактов именно хромомедные композиции. Элегазовые выключатели с гашением дуги вращением (rotary-arc type) или автодутьём (self-pressurizing type) имеют срез тока практически такой же, как и вакуумные выключатели. Это связано с тем, что интенсивность дугогашения у них зависит от величины протекающего тока. У компрессионных (puffer type) и комбинированных элегазовых выключателей с дополнительным поршнем срезы тока больше по величине, чем у вакуумных выключателей. В принципе, срез тока элегазовых выключателей зависит от величины отключаемого тока, конструкции выключателя и емкости присоединения и может значительно превышать таковой для вакуумных выключателей. Таким образом, с точки зрения величины среза тока и создаваемых перенапряжений элегазовые выключатели не име-

ют никаких преимуществ перед вакуумными выключателями [70]. Данное заключение получено в лабораторных условиях.

В работах [36, 37, 70, 90,91] доказывалось, что причиной возникновения КП, кроме физического среза тока, многократных повторных зажиганий дуги в дугогасительной системе выключателя, может служить и виртуальный срез тока.

Виртуальный срез тока, как правило, возникает при многократных повторных зажиганиях дуги.

При повторном зажигании дуги в первой отключенной фазе выключателя появляется высокочастотный ток, который через паразитные емкости выключателя проникает в соседние фазы. В результате наложения данного тока на ток промышленной частоты, имеющий противоположную полярность, в этих фазах могут возникать срезы тока значением в сотни ампер.

Причиной возникновения КП может служить и эскалация напряжения.

Это явление характерно только для вакуумных выключателей. Оно возникает крайне редко, только при отключении пускового тока не успевших развернуться или заторможенных электродвигателей. Физическая сущность этого явления описана в работе [36]. Перенапряжения в этом случае могут достигать 6 – 8-кратных значений.

Вероятность появления эскалации напряжения зависит от числа повторных зажиганий дуги в вакуумной камере выключателей. В работе [48] показано, что эскалация напряжения возникает, если число зажиганий дуги более 10.

Помимо изучения физических явлений, приводящих к возникновению КП, ряд исследователей занимался анализом влияния основных элементов системы электроснабжения на величину и характер КП [1, 11, 14, 30, 32, 36, 62].

Рассматривались следующие вопросы: влияние длины и сечения кабельной линии на величину КП при отключении электродвигателей и трансформаторов. Изучалось влияние типа и мощности электродвигателей и силовых трансформаторов на возможность возникновения КП при коммутации различ-

ными типами выключателей [35, 52, 62]. Детально изучалось влияние типа коммутационного аппарата на величину и характер КП, которое в основном затрагивало вакуумные и масляные выключатели, так как в период с 1996г. по настоящее время происходит массовая замена масляных выключателей на вакуумные [5, 50, 62]. Проблеме коммутации электродвигателей с заторможенным ротором посвящены следующие работы [3, 12, 34, 48, 55].

В работах [5, 50, 52] показано, что с ростом мощности электродвигателей и трансформаторов величина КП снижается. Например, максимальные кратности КП, зафиксированные для асинхронных электродвигателей мощностью 315, 500, 1250, 2500 кВт, соответственно равны 4,8; 4,5; 3,6; 2,8. Для масляных трансформаторов мощностью 250, 400, 630, 1000, 1600 кВА зафиксированы максимальные кратности КП, которые составляют 3,0; 2,5; 2,1; 1,7; 1,5. Данные результаты получены на основе обширных экспериментальных исследований, выполненных в период с 2000г. по 2006г., что позволило выявить влияние типа и мощности нагрузки, длины и сечения кабельной линии на величину КП в зависимости от типа выключателя (вакуумного или масляного) [5, 50, 62].

В работе [35] приведены значения коэффициентов перенапряжения, определенные при отключениях воздушными и масляными выключателями в различных режимах работы электродвигателей мощностью 100 - 250 кВт, напряжением 6 кВ. Показано, что воздушные выключатели способствуют возникновению КП, величина которых в 1,5 - 1,7 раза превышает КП, создаваемые масляными выключателями. Наибольшие перенапряжения были зафиксированы при отключении электродвигателей с заторможенным ротором.

В работе [5] предпринята попытка исследовать влияние технологических процессов на величину КП, возникающих при отключении электродвигателей и трансформаторов вакуумными и масляными выключателями. Показано, что технологические процессы на горнодобывающих, горноперерабатывающих и металлургических предприятиях не влияют на величину и характер КП.

Кроме этого, отметим, что вышеперечисленные источники в основном затрагивают два типа выключателей: вакуумные и масляные. Практически отсутствуют работы о влиянии электромагнитных выключателей, которые ещё широко используются на нефтеперерабатывающих предприятиях и отчасти на горных и горно-перерабатывающих предприятиях, на величину и характер КП в совокупности с параметрами кабельной линии и нагрузки.

Работы, посвященные исследованию элегазовых выключателей на величину КП в зависимости от длины и сечения кабельной линии, типа и мощности электродвигателей и силовых трансформаторов, носят точечный характер и не дают полноты сведений в данном направлении, которые можно было бы использовать при разработке инженерных методик по оценке КП.

Очевидно, что систематизация знаний о физических явлениях, приводящих к возникновению КП, а также о влиянии отдельных элементов системы электроснабжения, электродвигателей и трансформаторов на величину КП, позволит разработать инженерные методики по оценке и прогнозированию КП при использовании различных типов выключателей. Наличие подобных методик обеспечит обоснованный подход к выбору устройств защиты и оценки их эффективности, что в конечном итоге повысит надежность систем электроснабжения.

Ниже приведен анализ существующих методов оценки и прогнозирования КП.

1.5 Анализ существующих методов оценки коммутационных перенапряжений

В настоящее время существуют следующие методы оценки КП: экспериментальный метод [46, 54], методы математического [50, 86] и физического моделирования [81], экспресс - методы оценки [5].

Методы математического моделирования. Применение ЭВМ и современных пакетов математических программ позволяет производить мате-

математическое моделирование трехфазных схем замещения питающей сети, выключателя, кабеля и электроприемника. Это дает возможность учесть влияние естественной несимметрии изоляции отдельных фаз, несинхронность замыкания или размыкания контактов. Однако описание процесса инициализации КП в этом случае является очень трудоемкой задачей, так как необходимо составить и решить большое количество дифференциальных уравнений в частных производных, составленных для трехфазной схемы замещения.

Много проще представляется решение задачи математического моделирования на основе однолинейной схемы замещения вследствие значительного сокращения количества дифференциальных уравнений [57].

В работах [50, 57, 67] выполнены теоретические исследования КП и получены аналитические выражения для расчета напряжения на нагрузке при ее коммутации.

Так, в работе [50] выведены выражения для определения напряжения на нагрузке в момент неселективного отключения электродвигателя в режиме однофазного замыкания на землю вакуумными выключателями.

В работе [57] получены выражения для определения перенапряжений на нагрузке с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя.

Аналитические выражения, представленные в работах [50, 57], сложно использовать в практическом применении при оценке КП для большого числа электродвигателей с различными параметрами, так как не все параметры, используемые в приведенных выше выражениях, указаны в паспортных данных электродвигателей, в частности, ёмкость электродвигателя встречается достаточно редко в справочниках.

С помощью математического моделирования можно выявить основные закономерности при коммутации электрических машин. Например, в работе [57] при исследовании процессов отключения ненагруженных синхронных двигателей мощностью 250 и 630 кВт вакуумным выключателем получены КП на зажимах электродвигателей кратностью 5 и 2,9 соответственно. Однако при

выполнении экспериментальных исследований КП было установлено, что при отключении аналогичных синхронных электродвигателей максимальная кратность КП составила 6,9 и 6,3 соответственно.

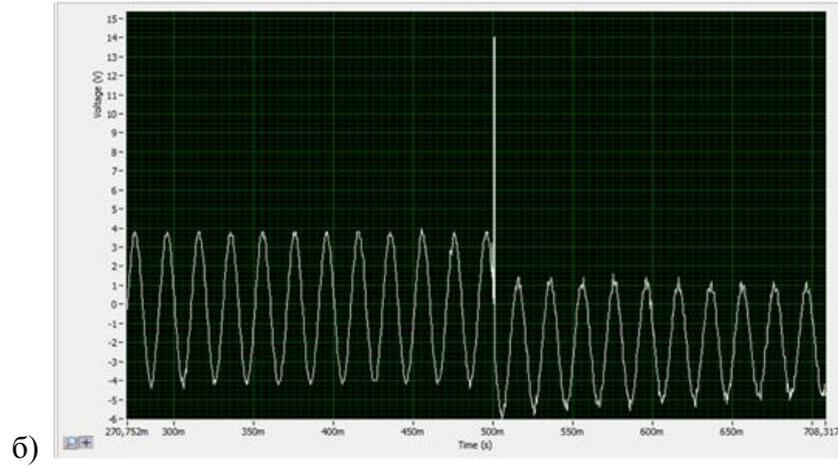
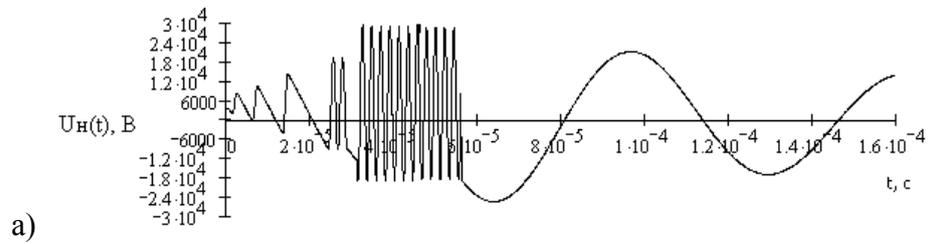
Различие данных, полученных с помощью аналитических исследований на основе математического моделирования, и экспериментальных данных связано с тем, что при математическом описании переходных процессов всегда принимается ряд допущений, например:

- обмотка электрической машины считается линейной цепью, параметры которой не зависят от величины тока и напряжения;
- все параметры схемы замещения постоянны в течение всего времени протекания процесса и не зависят от частоты;
- значение напряжения сети при частоте сети 50 Гц считается квазипостоянной величиной, равной мгновенному значению напряжения в начальный момент переходного процесса;
- ротор электрической машины неподвижен.

В результате принятых допущений наблюдаются отличия в протекающих процессах при отключении электродвигателей, полученные на основе математического моделирования и реальных измерений.

На рисунках 1.8 и 1.9 приведены осциллограммы переходных процессов, полученные с помощью математического моделирования процесса отключения асинхронных двигателей мощностью 250 и 630 кВт напряжением 6 кВ [57], и осциллограммы, снятые при отключении реальных электродвигателей.

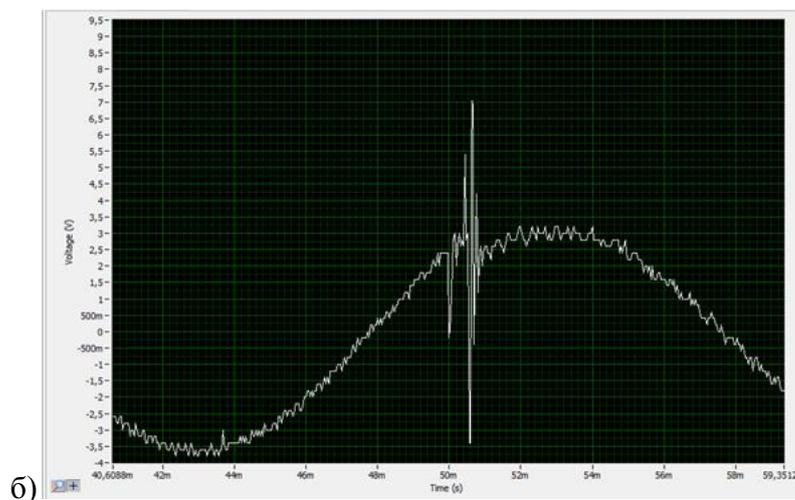
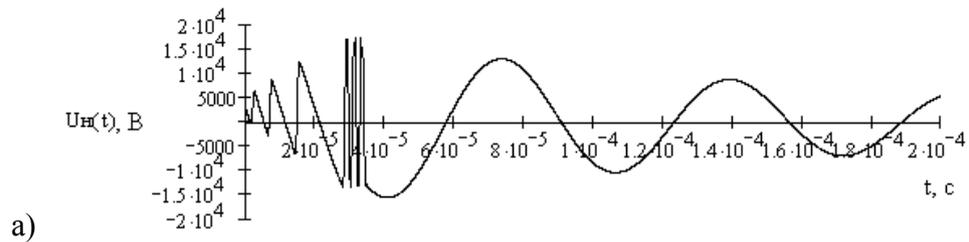
Из представленных осциллограмм видно, что существенно различаются характеры переходных процессов. Это, в первую очередь, связано с нелинейным характером параметров электродвигателя и наличием ЭДС выбега.



а) осциллограмма, полученная при математическом моделировании $K_{\max} = 5$;

б) осциллограмма, полученная при экспериментальном измерении $K_{\max} = 7$.

Рисунок 1.8 – Осциллограммы процесса отключения синхронного электродвигателя мощностью 250 кВт



а) осциллограмма, полученная при математическом моделировании $K_{\max} = 2,9$;

б) осциллограмма, полученная при экспериментальном измерении $K_{\max} = 3,16$.

Рисунок 1.9 – Осциллограммы процесса отключения синхронного электродвигателя мощностью 630 кВт

Применение математического моделирования, основанного на использовании любой схемы замещения, требует достоверного математического аппарата расчета перенапряжений, учитывающего большое количество факторов; точных сведений о параметрах схемы замещения конкретного электроприемника с учётом нелинейного характера данных параметров; квалифицированного специалиста; значительных затрат времени при математической оценке перенапряжений для большого количества электроприемников.

Методы физического моделирования. Данные методы основаны на измерении перенапряжений, полученных на физической модели, в основу которой положены реальные элементы согласно схеме замещения (активные, индуктивные и емкостные сопротивления).

Оценка максимальных перенапряжений для большого количества реальных электроприемников таким методом потребует широкой вариации параметров элементов физической модели, что приведет к значительным затратам времени на проведение данных исследований [82].

Физическое моделирование позволяет оценить зависимость перенапряжения от ряда основных факторов: типа выключателя, нагрузки, угла коммутации, длины кабельной линии - и не представляет возможным учесть процессы, протекающие в реальной электрической машине, из-за нелинейного характера параметров машины и сочетания всех случайных факторов, которые влияют на величину КП. Осциллограммы, приведенные на рисунке 1.10, иллюстрируют, что при отключении одного электродвигателя типа АЭЗ-400Л мощностью 250 кВт, установленного на экскаваторе ЭЖГ-5, зафиксированы перенапряжения различной кратности от $1,1U_{ном}$ до $7U_{ном}$. Это указывает на то, что для получения сведений о закономерности возникновения максимально возможных КП необходимо использовать методы статистического анализа.

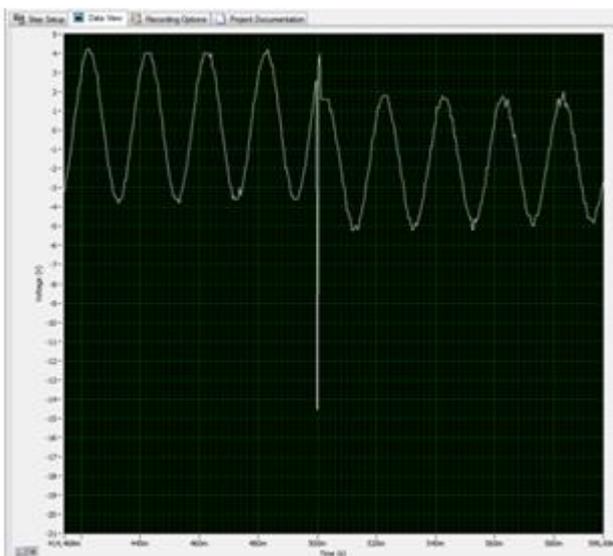
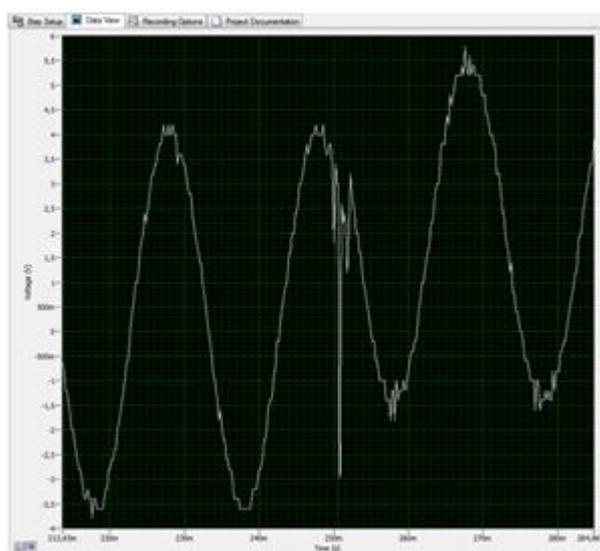
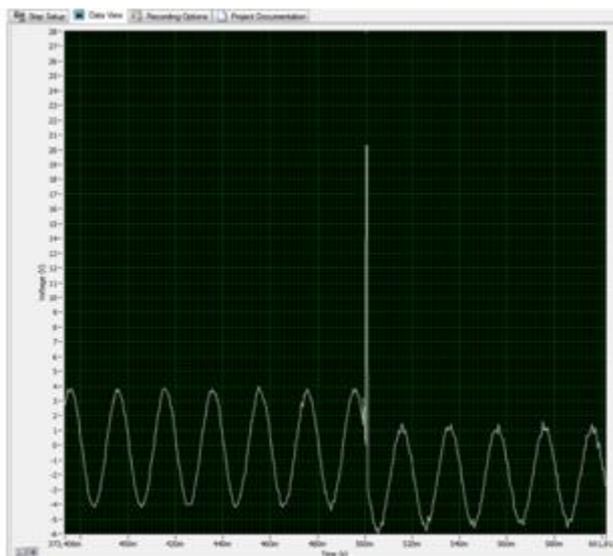
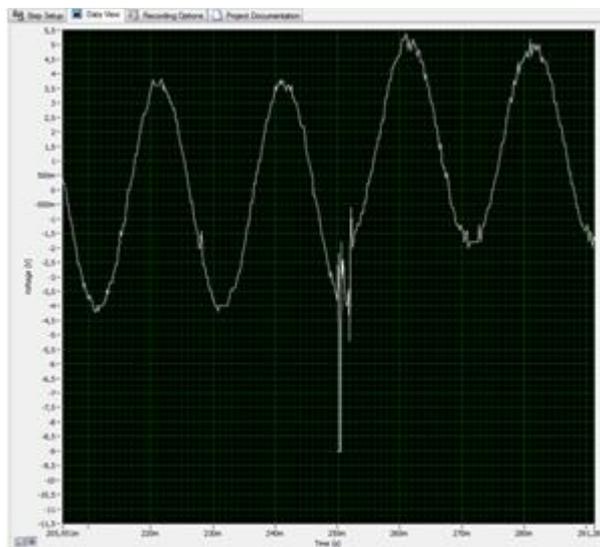
а) $K_{\max}=5$ б) $K_{\max}=1,1$ в) $K_{\max}=7$ г) $K_{\max}=3$

Рисунок 1.10 – Осциллограммы при отключении электродвигателя
АЭЗ-400Л мощностью 250 кВт

Таким образом, методы физического и математического моделирования позволяют установить общие закономерности возникновения КП, но не позволяют учесть все факторы, влияющие на величину КП в их случайном сочетании.

Экспериментальный метод оценки КП. Метод оценки, основанный на непосредственном измерении перенапряжений, позволяет получить реальные данные, которые учитывают сочетание всех факторов, влияющих на

величину и характер перенапряжений. Однако для определения максимальных значений КП необходимо произвести большое количество измерений на одном объекте, так как вероятность того, что при однократном измерении зафиксировано максимальное перенапряжение, очень низка.

В реальных условиях эксплуатации электрических машин получение достаточного количества статистических данных не всегда представляется возможным, что в большинстве случаев связано с непрерывностью технологического процесса. В таких случаях фиксация перенапряжений возможна лишь во время плановых коммутаций. Следовательно, такой метод оценки потребует больших затрат времени на сбор статистической информации для оценки максимальной кратности перенапряжений.

Экспресс - методы оценки КП. Экспресс - методы оценки КП, разработанные Барышниковым Д.В., основаны на использовании эмпирических кривых, отражающих взаимосвязь между максимальной кратностью перенапряжений, типом выключателя, типом и мощностью синхронного и асинхронного электродвигателей, а также учитывающих тип и мощность трансформаторов, длину и сечение кабельной линии. Данные зависимости представлены на рисунках 1.11, 1.12 и 1.13.

Результаты величины КП, полученные данным методом, отличаются от реальных значений на $\pm 19\%$ при отключении электрической нагрузки, если в сети отсутствуют высшие гармоники, что вполне приемлемо для оценки и прогнозирования КП как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации систем электроснабжения.

Недостатком данного метода является его незавершенность, так как представленные зависимости относятся к вакуумным и масляным выключателям.

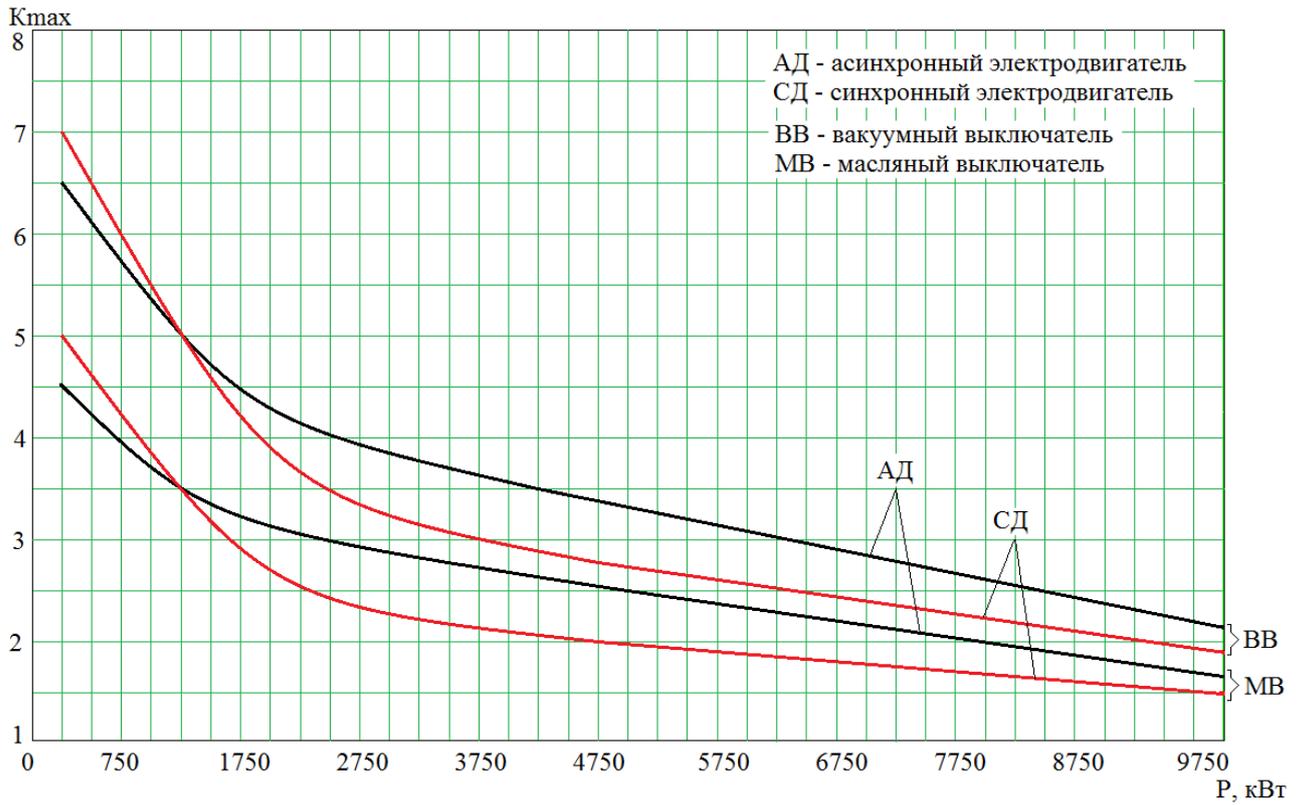


Рисунок 1.11 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности электродвигателя

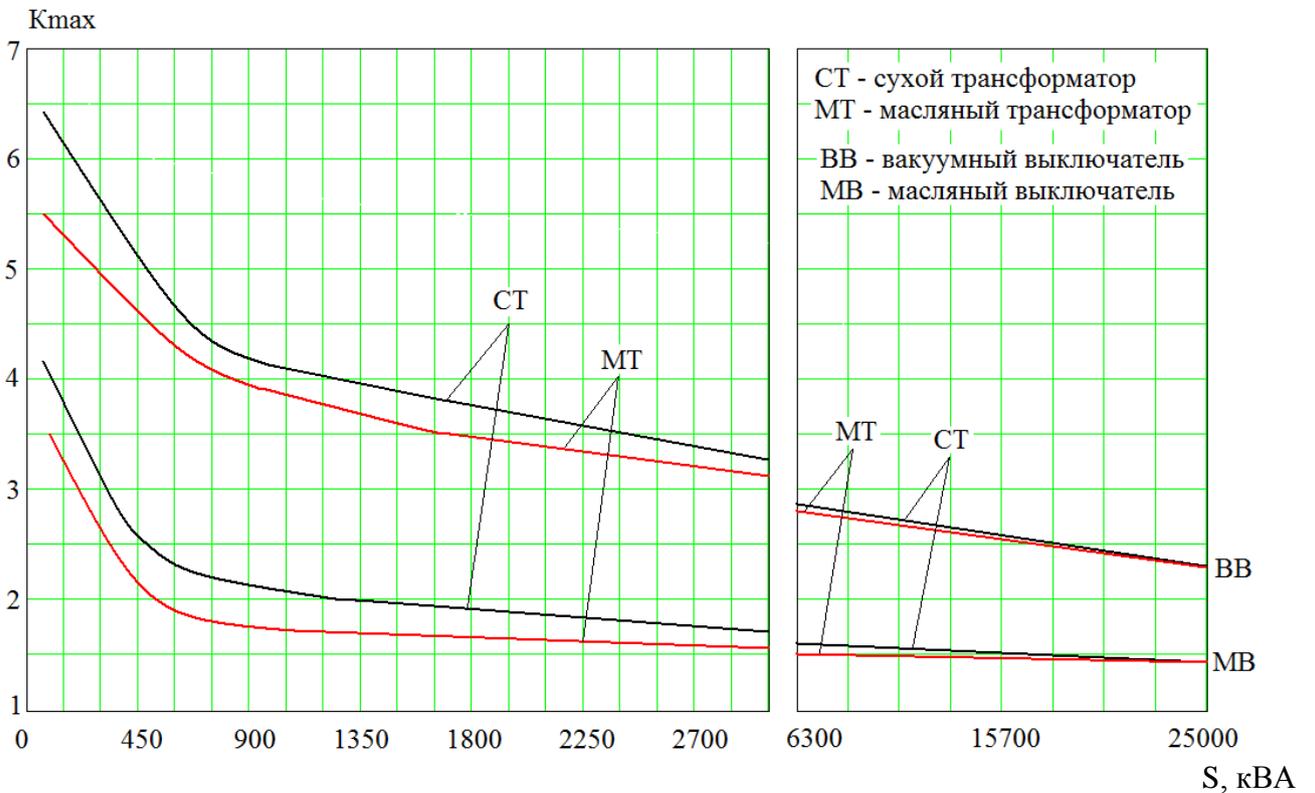
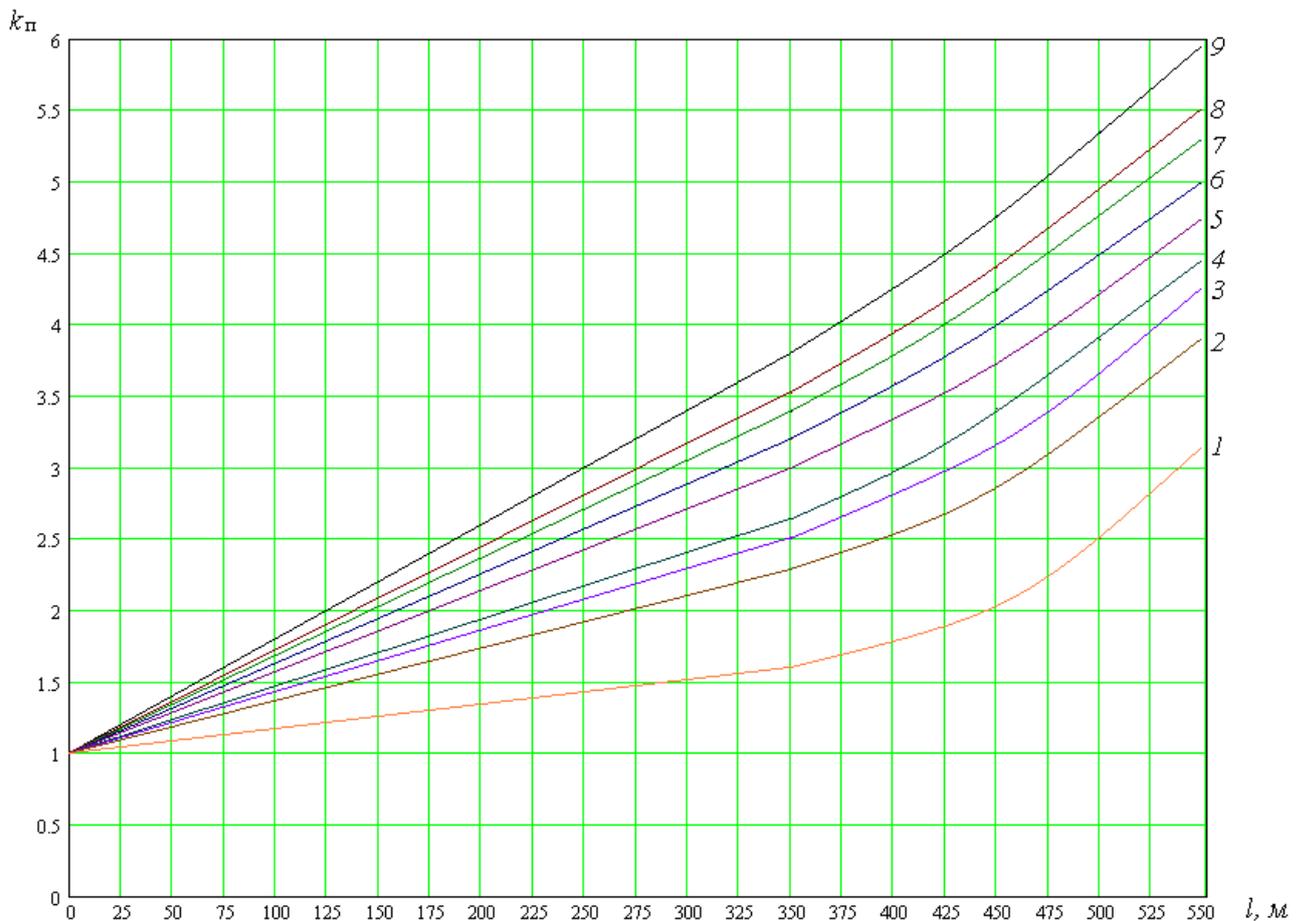


Рисунок 1.12 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности трансформатора



1 - $3 \times 25 \text{ мм}^2$, 2 - $3 \times 35 \text{ мм}^2$, 3 - $3 \times 50 \text{ мм}^2$, 4 - $3 \times 70 \text{ мм}^2$, 5 - $3 \times 95 \text{ мм}^2$, 6 - $3 \times 120 \text{ мм}^2$,
7 - $3 \times 150 \text{ мм}^2$, 8 - $3 \times 185 \text{ мм}^2$, 9 - $3 \times 240 \text{ мм}^2$

Рисунок 1.13 - Изменение понижающего коэффициента коммутационного перенапряжения в зависимости от длины и сечения кабельной линии

Разработанный экспресс - метод [5] не охватывает элегазовые и электромагнитные выключатели. Оценка КП при использовании электромагнитных и элегазовых выключателей актуальна, так как электромагнитные выключатели до настоящего времени востребованы в нефтеперерабатывающих и горно-перерабатывающих отраслях, а элегазовые выключатели находят все более широкое применение практически во всех областях промышленности [17, 25].

Погрешность 19% при оценке КП можно объяснить средним значением понижающего коэффициента, учитывающего влияние параметров кабельной линии на величину КП. Среднее значение понижающего коэффициента было определено для бронированных кабелей с бумажной или резиновой изоляцией

для каждого стандартного сечения. В действительности емкость одного типа и марки кабеля напряжением 6 кВ и 10 кВ может значительно отличаться.

Например, кабель АСБг 6 – (3×120) имеет удельную емкость, равную $0,272 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Аналогичный кабель напряжением 10 кВ имеет удельную емкость, равную $0,119 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Среднее значение составит $0,196 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Отклонение среднего значения емкости от кабеля напряжением 6 кВ и 10 кВ соответственно будет равно 28% и 39%. Отклонение емкости кабелей разных типов от среднего значения будет более высоким. Например, кабель из сшитого полиэтилена сечением 120 мм² напряжением 6 кВ имеет удельную емкость $1,876 \cdot 10^{-6}$ Ф/км, что выше среднего значения почти в 9 раз. При использовании кабелей из сшитого полиэтилена КП в сетях 6 кВ будут более низкими.

Таким образом, совершенствование экспресс - методов оценки КП в системах электроснабжения 6 - 10 кВ на основе исследований влияния электромагнитных и элегазовых выключателей на величину перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов различных типов, и более глубокое изучение влияния типов кабелей напряжением 6 - 10 кВ на значение понижающего коэффициента, позволит получить комплексный метод оценки КП с высокой достоверностью прогнозируемых значений.

С учетом изложенного целью данной диссертационной работы является разработка комплексного метода оценки и прогнозирования КП в высоковольтной системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» и совершенствование средств защиты от КП в сетях 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями, с последующей

статистической обработкой данных для выявления основных факторов, определяющих величину и характер КП.

2. Осуществить математическое моделирование КП в системе «выключатель – кабельная линия - электроприемник» для изучения влияния параметров электроприемника, высших гармоник тока и угла коммутаций на кратность КП.
3. Разработать комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10 кВ на основе совершенствования экспресс - методов за счет учета влияния электромагнитных и элегазовых выключателей, высших гармоник тока, класса напряжения сети и типа кабельной линии на величину перенапряжений.
4. Усовершенствовать конструкцию РС-гасителей, предназначенных для эффективного ограничения КП в сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник тока.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Приведены результаты измерений перенапряжений на высоковольтных электродвигателях и трансформаторах при их коммутации электромагнитными и элегазовыми выключателями. Проведена статистическая обработка эмпирических значений перенапряжений. Выявлены основные факторы, влияющие на величину и характер коммутационных перенапряжений.

В результате исследований было получено свыше 2400 измерений перенапряжений при коммутации различных типов электродвигателей и трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями.

Подобный статистический материал позволяет оценить влияние на величину КП таких факторов, как тип и марка коммутационного аппарата, мощность электродвигателей и трансформаторов, тип и длина кабельных линий, а также учесть влияние технологического процесса.

На основе обработки статистических данных можно получить зависимость максимальных величин КП от указанных факторов и применить данную зависимость для оценки КП при использовании элегазовых или электромагнитных выключателей.

2.1 Методики измерения коммутационных перенапряжений и обработки статистических данных

2.1.1 Методика измерений коммутационных перенапряжений

Для измерения КП применялись трехфазный компенсационный резистивно-емкостной делитель напряжения ДНЕК, осциллограф Tektronix

TDS2024B в комплекте с персональным компьютером (ноутбуком), предназначенным для фиксации КП и получения осциллограмм.

Схема измерения коммутационных перенапряжений приведена на рисунке 2.1.

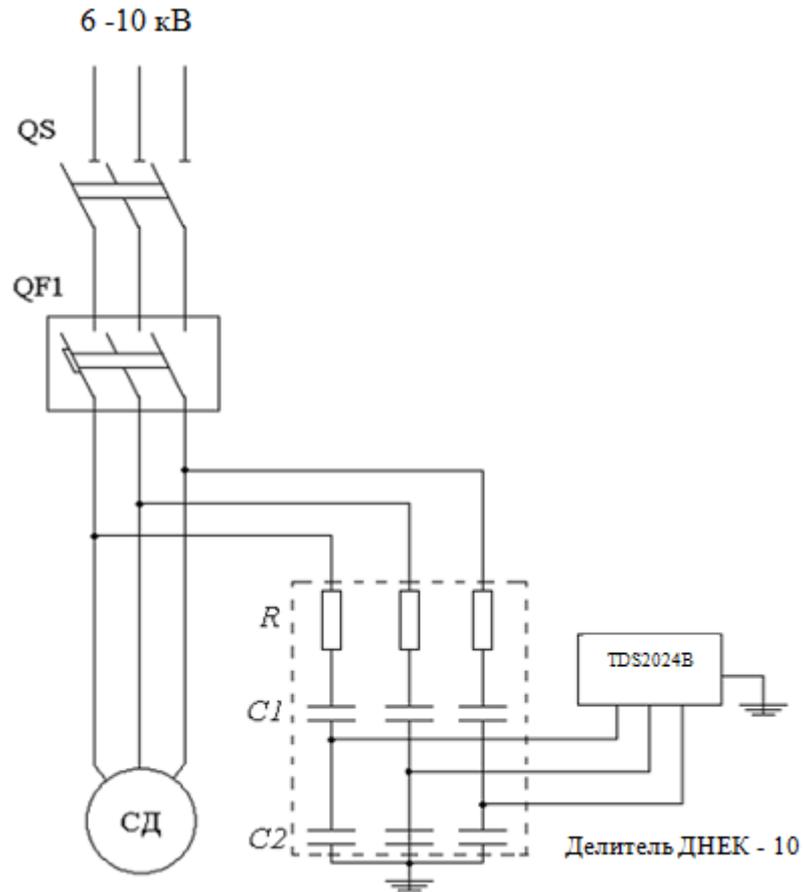


Рисунок 2.1 - Схема подключения измерительной аппаратуры

Техническая характеристика и условия эксплуатации осциллографа Tektronix TDS2024B:

Полоса пропускания	200МГц
Число каналов	4
Частота дискретизации	2 ГГц
Разрешение по вертикали	8-бит
Чувствительность по вертикали	2 мВ/дел – 5В/дел
Погрешность постоянному току по вертикали	±3%

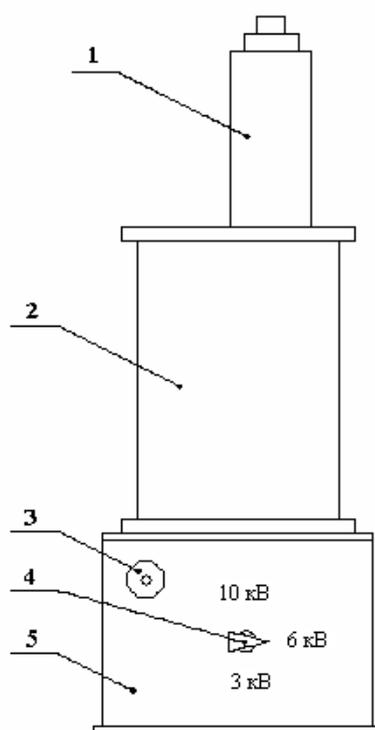
Максимальное входное напряжение	300В
Диапазон горизонтальной развертки	5 нс/дел – 50 с/дел
Погрешность горизонтальной развертки	0,005%
Отображение опорной осциллограммы	2,5 тыс. точек
Хранение осциллограммы без запоминающего устройства	2,5 тыс. точек
Хранение осциллограммы с запоминающим устройством	96 и более осциллограмм
Настройки без запоминающего устройства	10 настроек
Настройки с запоминающим устройством	4 000 и более настроек
Входной импеданс	1 Мом параллельно с емкостью 20 пФ

Для снижения уровней импульсов перенапряжений до приемлемых для измерений значений существуют различные устройства. В основном предпочтение отдается делителям напряжения (ДН). Однако некоторые типы делителей удовлетворительно функционируют только при определенных типах сигналов.

Например, делитель, состоящий только из активного сопротивления, успешно работает при измерениях в цепях постоянного тока, а только емкостной делитель - в цепях переменного тока. Активно - емкостной делитель, как правило, используется в тех случаях, когда высоковольтное плечо ДН состоит из большого числа конденсаторов (измерения на сверхвысоких напряжениях) и имеет длину порядка нескольких метров.

Указанный делитель имеет сложную конструкцию, что затрудняет его использование непосредственно на объектах исследования.

Эксперименты, проведенные сотрудниками кафедры «Электрификации горно-металлургического производства» и сотрудниками предприятия ООО «РУТАС», показали, что для измерений КП наиболее приемлемыми являются компенсационные резистивно-емкостные делители (рисунок 2.2).



1 - активное сопротивление; 2 – высоковольтный конденсатор; 3 - соединительный разъем; 4 - переключатель; 5 – корпус с низковольтным конденсатором

Рисунок 2.2 - Высоковольтный делитель напряжения

На удовлетворительную работу ДН оказывает влияние ряд факторов: волновое сопротивление и длина соединительного кабеля, входная цепь измерителя, нестандартная форма импульса перенапряжений (в виде затухающей кривой), частота колебаний перенапряжений и характеристики выключателей. Учет всех вышеперечисленных факторов не представляется возможным, что в свою очередь приводит к погрешностям измерений. Для повышения точности измерений предусматривается возможность корректировки переходных характеристик в процессе метрологической поверки ДН.

При совместной работе ДН и цифрового осциллографа входные параметры регистратора не оказывают влияния на результаты измерений. Не возникают дополнительные погрешности и от кабельной линии (в отличие от аналогового осциллографа). Длина соединительной кабельной линии у передвижных электроустановок не превышает 5 м при напряжении 6-10 кВ. При измерениях на стационарных установках напряжением 6-10 кВ длина ка-

бельной линии не более 3 м. При таких длинах кабелей затухание измеряемого сигнала, поступающего с ДН, не наблюдалось.

Делители перенапряжений выполняются в трехфазном исполнении, но могут применяться и как однофазные. Конструкция делителя позволяет ступенчато изменять коэффициент деления.

Технические характеристики и условия эксплуатации делителя напряжения ДНЕК-10:

Номинальное напряжение	$U_H=10$ кВ;
Импульсная прочность	$U_{им.пр.}=76$ кВ
Коэффициенты деления по ступеням	1195, 2400, 4000;
Максимальная основная погрешность	0,77%;
Температура окружающего воздуха	$-10 + 40$ °С;
Относительная влажность при температуре +20°С	до 80%;
Атмосферное давление	86-106кПа.

Разработанный делитель хорошо согласуется с цифровым четырехканальным осциллографом Tektronix. Это позволяет исследовать не только амплитудные значения КП, но и их частоту и длительность.

Для подавления помех применялось полное экранирование низковольтных проводников, автономное питание регистратора.

Программа исследований включала измерения коммутационных перенапряжений сетевых электродвигателей и трансформаторов в наиболее вероятных режимах работы:

- включение и отключение на холостом ходу;
- включение и отключение под нагрузкой.

Наибольший объем измерений КП производился при включении и отключении на холостом ходу, который является наиболее типичным режимом коммутации электродвигателей и трансформаторов.

Основная цель экспериментальных исследований – получение статистических распределений перенапряжений для различных типов электродви-

гателей и трансформаторов, коммутация которых осуществляется элегазовыми и электромагнитными выключателями.

2.1.2 Методика обработки статистических данных

Обработка статистических данных производилась по алгоритму, приведенному на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 - Алгоритм обработки статистических данных

- **Расчет средних значений, дисперсий, среднеквадратичных отклонений и коэффициента вариации**

Расчет средних значений каждой выборки производится по следующему выражению:

$$\bar{X}_{ij} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}, \quad (2.1)$$

где n_i – количество измерений определенной выборки;

z_{ij} – величина измеренного коммутационного импульса.

Дисперсия рассчитывается по следующей формуле:

$$D_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} \left(z_{ij} - \bar{X}_{ij} \right)^2, \quad (2.2)$$

Среднеквадратичное отклонение определяется по выражению:

$$S_i = \sqrt{D_i}, \quad (2.3)$$

Коэффициент вариации определяется по выражению:

$$V = \frac{S_i}{\bar{X}}, \quad (2.4)$$

• Проверка выборки на однородность

Проверка выборок на однородность позволит определить факторы, оказывающие влияние на КП, и факторы, не оказывающие существенного влияния на КП, что позволит в дальнейшем не учитывать факторы, не оказывающие влияния на КП.

Проверка выборок на однородность производится по следующим 3 критериям:

1. По сравнению с дисперсией;
2. По сравнению средних значений;
3. По сравнению χ^2 Пирсона.

Для сравнения средних значений использовался критерий $t_{\bar{x}}$, который рассчитывается по формуле:

$$t_{\bar{x}} = \frac{|\bar{X}_i - \bar{X}_j|}{\sqrt{\frac{S_i^2}{n_i} + \frac{S_j^2}{n_j}}} \cdot \sqrt{\frac{n_i \cdot n_j (n_i + n_j - 2)}{n_i + n_j}}, \quad (2.5)$$

где \bar{X}_i – среднее значение первой выборки;

\bar{X}_j – среднее значение второй выборки;

n_i – количество данных первой выборки;

n_j – количество данных второй выборки.

Для сравнения дисперсий и среднеквадратичных отклонений используется критерий t_s , который рассчитывается по выражению:

$$t_s = \frac{|S_i - S_j|}{\sqrt{\frac{S_i^2}{2n_i} + \frac{S_j^2}{2n_j}}}, \quad (2.6)$$

где S_i – среднеквадратичное отклонение первой выборки;

S_j – среднеквадратичное отклонение второй выборки.

Критерий χ^2 и число степеней свободы r рассчитывалось с применением пакета прикладных программ «STATISTICA».

По критерию χ^2 и числу степеней свободы определялась вероятность Пирсона $P\{X^2\}$, которая указывает на то, с какой достоверностью данные выборки можно объединять.

Выборки объединяются в том случае, если

$$t_s \leq 3, \quad t_{\bar{x}} \leq 3, \quad P\{X^2\} > 0,05, \quad (2.7)$$

в противном случае их объединять нельзя. Объединение выборок свидетельствует о том, что данный фактор не оказывает существенного влияния на КП. Если выборки не объединяются, то данный фактор, по которому происходило объединение выборок, серьезно влияет на величину и характер КП.

- **Проверка на экстремальность**

Проверка на экстремальность необходима для того, чтобы определить принадлежит или не принадлежит максимальное значение исследуемой величины к генеральной совокупности исходных данных, то есть, является ли максимальное значение коммутационных перенапряжений для определенных условий закономерной величиной или указывает на неточность измерений.

Проверка выборки на экстремальность определялась для коэффициента вариации $V > 0,3$:

$$\xi_m = \sqrt{\kappa} \cdot \left(\frac{\kappa \cdot n - 1}{\kappa \cdot n} \cdot \frac{Z_{\max}}{\bar{X}} - 1 \right), \quad (2.8)$$

где $\kappa = \frac{1}{V^2}$.

Для $V \leq 0,3$:

$$\xi_m = \frac{Z_{\max} - \bar{X}}{S}, \quad (2.9)$$

По значениям κ и n , согласно [39], определялись значения β_n^+ , Z_{\max} не принадлежит к генеральной совокупности, если выполняется условие - $\xi_n > \beta_n^+$. В противном случае максимальное значение исследуемой величины принадлежит к генеральной совокупности, то есть имеет закономерный характер.

2.2 Результаты обработки статистических данных при коммутации синхронных и асинхронных высоковольтных электродвигателей

Исследования КП проводились для случаев включения и отключения синхронных двигателей мощностью от 320 кВт до 6300 кВт и асинхронных двигателей мощностью от 250 кВт до 6300 кВт. В качестве примера рассмотрены синхронные и асинхронные двигатели мощностью 500, 630, 1250, 2500 кВт. Длина кабельной линии изменялась от 30 до 320 м. В исследовании КП применялись элегазовые и электромагнитные выключатели.

В качестве элегазовых выключателей использовались выключатели, производимые совместным предприятием АББ МОСЭЛЕКТРОЩИТ типа VF, и выключатели компании AREVA типа FPX, а в качестве электромагнитных выключателей - выключатели типа WMSWZ/PI и ВЭМ.

В приложении 1 в таблицах П.1.1 и П.1.2 представлены результаты статистической обработки, где указаны средние значения, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, коэффициенты вариации и значение максимального коэффициента перенапряжения.

Влияние типа коммутационных аппаратов на коммутационные перенапряжения

Для определения влияния типа коммутационных аппаратов на КП необходимо сравнить выборки тех опытов и проверить их на однородность, у которых тип двигателя, мощность двигателя и длина кабельной линии практически одинаковы, а выключатели разные.

Если данные объединяются, то тип коммутационного аппарата не влияет на величину КП. Если же не объединяются, то коммутационные аппараты серьезно влияют на величину КП.

Результаты проверки выборок на однородность для синхронных двигателей приведены в таблице 2.1, для асинхронных - в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Проверка выборок на однородность для синхронных двигателей (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.1)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1и4	114,82	3,11	61	83	0,045	Нет
2и5	108,55	3,96	59	83	0,035	Нет
3и6	149,48	1,41	53	77	0,025	Нет

Таблица 2.2 – проверка выборок на однородность для асинхронных двигателей (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.2)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1и4	147,77	3,22	61	86	0,03	Нет
2и5	68,67	2,00	58	80	0,04	Нет
3и6	140,99	1,98	51	70	0,04	Нет

Данные таблиц 2.1 и 2.2 указывают, что при коммутации одностипных синхронных и асинхронных двигателей разными коммутационными аппаратами возникают КП, разные по величине и характеру, так как выборки данных не объединяются, то есть тип коммутационного аппарата оказывает серьезное влияние на значение КП. Элегазовые выключатели создают более высокий уровень КП, чем электромагнитные выключатели.

Влияние мощности двигателя на величину коммутационного перенапряжения

Для выявления влияния мощности двигателя на величину КП необходимо проверить на однородность данные тех таблиц, у которых одностипные коммутационные аппараты и электродвигатели, длины кабельных линий имеют близкие значения, а мощность электродвигателей разная. Результаты проверки выборок на однородность для синхронных двигателей приведены в таблице 2.3, для асинхронных - в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Проверка выборок на однородность для синхронных двигателей (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.1)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1и3	93,35	3,39	61	86	0,03	Нет
1 и2	41,25	0,12	67	90	0,045	Нет
2и3	47,34	3,49	60	84	0,03	Нет
4и5	55,07	0,82	52	74	0,04	Нет
5и6	77,7	3,57	51	75	0,03	Нет
4и6	142,46	4,26	53	79	0,03	Нет

Таблица 2.4 - Проверка выборок на однородность для асинхронных двигателей (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П1.2)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1и2	57,27	0,62	61	86	0,03	Нет
1 и 3	82,49	3,33	67	90	0,045	Нет
2и3	24,78	2,78	60	84	0,03	Нет
4и5	27,54	0,79	52	74	0,04	Нет
5и6	26	1,36	51	75	0,03	Нет
4и6	55,6	1,77	53	79	0,03	Нет

Данные таблиц 2.3 и 2.4 показывают, что мощность двигателя влияет на величину и характер КП. С ростом мощности электродвигателя перенапряжения уменьшаются.

Влияние кабельной линии на коммутационные перенапряжения

Для определения влияния длины кабельной линии на КП необходимо сравнить данные из таблиц, у которых мощность электродвигателя, тип и сечение кабельной линии и тип коммутационного аппарата одинаковы, а длина кабельных линий разная. Результаты проверки выборок сведены в таблицы

2.5 и 2.6 для синхронных электродвигателей и в таблицы 2.7 и 2.8 для асинхронных электродвигателей.

Таблица 2.5 - Проверка выборок на однородность для синхронных двигателей, коммутируемых элегазовыми выключателями (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.1)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1 и 13	2,14	0,68	57	52	0,7	Да
2 и 8	30,53	3,19	63	48	0,93	Нет
3 и 9	239,24	5,62	52	74	0,04	Нет

Таблица 2.6 - Проверка выборок на однородность для синхронных двигателей, коммутируемых электромагнитными выключателями (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.1)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
4 и 7	130,03	4,297	34	50	0,04	Нет
5 и 14	156,95	2,83	40	60	0,035	Нет
6 и 15	138,84	4,08	31	50	0,25	Нет

Таблица 2.7 - Проверка выборок на однородность для асинхронных двигателей, коммутируемых элегазовыми выключателями (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.2)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1 и 9	2,51	2,98	72	66	0,66	Да
2 и 11	158,57	2,91	63	90	0,03	Нет
3 и 12	171,29	1,03	35	54	0,04	Нет

Таблица 2.8 - Проверка выборок на однородность для асинхронных двигателей, коммутируемых электромагнитными выключателями (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.2)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
4 и 13	109,69	1,92	73	101	0,025	Нет
5 и 14	219,38	3,64	83	103	0,02	Нет
6 и 15	218,71	3,23	72	98	0,04	Нет

Данные таблиц указывают на тот факт, что если в качестве коммутационного аппарата используется электромагнитный выключатель, то длина кабельной линии оказывает существенное влияние на величину КП. Кабельная линия оказывает существенное влияние на КП для всех типов двигателей, которые эксплуатируются с электромагнитными выключателями. В случае использования элегазовых выключателей длина кабельных линий оказывает влияние на КП для синхронных и асинхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт и более.

Влияние производственных условий и технологических процессов на величину коммутационных перенапряжений

Электродвигатели эксплуатируются в разных сферах производства и приводят в работу разное технологическое оборудование.

Возникает вопрос, влияют ли технологические процессы и производственные условия на величину и характер КП. Для решения данного вопроса требуется проверить соответствующие выборки на однородность.

Для этого необходимо, чтобы выполнялись следующие условия: были одинаковы тип и мощность двигателей, длина и сечение кабельных линий, тип коммутационного аппарата, а двигатели эксплуатировались в различных производственных условиях.

В таблице 2.9 приведены результаты проверки выборок на однородность.

Таблица 2.9 - Проверка выборок на однородность для синхронных двигателей (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.1)

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
11 и 12	0	0,15	53	36	0,96	Да
11 и 13	1,89	0,15	56	38	0,98	Да
12 и 13	1,88	0	52	37	0,94	Да

При сравнении выборок разно-профильных предприятий видно, что выборки объединяются. Это указывает на то, что технологический процесс при соблюдении норм технической эксплуатации электрических выключателей не оказывает влияние на КП.

Влияние типа двигателей переменного тока на величину коммутационных перенапряжений

Для определения влияния типа двигателей переменного тока на величину КП необходимо сравнить данные таблиц, у которых тип двигателя разный (синхронный и асинхронный), мощности двигателей одинаковы, типы, длины и сечение кабельных линий должны иметь близкие значения, коммутационные аппараты однотипные.

Результаты проверки выборок на однородность при использовании электромагнитного выключателя приведены в таблице 2.10. В таблице 2.11 представлены результаты проверки выборок на однородность при эксплуатации элегазового выключателя.

Таблица 2.10 – Проверка выборок на однородность при использовании электромагнитного выключателя

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
Таблица П.1.1(4) и таблица П.1.2(4)	19,16	0,008	54	73	0,048	Нет
Таблица П.1.1(5) и таблица П.1.2(5)	1,68	0,056	50	35	0,94	Да
Таблица П.1.1(6) и таблица П.1.2(6)	36,39	0,47	51	70	0,049	Нет

Таблица 2.11 – Проверка выборок на однородность при использовании элегазового выключателя

Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
	$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
Таблица П.1.1(1) и таблица П.1.2(1)	17,49	0,12	69	94	0,04	Нет
Таблица П.1.1(2) и таблица П.1.2(2)	2,55	0,61	68	52	0,93	Да
Таблица П.1.1(3) и таблица П.1.2(3)	30,95	0,17	53	74	0,04	Нет

Необъединенные выборки из таблиц 2.10 и 2.11 указывают на то, что для электродвигателей переменного тока мощностью менее или более 1250 кВт тип электродвигателя оказывает большое влияние на величину КП. На электродвигатели мощностью 1250 кВт тип электродвигателя не оказывает существенного влияния на КП, так как выборки в этом случае объединились.

Проверка выборок на экстремальность

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить, является ли максимальное значение КП закономерной или случайной величиной за счет ошибок при измерении. В таблицах 2.12 и 2.13 приведены резуль-

таты проверки выборок на экстремальность для синхронных и асинхронных электродвигателей соответственно.

Результаты проверки указывают на то, что максимальные значения КП, приведенные в таблицах П.1.1 и П.1.2, принадлежат к генеральной совокупности и имеют закономерный характер. Другими словами, это указывает на то, что, например, при коммутации синхронного двигателя мощностью 630 кВт элегазовым выключателем КП на зажимах двигателя могут превышать напряжение сети в 5,1 раза.

Таблица 2.12 – Проверка выборок на экстремальность (для синхронных электродвигателей)

Параметры	Номера опытов из таблицы П.1.1					
	1	2	3	4	5	6
β_m	3,35	3,55	3,10	3,15	3,12	3,10
ξ_m	1,16	1,06	1,49	1,67	1,59	0,87
Сравнение критериев β_m, ξ_m	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
Z_{max}	5,1	4,3	3,0	3,0	2,5	1,7

Таблица 2.13 – Проверка выборок на экстремальность (для асинхронных электродвигателей)

Параметры	Номера опытов из таблицы П.1.2					
	1	2	3	4	5	6
β_m	3,53	3,48	3,20	3,21	3,12	3,09
ξ_m	1,1	0,93	1,1	1,55	1,56	1,43
Сравнение критериев β_m, ξ_m	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
Z_{max}	5,0	4,3	3,2	2,8	2,5	2,1

Таким образом, если не предусмотреть специальных средств защиты от КП, электродвигатель может выйти из строя за счет пробоя изоляции.

Максимальные значения перенапряжений, приведенные в таблицах П.1.1 и П.1.2, можно использовать для построения зависимости величин КП от мощностей электродвигателей и типа коммутационного аппарата, а данную зависимость можно будет использовать для оценки максимальных значений КП, если длина кабельной линии не превышает 50 м.

На рисунке 2.4 представлены графики зависимостей величины КП от типа и мощности электродвигателя и типа коммутационного аппарата.

Из данных графиков видно, что асинхронные и синхронные электродвигатели мощностью 1250 кВт имеют одинаковые уровни КП, так как данные графики пересекаются в одной точке. Если мощность электродвигателя менее 1250 кВт, то синхронные электродвигатели обладают более высоким уровнем КП, чем асинхронные электродвигатели, а при мощности электродвигателей более 1250 кВт асинхронные электродвигатели имеют более высокий уровень КП, чем синхронные электродвигатели.

Кроме этого, из данных графиков можно сделать вывод, что электродвигатели переменного тока мощностью до 2500 кВт как синхронные, так и асинхронные, коммутируемые элегазовыми и электромагнитными выключателями, требуют защиты от КП.

2.3 Результаты обработки статистических данных при коммутации масляных и сухих трансформаторов

Исследования КП проводились для случаев коммутации сухих и масляных силовых трансформаторов мощностью от 100 кВА до 6300 кВА. В качестве примера рассмотрены трансформаторы мощностью 250, 630, 1000 кВА. Длина кабельной линии изменялась от 30 до 350 м. В исследовании КП использовались элегазовые и электромагнитные выключатели.

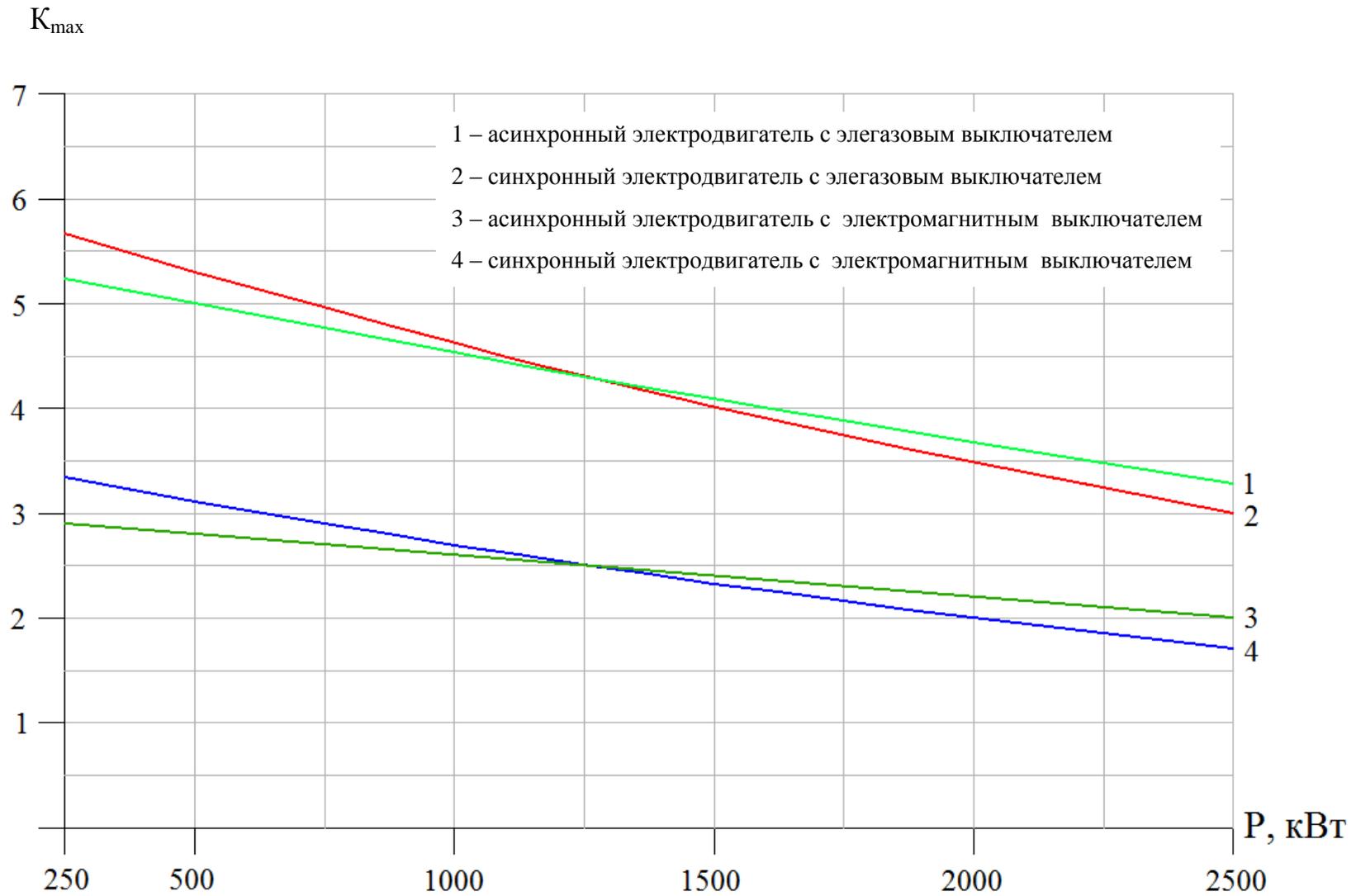


Рисунок 2.4 – Зависимость максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений от типа и мощности электродвигателя и типа выключателя

В приложении 1 в таблицах П.1.3 и П.1.4 приведены результаты измерений КП и их статистической обработки.

Влияние типа коммутационных аппаратов на коммутационные перенапряжения

Для определения влияния типа коммутационного аппарата на КП необходимо сравнить выборки опытов и проверить их на однородность, у которых тип и мощность трансформаторов одинаковы, длины кабельных линий практически одинаковы, а типы выключателей разные.

Результаты проверки выборок на однородность приведены в таблице 2.14 для масляных трансформаторов и в таблице 2.15 для сухих трансформаторов.

Таблица 2.14 - Проверка выборок на однородность для масляных трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.3)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 4	204,23	4,89	61	83	0,045	Нет
2	2 и 5	346,67	5,73	59	83	0,035	Нет
3	3 и 6	264,56	4,87	53	77	0,025	Нет

Таблица 2.15 - Проверка выборок на однородность сухих трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.4)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 4	154,48	6,29	61	86	0,03	Нет
2	2 и 5	239,45	5,52	58	80	0,04	Нет
3	3 и 6	199,03	4,70	51	70	0,04	Нет

Данные таблиц 2.14 и 2.15 указывают, что при коммутации одноступенчатых трансформаторов разными коммутационными аппаратами (элегазовыми и электромагнитными выключателями) возникают КП, разные по величине и характеру, то есть тип коммутационного аппарата при коммутации трансформаторов оказывает влияние на величину КП.

Влияние мощности трансформатора на величину коммутационного перенапряжения

Для выявления влияния мощности одноступенчатых трансформаторов на величину КП сравнивались выборки опытов с одноступенчатыми коммутационными аппаратами и близкими значениями длин кабельных линий. Результаты проверки приведены в таблицах 2.16 и 2.17 для масляных и сухих трансформаторов соответственно.

Таблица 2.16 - Проверка выборок на однородность для масляных трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.3)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 3	74,65	1,38	61	86	0,03	Нет
2	1 и 2	55,36	1,93	67	90	0,045	Нет
3	2 и 3	33,89	0,48	60	84	0,03	Нет
4	4 и 5	140,39	2,72	52	74	0,04	Нет
5	5 и 6	11739	1,05	51	75	0,03	Нет
6	4 и 6	210,49	1,85	53	79	0,03	Нет

Таблица 2.17 - Проверка выборок на однородность для сухих трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.4)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 2	35,21	2,11	61	86	0,03	Нет
2	1 и 3	68,63	2,8	67	90	0,045	Нет
3	2 и 3	45,09	0,83	60	84	0,03	Нет
4	4 и 5	105,11	3,17	52	74	0,04	Нет
5	5 и 6	76,19	0,25	51	75	0,03	Нет
6	4 и 6	154,17	3,35	53	79	0,03	Нет

Данные таблиц 2.16 и 2.17 показывают, что мощность однотипных трансформаторов оказывает влияние на величину КП. С ростом мощности трансформатора КП снижаются.

Влияние длины кабельной линии на коммутационные перенапряжения

Для определения влияния длины кабельной линии на КП необходимо проверить на однородность данные тех выборок, у которых мощность трансформаторов, тип и сечение кабельной линии одинаковы, а их длина разная.

Результаты проверки выборок на однородность влияния длины кабельной линии на КП приведены в таблицах 2.18 и 2.19.

Таблица 2.18 - Проверка выборок на однородность для масляных трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.3)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	4 и 7	145,11	2,37	52	76	0,03	Нет
2	8 и 2	219,38	3,10	63	48	0,03	Нет
3	9 и 3	185,41	4,29	52	74	0,04	Нет

Таблица 2.19 - Проверка выборок на однородность для сухих трансформаторов (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.4)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 8	104,52	3,67	51	70	0,049	Нет
2	1 и 9	209,63	7,43	52	74	0,040	Нет
3	8 и 9	115,62	2,32	50	75	0,028	Нет

Данные таблиц 2.18 и 2.19 указывают на то, что длина кабельной линии оказывает влияние на величину КП независимо от типа коммутационного аппарата.

С увеличением длины и сечения кабельной линии между выключателем и трансформатором КП на зажимах трансформатора снижаются.

Влияние производственных условий и технологических процессов на величину коммутационных перенапряжений

Сухие и масляные трансформаторы эксплуатируются в разных производственных условиях и обеспечивают электроэнергией разное технологическое оборудование.

Для решения вопроса о степени влияния производственных условий на КП при коммутации аналогичных трансформаторов на холостом ходу на однородность проверялись соответствующие выборки.

Для таких выборок необходимо, чтобы выполнялись следующие условия: тип и мощность трансформаторов, длина и сечение кабельных линий, тип коммутационного аппарата были одинаковы, трансформаторы эксплуатировались в различных технологических условиях, то есть либо на металлургических предприятиях, либо на предприятиях горнодобывающей промышленности.

В таблице 2.20 приведены результаты проверки выборок на однородность на примере масляных трансформаторов.

Таблица 2.20 - Проверка выборок на однородность в зависимости от производственных условий (варианты для сравнения – номера опытов из таблицы П.1.3)

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	1 и 11	37,27	0,62	61	44	0,95	Нет
2	1 и 12	26,43	1,086	60	43	0,95	Нет
3	1 и 13	22,32	2,45	59	42	0,95	Нет
4	11 и 12	2,901	0,213	53	36	0,96	Да
5	12 и 13	1,187	1,43	52	37	0,94	Да

Данные таблицы 2.20 показывают, что производственные условия и технологические процессы на горно-перерабатывающих предприятиях и нефтеперерабатывающих заводах не оказывают влияния на КП при коммутации трансформаторов на холостом ходу, так как выборки объединяются в одну генеральную совокупность.

На металлургических предприятиях условия эксплуатации оказывают серьезное влияние на величину КП при коммутации трансформаторов. Это, в первую очередь, связано с низким качеством электрической энергии в сетях 6 - 10 кВ из-за наличия высших гармоник тока и напряжения. На рисунках 2.5, 2.6 и 2.7 приведены характерные осциллограммы токов нагрузки на для ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод», ООО «РУСАЛ - Ачинск» (Ачинский глиноземный комбинат) и ОАО «Саяногорский алюминиевый завод».

В первых двух случаях коэффициент искажения синусоидальности кривой тока находится в диапазоне 3 - 6%, а в третьем коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 24,5%. С увеличением коэффициента искажения синусоидальности кривой тока кратность КП возрастает.

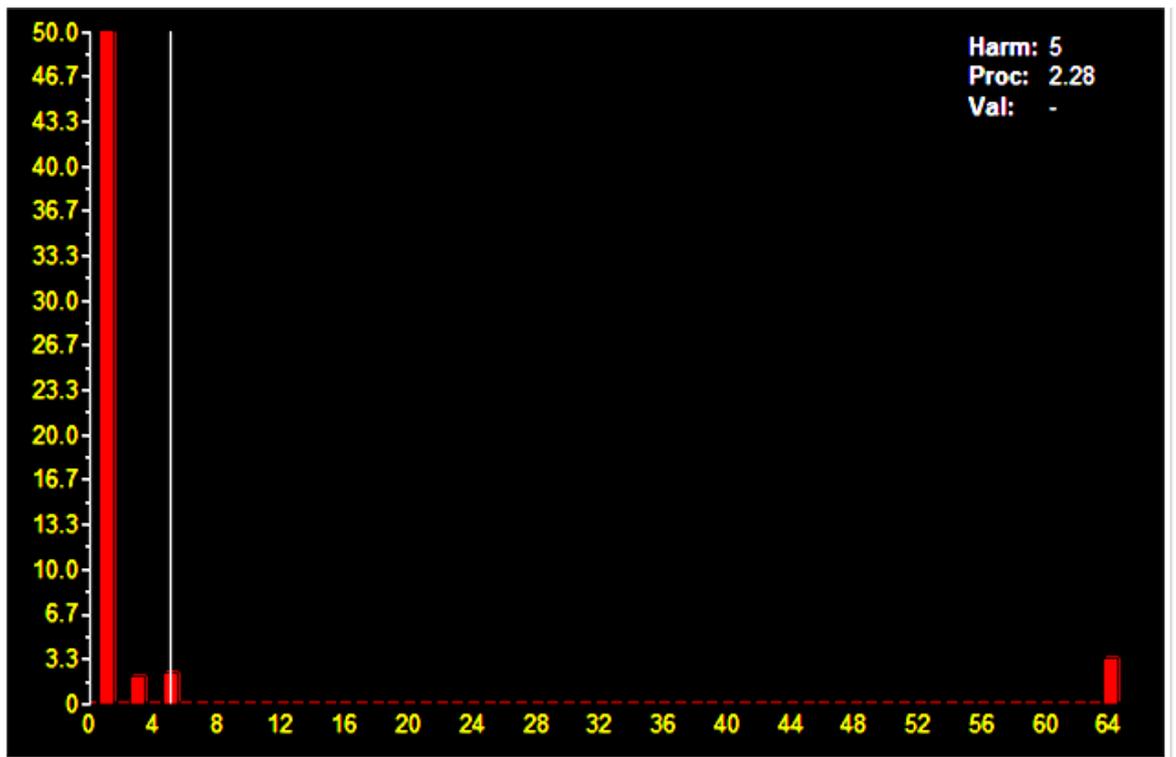
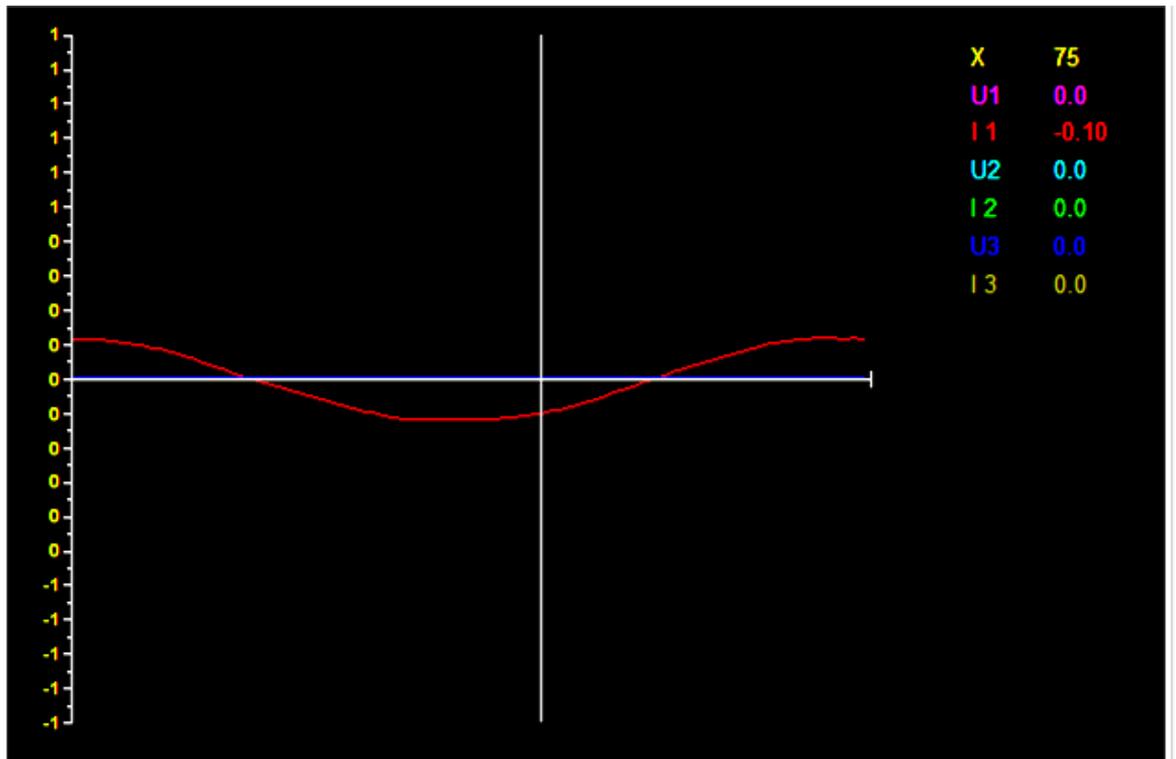


Рисунок 2.5 – Осциллограмма тока нагрузки на ООО «АГК», коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 3,4%

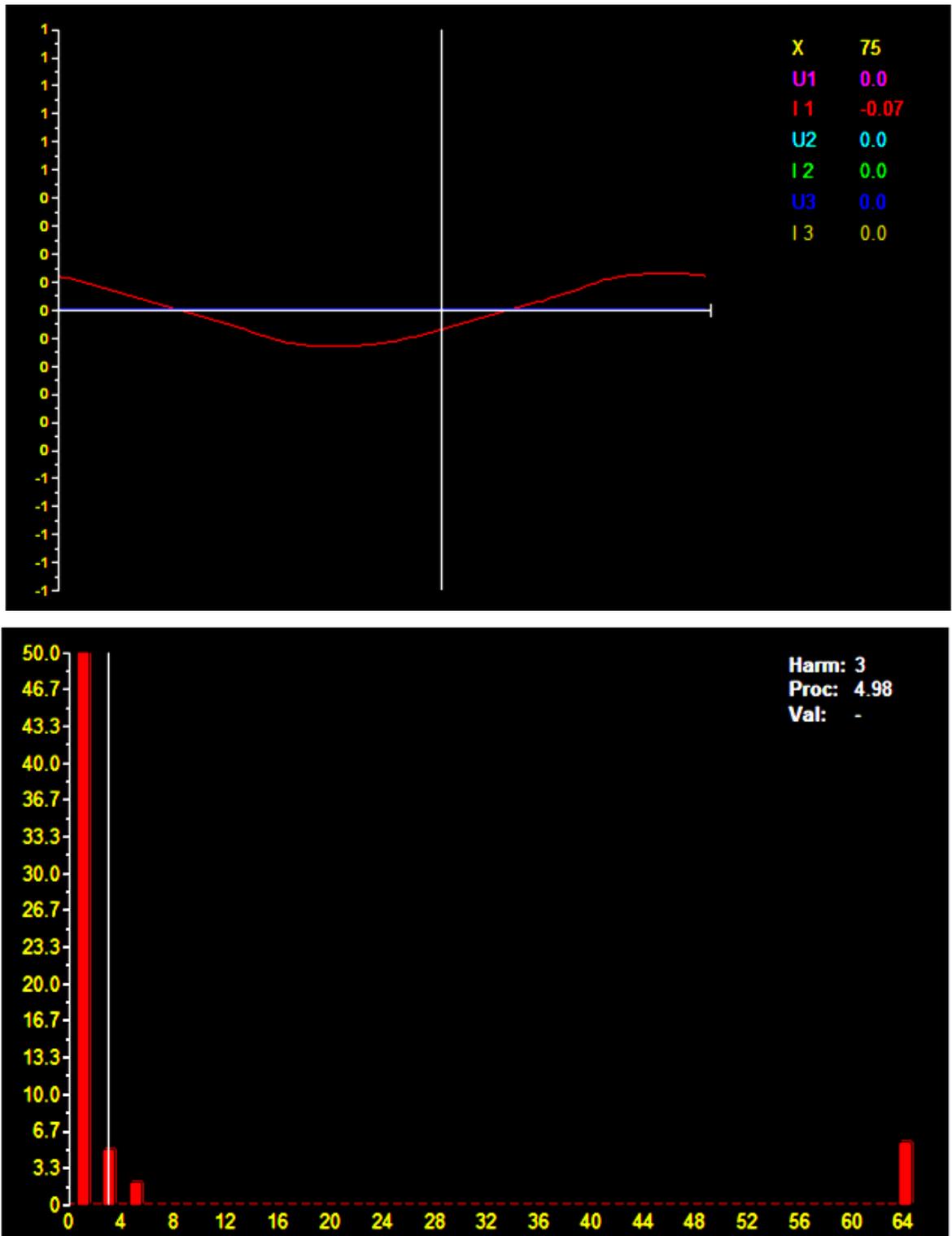


Рисунок 2.6 – Осциллограмма тока нагрузки на ОАО «АНПЗ», коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 5,6%

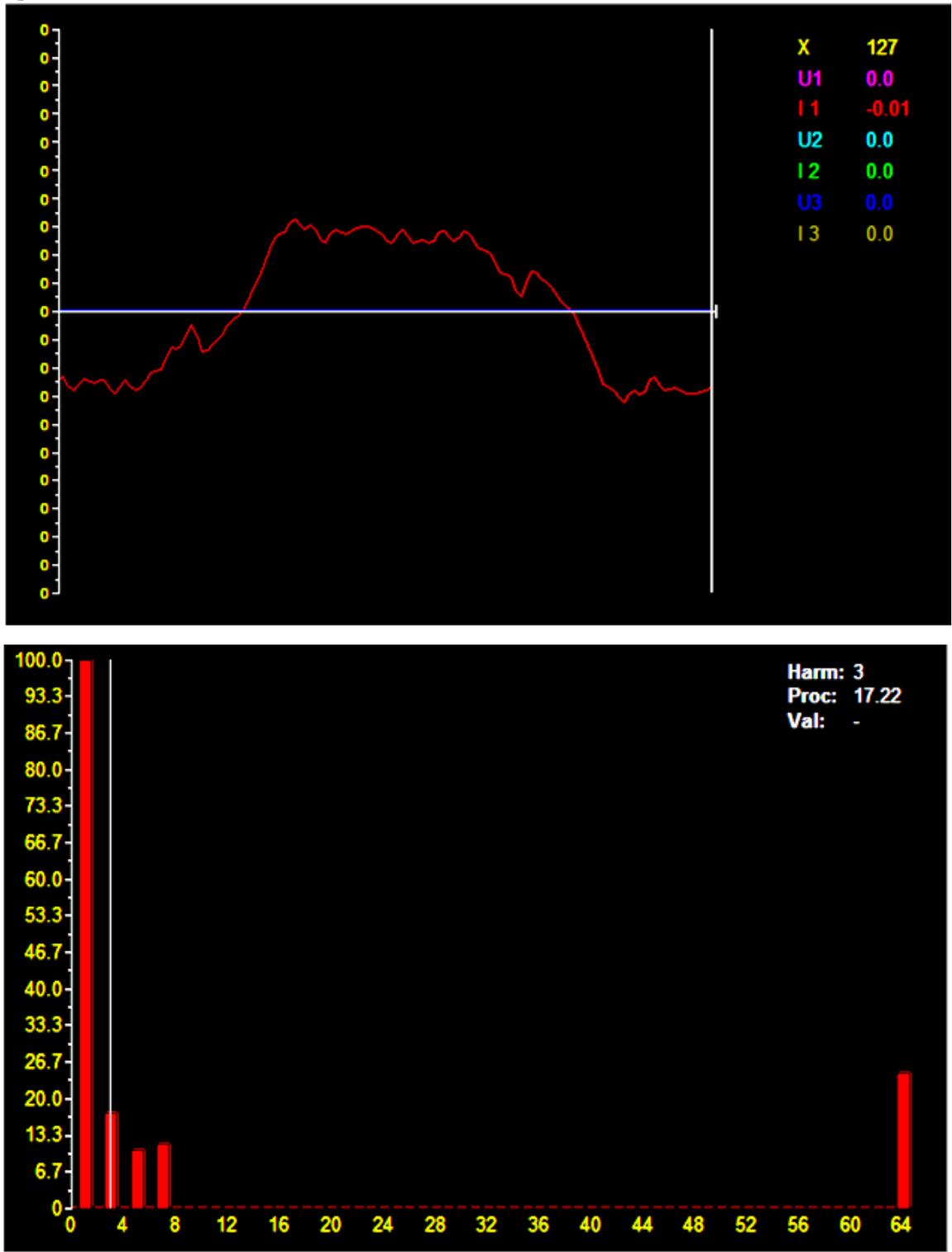


Рисунок 2.7 – Осциллограмма тока нагрузки на ОАО «Саяногорский алюминиевый завод», коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 24,5%

Влияние типа трансформаторов на величину коммутационных перенапряжений

Для определения влияния типа трансформаторов на величину КП необходимо сравнить данные таблиц, в которых тип трансформатора разный (масляный или сухой), мощности трансформаторов одинаковые, длины и сечения кабельных линий имеют близкие значения, коммутационные аппараты однотипные. Результаты проверок выборок на однородность приведены в таблицах 2.21 и 2.22.

Таблица 2.21 - Проверка выборок на однородность в зависимости от типа трансформатора при использовании электромагнитных выключателей

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	табл. П.1.3 (4) и табл. П.1.4 (4)	49,34	2,08	54	73	0,048	Нет
2	табл. П.1.3 (5) и табл. П.1.4 (5)	90,41	1,68	50	72	0,038	Нет
3	табл. П.1.3 (6) и табл. П.1.4 (6)	96,62	0,41	51	70	0,049	Нет

Таблица 2.22 - Проверка выборок на однородность в зависимости от типа трансформатора при использовании элегазовых выключателей

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	t_s	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	табл. П.1.3 (1) и табл. П.1.4 (1)	19,18	1,89	69	94	0,04	Нет
2	табл. П.1.3 (2) и табл. П.1.4 (2)	32,90	1,68	68	92	0,038	Нет
3	табл. П.1.3 (3) и табл. П.1.4 (3)	7,69	0,29	53	74	0,04	Нет

Анализ таблиц 2.21 и 2.22 показывает, что тип трансформаторов оказывает влияние на величину и характер КП как при коммутации электромагнитным выключателем, так и при коммутации элегазовым выключателем. Сухие трансформаторы создают более высокие уровни перенапряжений по отношению к масляным трансформаторам.

Проверка выборок на экстремальность

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить, является ли максимальное значение КП закономерной или случайной величиной за счет ошибок при измерении. В таблицах 2.23 и 2.24 приведены результаты проверки выборок на экстремальность.

Таблица 2.23 - Проверка выборок на экстремальность (для масляных трансформаторов)

Параметры	Номера опытов из таблицы 2.16					
	1	2	3	4	5	6
β_m	3,4	3,45	3,1	3,15	3,2	3,1
ξ_m	1,69	1,62	1,44	1,5	1,35	1,2
Сравнение критериев β_m, ξ_m	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
Z_{max}	4,0	3,3	3,1	2,0	1,4	1,2

Таблица 2.24 - Проверка выборок на экстремальность (для сухих трансформаторов)

Параметры	Номера опытов из таблицы 2.17					
	1	2	3	4	5	6
β_m	3,65	3,45	3,2	3,23	3,15	3,1
ξ_m	1,37	1,39	1,74	1,44	1,45	1,48
Сравнение критериев β_m, ξ_m	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
Z_{max}	4,3	3,6	3,4	2,4	1,7	1,5

Анализ таблиц 2.23 и 2.24 показывает, что максимальные значения кратности КП при коммутации масляных и сухих трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями являются закономерными вели-

чинами. Данные значения можно использовать для построения графиков зависимости величины КП от типа и мощности трансформаторов и типа коммутационного аппарата.

Зависимость величины КП от мощностей масляных и сухих трансформаторов при их коммутации элегазовыми и электромагнитными выключателями приведена на рисунке 2.8.

2.4 Экспериментальные исследования частоты коммутационного импульса

Анализ аварийности существующих устройств ограничения КП, приведенный в первой главе настоящей работы, показал, что частота коммутационного импульса может вызвать временный отказ в работе ОПН, который характеризуется «зоной замирания».

Кабельная линия между выключателем и электроприемником (электродвигатель или трансформатор) в зависимости от частоты коммутационного импульса может ограничивать кратность КП, если частота коммутационного импульса менее 45 кГц, или не влиять на величину и характер КП на зажимах электроприемника, если частота коммутационного импульса более 45 кГц [5, 50].

Следовательно, для совершенствования экспресс - методов оценки КП и обоснованного выбора средств защиты от КП необходимо изучить возможный диапазон изменения частоты коммутационного импульса при коммутации электродвигателей и трансформаторов.

Используемое оборудование для регистрации параметров КП позволяет не только фиксировать максимальные значения КП, но и полностью осциллографировать переходный процесс КП, в частности, определять частоту коммутационного импульса. В таблице 2.25 приведен диапазон частоты коммутационного импульса при отключении синхронных и асинхронных электродвигателей разными типами выключателей.

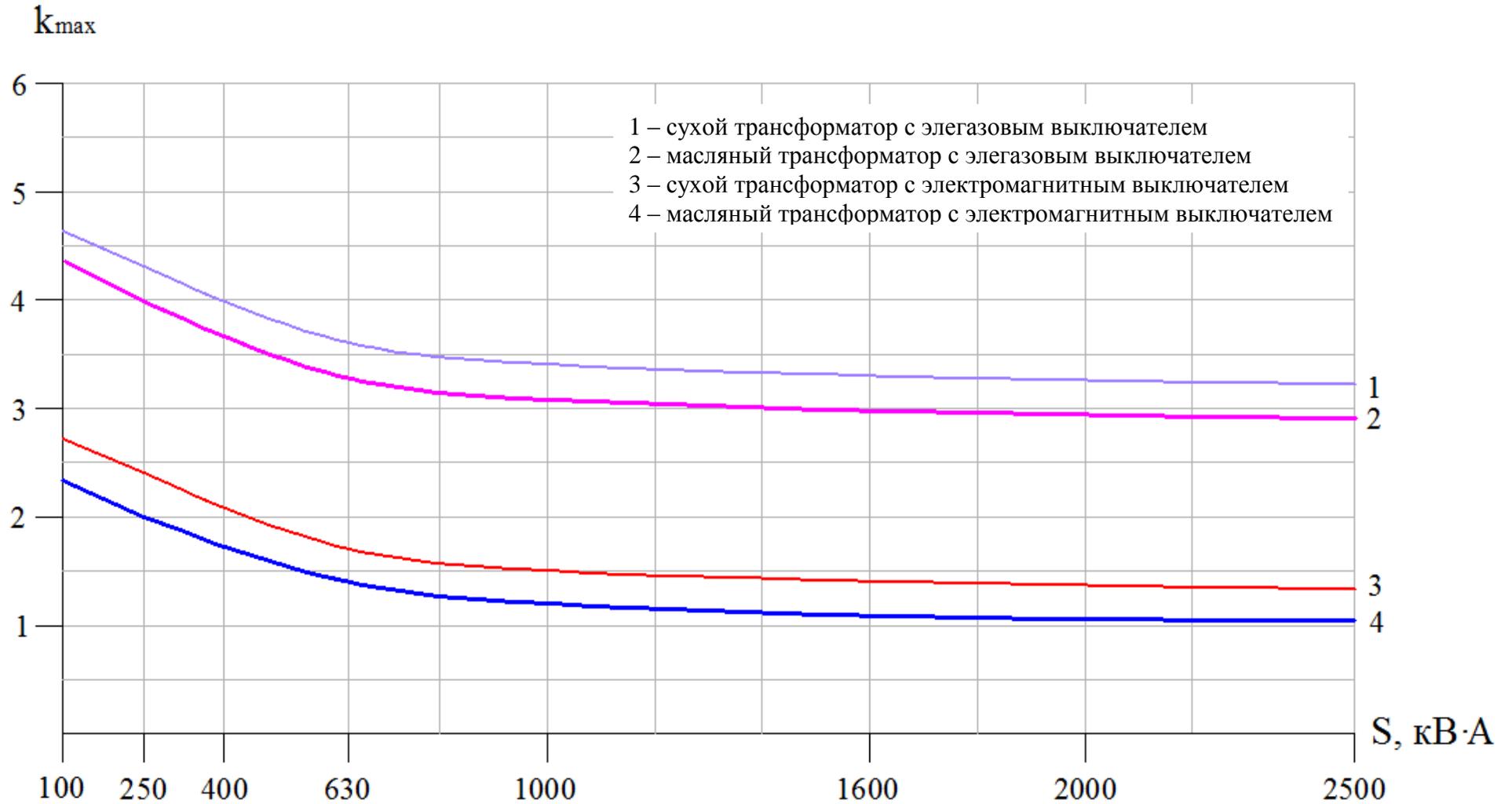


Рисунок 2.8 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для масляных и сухих трансформаторов от их мощности и типа выключателя

Анализ данных, представленных в таблице 2.25, показывает, что при одинаковых параметрах электрических цепей «кабельная линия - электродвигатель» вакуумные и элегазовые выключатели при коммутации способствуют возникновению коммутационного импульса с более высокой частотой по сравнению с масляными и электромагнитными выключателями. Четко прослеживается закономерность, что с увеличением мощности электродвигателей частота коммутационного импульса снижается независимо от типа электродвигателей. Можно утверждать, что для электродвигателей мощностью менее 2500 кВт, которые коммутируются вакуумными выключателями, кабельная линия не будет оказывать влияние на величину КП в сторону её уменьшения. Для элегазовых выключателей влияние длины и сечения кабельной линии на параметры КП будет ощущаться для электродвигателей мощностью 1250 кВт и более. При коммутации электродвигателей масляными и электромагнитными выключателями кабельная линия оказывает влияние на величину и характер КП.

При коммутации трансформаторов любым типом выключателей частота коммутационного импульса не превышает 22 кГц. Следовательно, кабельная линия будет оказывать влияние на величину и характер КП на вводах трансформаторов.

Результаты полученных исследований можно использовать для разработки комплексного метода оценки и прогнозирования КП в сетях 6 - 10 кВ промышленных предприятий.

Таблица 2.25 - Средний диапазон частот коммутационного импульса при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей разными типами выключателей, кГц

Тип выключателя	Мощность электродвигателя, кВт						
	250	320(315)	400	500(520)	630	1250	2500
Электромагнитный	20 - 28	18 - 24	16 - 22	14 - 20	12 - 16	10 - 14	6 - 8
Масляный	30 - 38	28 - 34	24 - 32	20 - 28	18 - 25	12 - 15	7 - 10
Элегазовый	60 - 70	55 - 65	50 - 60	45 - 55	45 - 50	35 - 40	20 - 35
Вакуумный	100 - 120	80 - 100	80 - 90	70 - 80	60 - 80	50 - 70	30 - 42

2.5 Исследование влияния высших гармоник тока на величину коммутационных перенапряжений

При выполнении экспериментальных исследований по регистрации перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов и электродвигателей на металлургических предприятиях было обнаружено, что высшие гармоники тока оказывают влияние на величину КП. Данный эффект подтверждается статистической обработкой данных, представленных в таблице П.1.5, на примере коммутации силовых трансформаторов.

Проверка выборок на экстремальность показала, что максимальные значения кратностей КП, зарегистрированные в ходе экспериментов, имеют закономерный характер и являются достоверными величинами.

Результаты проверки выборок на экстремальность представлены в таблице 2.26.

Таблица 2.26 – Проверка выборок на экстремальность

Параметры	Номера опытов из таблицы П.1.5					
	1	2	3	4	5	6
β_m	3,5	3,55	3,48	3,49	3,41	3,4
ξ_m	1,48	1,49	1,46	1,43	1,43	1,56
Сравнение критериев β_m, ξ_m	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$	$\beta_m > \xi_m$
Принадлежность к генеральной совокупности	Принадлежит	Принадлежит	Принадлежит	Принадлежит	Принадлежит	Принадлежит
Z_{max}	3,4	3,5	3,6	4,0	4,6	4,7

Анализ литературных источников в области исследования КП показывает, что работы, связанные с изучением влияния высших гармоник тока на величину КП, практически отсутствуют.

Изучение влияния высших гармоник на величину КП на аналитическом уровне позволит расширить знания о КП и использовать полученные результаты для оценки и прогнозирования КП.

Выводы по второй главе:

1. Величина КП при коммутации электрических машин зависит от мощности и типа электрической машины и типа коммутационного аппарата.
2. Величина КП с увеличением мощности машин снижается.
3. Величина КП, создаваемых элегазовыми выключателями, в 1,4 - 2,6 раза больше, чем величина КП, создаваемых электромагнитными выключателями.
4. Длина и сечение кабельной линии оказывают существенное влияние на величину КП, если электродвигатель коммутируется электромагнитным выключателем. С увеличением длины и сечения кабельной линии между электромагнитным выключателем и электродвигателем величина КП на зажимах электродвигателя уменьшается.
5. Длина и сечение кабельной линии оказывают влияние на величину КП на зажимах электродвигателя, если последний коммутируется элегазовым выключателем, а мощность электродвигателя 1250 кВт и более.
6. Длина и сечение кабельной линии оказывают влияние на величину КП при коммутации трансформатора любым типом выключателя. С увеличением длины и сечения кабельной линии между выключателем и трансформатором величина КП на зажимах трансформатора уменьшается.
7. Ограничение КП за счет параметров кабельной линии наблюдается, если частота коммутационного импульса менее 45 кГц, что позволяет ограничивать перенапряжения на зажимах электродвигателя мощ-

ностью 2500 кВт при их коммутации вакуумным выключателем. При использовании элегазовых выключателей кабельная линия оказывает влияние на величину КП на зажимах электродвигателей мощностью 1250 кВт и более. При использовании масляных и электромагнитных выключателей кабельная линия постоянно оказывает влияние на перенапряжения при коммутации электродвигателей.

8. Технологические процессы не влияют на величину и характер перенапряжений при коммутации трансформаторов на горно-перерабатывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях. На металлургических предприятиях технологические процессы оказывают влияние на перенапряжения при коммутации силовых трансформаторов из-за низкого качества электрической энергии. С увеличением коэффициента искажения синусоидальности кривой тока КП возрастают.
9. Наличие высших гармоник тока при коммутации нагрузки приводит к росту КП.

3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Дано описание физических процессов, возникающих при отключении электродвигателей от сети 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока. Представлена математическая модель коммутационных перенапряжений на основе принципа суперпозиций. Приведены результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт от сети 6 кВ при различных коэффициентах искажения синусоидальности кривой тока. Показано, что использование RC-цепей с параметрами $R=12,5$ Ом и $C=0,25$ мкФ позволяет исключить влияние мощности двигателя, угла коммутации и высших гармоник тока на уровень коммутационных перенапряжений.

3.1 Общие сведения и методика исследований

При коммутации силового высоковольтного электрооборудования передвижных и стационарных электроприемников коммутационными аппаратами возникают переходные процессы, обусловленные мгновенными изменениями параметров отключаемого участка распределительной сети. Эти процессы протекают за очень короткий промежуток времени и сопровождаются КП, существенно превышающими номинальное напряжение сети, если в качестве коммутационных аппаратов используются вакуумные или элегазовые выключатели.

Переходные процессы возникают в результате отключения индуктивной и емкостной нагрузок и представляют достаточно сложную совокупность взаимосвязанных факторов, учесть которые при анализе КП не всегда представляется возможным из-за случайного характера их появления.

Анализ литературных источников [5, 6, 11, 17, 19, 31, 36] и результаты экспериментальных данных показали, что на величину КП оказывает влия-

ние множество факторов, степень воздействия которых различна. К основным факторам можно отнести следующее: мощность отключаемой нагрузки, величину среза тока, величину волнового сопротивления, характер нагрузки, неодновременность замыкания или размыкания полюсов контактной системы выключателя, тип коммутационного аппарата, индуктивность и емкость отключаемой цепи.

Анализ литературных источников [14, 15, 1] показал, что процессы, связанные со срезом тока, определяются не только теплофизическими параметрами контактного материала и процессами на катоде и в прикатодной области, но и от состояния дугогасительной камеры, контактной поверхности катода, материала контакта, шунтирующей контакты выключателя емкости и величины отключаемого тока.

Величина отключаемого тока возрастает при наличии высших гармоник тока. Следовательно, можно предположить, что высшие гармоники тока могут приводить к увеличению среза тока при коммутации индуктивной нагрузки.

Аналитические исследования влияния высших гармоник тока на величину КП выполнены на примере коммутации синхронных двигателей разной мощности с использованием вакуумных выключателей. Для определения основных закономерностей изменения КП от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока наиболее приемлемым является математическое описание переходных процессов при отключении электродвигателей в режиме холостого хода и близком к нему, так как экспериментальные исследования показали, что в этом случае возникают наибольшие кратности КП.

Основным моментом аналитического исследования является адекватность схемы замещения системы «выключатель – кабельная линия - электродвигатель» высокочастотному импульсному процессу.

Для анализа высокочастотных переходных процессов наиболее приемлемой схемой замещения [14, 41] является схема с распределенными параметрами с учетом зависимости их величины от частоты переходного процес-

са. Однако наличие большого числа факторов, влияющих на протекание переходного процесса при коммутации, делает практически невозможным его математическое описание. Описание механизмов возникновения КП на основе трехфазной схемы с распределенными параметрами представляет чрезвычайно трудную задачу. Поэтому является целесообразным применение однофазной схемы замещения с сосредоточенными параметрами, эквивалентной схеме с распределенными параметрами.

Математическое моделирование КП с учетом высших гармоник тока в однофазной схеме замещения с сосредоточенными параметрами будет выполняться без учета повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя. Влияние повторных зажигания дуги на величину КП достаточно глубоко изучены в работах [36, 50, 57, 67], в которых показано, что с ростом числа повторных зажигания (n) дуги кратность КП возрастает пропорционально значению $\sqrt[3]{n}$.

Следовательно, имея значения кратности КП без учета повторных зажигания дуги, можно определить кратность КП с учетом повторных зажигания дуги по формуле:

$$K_{n.z.d.} = K \cdot \sqrt[3]{n}, \quad (3.1)$$

где K – кратность перенапряжений без учета повторных зажигания дуги.

3.2 Физические процессы, возникающие при отключении электродвигателей от сети 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока

Мгновенные значения перенапряжений, возникающие при отключении электродвигателей, можно определить по выражению:

$$u = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.2)$$

где i_0 – срез тока, А;

L и C – индуктивность и емкость нагрузки, Гн и Ф.

В работах [3, 11, 36, 88, 89, 91] показано, что обрыв дуги тока между контактами вакуумного выключателя при его отключении, как правило, возникает при угле коммутации от 10^0 до 20^0 относительно основной гармоники тока.

Величина среза тока $i_0(0_-)$ в первый момент коммутации будет определяться мгновенным значением результирующего тока, протекающего между контактами выключателя при вышеуказанном диапазоне угла коммутации.

В работе [75] показано, что в современных системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий присутствуют 5, 7, 11 и 13 гармоники тока. В зависимости от коэффициента загрузки преобразователя частоты (k_3) закон распределения амплитуд гармоник будет носить экспоненциальный характер, если $k_3 \geq 0,6$, и соответствовать нормальному закону распределения, если $k_3 < 0,6$. При этом максимальная точка нормального закона распределения соответствует 7-ой гармонике.

Можно считать, что основными гармониками, приводящими к искажению синусоидальности кривой тока, являются 5 и 7 гармоники.

Для определения влияния высших гармоник тока на величину среза тока рассмотрим 5 и 7 гармоники, причем амплитуда 5-ой гармоники больше амплитуды 7-ой гармоники. Обрыв дуги результирующего тока происходит при угле коммутации φ в диапазоне $10^0 - 20^0$. В этом случае срез тока в зависимости от величины отдельных гармоник может изменяться в 1,8 – 2,8 раза, если коэффициент искажения синусоидальности кривой тока находится в диапазоне 0,24 – 0,53.

В качестве примера на рисунке 3.1 приведены значения срезов тока при следующих условиях: $J_{1max} = 3A$, $J_{5max} = 1,5A$, $J_{7max} = 0,5A$, коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 0,53. В этом случае срез тока составит 2,8A, что выше среза тока при синусоидальном токе в 2,8 раза.

С учетом выражения (3.1) кратность перенапряжения будет возрастать.

Отметим, что на интервале времени (Δt), что соответствует изменению угла коммутации ($\pi \pm \varphi$), мгновенные значения тока основной гармоники, а

также мгновенные значения токов 5-ой и 7-ой гармоник имеют одинаковую полярность, что приведет к росту среза тока.

Расчеты показывают, что при коэффициентах искажения синусоидальности кривой тока, равных 0,37 и 0,24, срез тока будет превышать значения среза тока при отсутствии высших гармоник соответственно в 2,3 и 1,8 раза, если L и C будут постоянны.

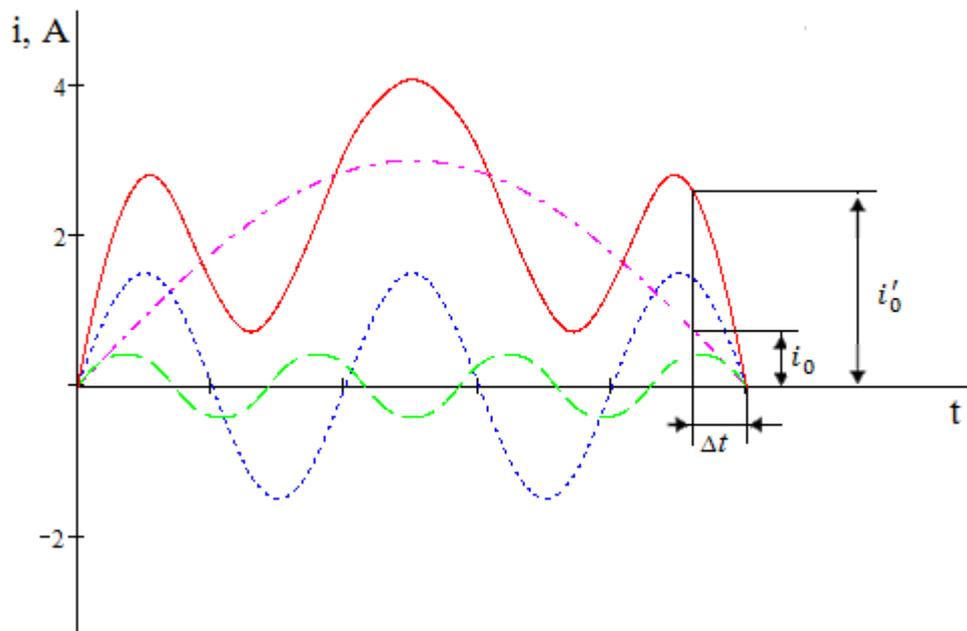


Рисунок 3.1 – Временные зависимости изменения тока при наличии высших гармоник кратным 5 и 7

Таким образом, с увеличением искажения синусоидальности кривой тока кратность перенапряжений может возрасти при изменении угла коммутации ($\pi \pm \varphi$) относительно 1-ой гармоники.

При углах коммутации от 36° до 54° будет наблюдаться снижение среза тока, так как 5-ая и 7-ая гармоники тока по отношению к основной находятся в противофазе, следовательно, при данных углах коммутации может наблюдаться снижение кратности перенапряжения.

При углах коммутации от 54° до 90° может происходить как снижение, так и рост кратности перенапряжений в зависимости от амплитудных значе-

ний 5-ой и 7-ой гармоник тока, так как они находятся в противофазе по отношению друг к другу.

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что при наличии 5-ой и 7-ой гармоник тока КП будут однозначно возрастать, если угол коммутации будет находиться в диапазоне $(\pi \pm \varphi)$.

Рассмотрим более детально данное явление с помощью математического моделирования.

3.3 Математическая модель коммутационных перенапряжений при наличии высших гармоник тока в результате среза тока без повторных зажигания дуги

В основу разработки математической модели, описывающей переходные процессы токов и напряжений при отключении электродвигателей от сети 6 кВ, были приняты во внимание следующие факторы, полученные экспериментальным путем:

- длительность коммутационного импульса ничтожно мала по отношению к периоду промышленной частоты и не превышает значения $5 \cdot 10^{-4}$ с;
- переходные процессы токов и напряжений в обмотках статора электродвигателей обусловлены срезом тока, то есть дуга между контактами выключателя отсутствует.

В этих условиях можно принять следующие допущения: выключатель можно считать идеальным ключом; параметры обмотки электрической машины будут линейны и независимы от величины тока и напряжения; ротор двигателя в момент коммутации является неподвижным; значение напряжения сети при частоте 50 Гц считаем квазипостоянной величиной, равной мгновенному значению напряжения в начальный момент коммутации; междоузельная и межвитковая емкость не учитывается (первая пренебрегается

ввиду ее незначительности – 2,5% от емкости фазы на землю, вторая учитывается только для электродвигателей малой мощности).

Это позволяет коммутируемую цепь считать линейной, а влияние высших гармоник оценить с помощью метода суперпозиций [7].

В этом случае мгновенное значение перенапряжения на зажимах электродвигателя будет определяться по формуле:

$$u(t) = u_1(t) + u_5(t) + u_7(t) + u_i(t) = \sum_{i=1}^n u_i(t), \quad (3.3)$$

где $u_i(t)$ - мгновенное перенапряжение, вызванное срезом тока i -ой гармоники.

В соответствии с вышепринятыми допущениями однофазная схема замещения статорной обмотки электродвигателя имеет вид, представленный на рисунке 3.2

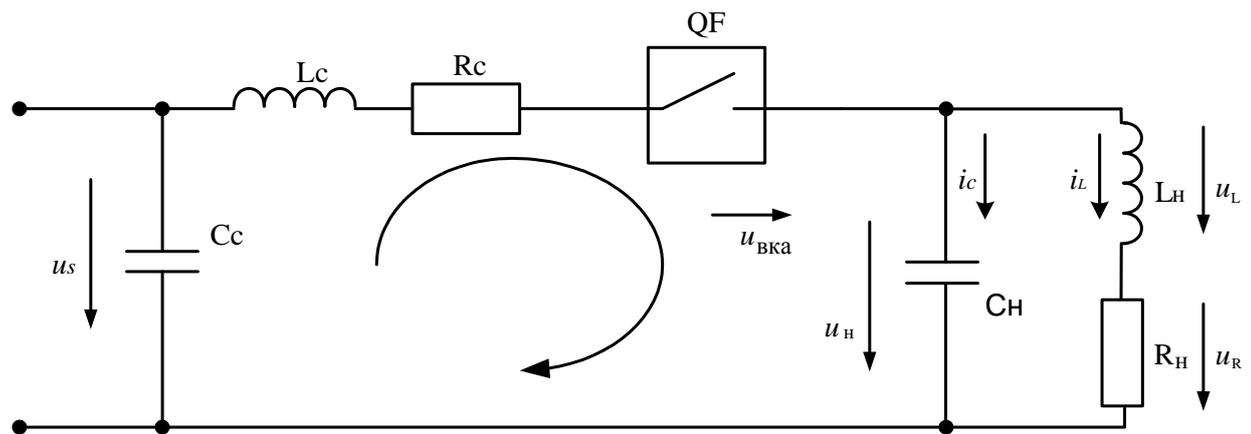


Рисунок 3.2 – Схема замещения статорной обмотки электродвигателя

Обозначения в схеме: R_H – активное сопротивление, учитывающее потери в стали; L_H – индуктивность рассеяния; C_H – емкость фазной обмотки относительно корпуса электродвигателя.

Для данной схемы составляем систему уравнений колебательного $R_H L_H C_H$ – контура для мгновенных значений токов и напряжений:

$$\left. \begin{aligned} u_L + u_R - u_H &= 0 \\ u_R &= i_L \cdot R_H \\ u_L &= L_H \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) \\ i_L &= -i_C \\ i_C &= C_H \cdot \left(\frac{du_C}{dt} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (3.4)$$

Решая систему дифференциальных уравнений относительно тока, протекающего через индуктивный элемент, получаем следующее уравнение:

$$L_H \frac{di_L}{dt} + i_L R_H - u_H = 0. \quad (3.5)$$

откуда в соответствии с пятым и учетом четвертого уравнений системы (3.4) получаем:

$$i_L = -L_H C_H \frac{d^2 i_L}{dt^2} - R_H C_H \frac{di_L}{dt}. \quad (3.6)$$

Следовательно, характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$p^2 L_H C_H + p R_H C_H + 1 = 0. \quad (3.7)$$

Представим характеристическое уравнение в виде:

$$p^2 + p \cdot \frac{R_H}{L_H} + \frac{1}{L_H \cdot C_H} = 0. \quad (3.8)$$

Далее уравнение (3.8) представим в виде:

$$\left(p + \frac{R_H}{2 \cdot L_H}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_H \cdot C_H} - \frac{R_H^2}{4 \cdot L_H^2}\right) = 0. \quad (3.9)$$

Данный вид характеристического уравнения можно записать следующим образом:

$$(p + a)^2 + \omega_0^2 = 0, \quad (3.10)$$

где $\alpha = \frac{R_H}{2 \cdot L_H}$ - коэффициент затухания;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_H \cdot C_H} - \left(\frac{R_H}{2 \cdot L_H}\right)^2} - \text{частота свободных колебаний.}$$

Указанные выражения получены на основе работы [28].

Общее решение дифференциального уравнения второго порядка с учетом типа корней уравнения имеет следующий вид, А:

$$i_L = e^{\alpha t} \cdot [B_1 \sin(\omega_0 t) + B_2 \cos(\omega_0 t)], \quad (3.11)$$

где B_1, B_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий при $t=0$, тогда постоянная интегрирования B_2 :

$$(B_2)_{t=0} = i_L(0), \quad (3.12)$$

где $i_L(0) = i_L(0_+) = i_L(0_-)$ - ток через индуктивность в первый момент коммутации.

постоянная интегрирования B_1 :

$$B_1 = \frac{u_H(0_-) - i_L(0_-) \cdot R_H - \alpha \cdot L_H \cdot i_L(0_-)}{\omega \cdot L_H}, \quad (3.13)$$

где u_H – напряжение на емкости C_H в первый момент коммутации или мгновенное значение напряжения по отношению к земле, В;

L_H – индуктивность фазной обмотки, Гн.

Следовательно, выражение для тока $i_L(t)$ с учетом постоянных интегрирования B_1 и B_2 имеет следующий вид:

$$i_L(t) = e^{\alpha t} \left[\left(\frac{u_H(0_-) - i_L(0_-)R_H - \alpha L_H i_L(0_-)}{\omega_g L_H} \right) \sin(\omega_g t) + i_L(0_-) \cos(\omega_g t) \right]. \quad (3.14)$$

Аналогичным способом определяем напряжение на зажимах электродвигателя.

$$u_H(t) = u_{H,пр}(t) + u_{H,св}(t). \quad (3.15)$$

После отключения электродвигателя от сети $u_{H,пр}(t) = 0$, следовательно,

$$u_H(t) = u_{H,св}(t). \quad (3.16)$$

Для определения $u_{H,св}(t)$ уравнения системы (3.4) решаем относительно напряжения нагрузки u_H . Опуская промежуточные математические выкладки, получим следующее уравнение:

$$u_{H,св.}(t) = e^{\alpha t} (D_1 \cdot \sin(\omega_g t) + D_2 \cdot \cos(\omega_g t)). \quad (3.17)$$

Для нахождения постоянных интегрирования составим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_H(t) &= u_{H,св}(t) \\ -\frac{du_{H,св}}{dt} \cdot C_H &= i_{с.св} \\ i_{с.св} &= -i_L \end{aligned} \right\}. \quad (3.18)$$

Из системы уравнений (3.18) в момент времени $t=0$ получаем выражение для постоянных интегрирования:

$$D_2 = u_H(0_-), \quad (3.19)$$

$$D_1 = \frac{\left\{ -\frac{i_{cp}}{C_H} - \alpha \cdot D_2 \right\}}{\omega_B}. \quad (3.20)$$

С учетом найденных значений постоянных интегрирования можно записать следующее выражение для $U_{н.св}(t)$:

$$u_{н.св}(t) = e^{\alpha t} \left[\left(-\frac{i_{cp}(0_-) - \alpha C_H u_H(0_-)}{\omega_B C_H} \right) \sin(\omega_B t) + u_H(0_-) \cos(\omega_B t) \right]. \quad (3.21)$$

Для определения влияния высших гармоник на величину КП необходимо установить, как изменяются индуктивность двигателя и емкость обмотки по отношению к земле для каждой рассматриваемой гармоники тока и значения начальных условий.

Используя выражение (3.21) и (3.14), можно определить изменения во времени напряжения на зажимах двигателя и изменение сверхпроводного тока при отключении электродвигателя от сети применительно к конкретной гармонике тока, а по формуле (3.3) - мгновенные значения возникающих перенапряжений.

При рассмотрении физических процессов, возникающих при отключении электродвигателя от сети 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник, предполагалось, что индуктивность и емкость электродвигателя - величины постоянные и не зависят от частоты тока сети.

В действительности индуктивность и емкость фазы электродвигателя зависят от частоты тока, протекающего по обмоткам электродвигателя. Рассмотрим более детально данный вопрос.

Индуктивность фазной обмотки синхронного двигателя определяется по формуле:

$$L_{\phi} = L_c \cdot \nu, \quad (3.22)$$

где L_c – общая индуктивность одной секции, Гн;

ν - число секций в фазе.

Общая индуктивность секции:

$$L_c = L_{\text{пс}} + L_{\text{лс}}, \quad (3.23)$$

где $L_{\text{пс}}$ – индуктивность пазовой части секции, Гн;

$L_{\text{лс}}$ - индуктивность лобовой части секции, Гн.

Согласно [10, 60, 64] индуктивность пазовой части секции фазной обмотки определяется по выражению:

$$L_{\text{пс}} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im}[Z_{\text{пс}}], \quad (3.24)$$

где ω – угловая частота тока, протекаемого по фазной обмотке, с^{-1} ;

$\text{Im}[z_{\text{пс}}]$ - мнимая часть полного сопротивления секции обмотки, Ом.

Индуктивность лобовых частей секции вычисляется по формуле [67]:

$$L_{\text{лс}} = (0,35 \div 0,45) \cdot 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{W_{\phi}^2}{\nu \cdot p \cdot K_{2p}} \cdot \tau \cdot (3\beta_{\text{н}} - 1), \quad (3.25)$$

где W_ϕ – число последовательных витков в фазовой обмотке (или в одной её параллельной ветке);

p – число пар полюсов машины;

τ – полюсное деление, м;

$\beta_n = \frac{y_n}{\tau_n}$ – коэффициент укорочения шага;

K_{cp} – число групп секций, охваченных общим магнитным потоком;

μ_0 – магнитная постоянная.

Согласно исследованиям, изложенным в работах [10, 58], индуктивное сопротивление статорной обмотки синхронного двигателя в основном определяется продольной сверхпроводящей реактивностью x_d'' , которая остается практически неизменной в диапазоне частот от 50 до 1000 Гц. Следовательно, определяющей индуктивностью обмотки является индуктивность пазовой части секции, так как с увеличением частоты тока, протекающего по обмотке, пропорционально снижается индуктивность, а индуктивное сопротивление остается постоянным.

Таким образом, при математическом моделировании индуктивность по отношению к i -ой гармонике тока будет определяться по выражению:

$$L_i = \frac{L_1}{n}, \quad (3.26)$$

где L_1 – индуктивность обмотки по отношению к основной гармонике тока;

n – номер гармоники тока.

Исследования зависимости емкости обмоток относительно корпуса от частоты и температуры [67] показывают, что с увеличением частоты от 50 до 1000 Гц емкость обмотки уменьшается приблизительно на 6 – 10 %. Далее снижение емкости происходит незначительно. При увеличении частоты от 1 до 100 кГц емкость уменьшается на 1 – 2%.

Для основной частоты сети емкость двигателя примем равной паспортным значениям, а для тока высших гармоник с частотой не более 1000 Гц

($n < 20$) емкость электродвигателя для гармоники, отличной от основной, будет равна:

$$C_i = 0,92 \cdot C_1, \quad (3.27)$$

где C_1 – емкость электродвигателя для основной гармоники, Ф.

Таким образом, значения индуктивности и емкости, используемые в выражениях (3.21) и (3.14), необходимо использовать с учетом выше изложенного материала.

Для определения начальных условий в момент коммутации ($u_n(0_-)$ и $i_L(0_-)$) примем, что электродвигатель отключается в режиме холостого хода. В этом случае характер тока нагрузки будет близок к индуктивному.

Следовательно, ток, протекающий по обмоткам электродвигателя, будет отставать от напряжения на 90° . При угле коммутации, равном 20° по отношению к основной гармонике тока, значение:

$$u_n(0_-) = U_{\phi.max} \cdot \cos(20^\circ) = 0,94 \cdot U_{\phi.max}. \quad (3.28)$$

Математическое моделирование коммутации синхронного двигателя будем производить для сети 6кВ. В таблице 3.1 приведены параметры индуктивности и емкости двигателей для номинального режима работы согласно данным [40, 44, 76, 77].

Таблица 3.1 – Основные технические данные синхронных двигателей

Тип	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток статора, А	Частота вращения, об/мин	Индуктивность, Гн	Емкость, Ф
СДЭ2-16-6У2	1250	6	139	1000	$12 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
СДСЭ-14-29-6	520	6	63,5	1000	$32 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-9}$

В работе [67] показано, что при отключении синхронного двигателя за время переходного процесса индуктивность и емкость электродвигателя практически не изменяются и соответствуют значениям до момента комму-

тации. Активное сопротивление обмоток двигателей резко возрастает за счет высокой частоты коммутационного импульса (80 – 120 кГц) и находится в диапазоне 100 – 120 Ом в зависимости от мощности двигателя.

Для выполнения математического анализа КП при отключении синхронного двигателя примем сопротивление обмоток равными 110 Ом.

Результаты математического моделирования представлены в разделах 3.4 и 3.5.

3.4 Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт без средств защиты от коммутационных перенапряжений

Математическое моделирование КП при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт от сети напряжением 6 кВ производилось при углах коммутации 10^0 и 20^0 . Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока изменялся от 0,1 до 1. Это позволило проанализировать влияние на КП не только высших гармоник тока, но и мощностей двигателей и угла коммутации.

На рисунке 3.3 представлены зависимости изменения кратности КП от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока для углов коммутации 10^0 и 20^0 при отключении синхронных двигателей от сети.

Анализ графиков, представленных на рисунке 3.3, показывает, что при коммутации синхронных двигателей мощностью 520 кВт зависимость кратности КП от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока имеет практически линейный характер. В случае отключения синхронных двигателей мощностью 1250 кВт при изменении коэффициента искажения синусоидальности кривой тока, не превышающей 20%, зависимость $K_{\text{п}} = f(k_J)$ имеет линейный характер. Дальнейшее увеличение значения k_J практически не влияет на рост кратности КП, так как в диапазоне $20\% < k_J \leq 100\%$ кратность

КП увеличивается с 2,2 до 2,3 и 3,5 и 3,7 соответственно для угла коммутации 10^0 и 20^0 .

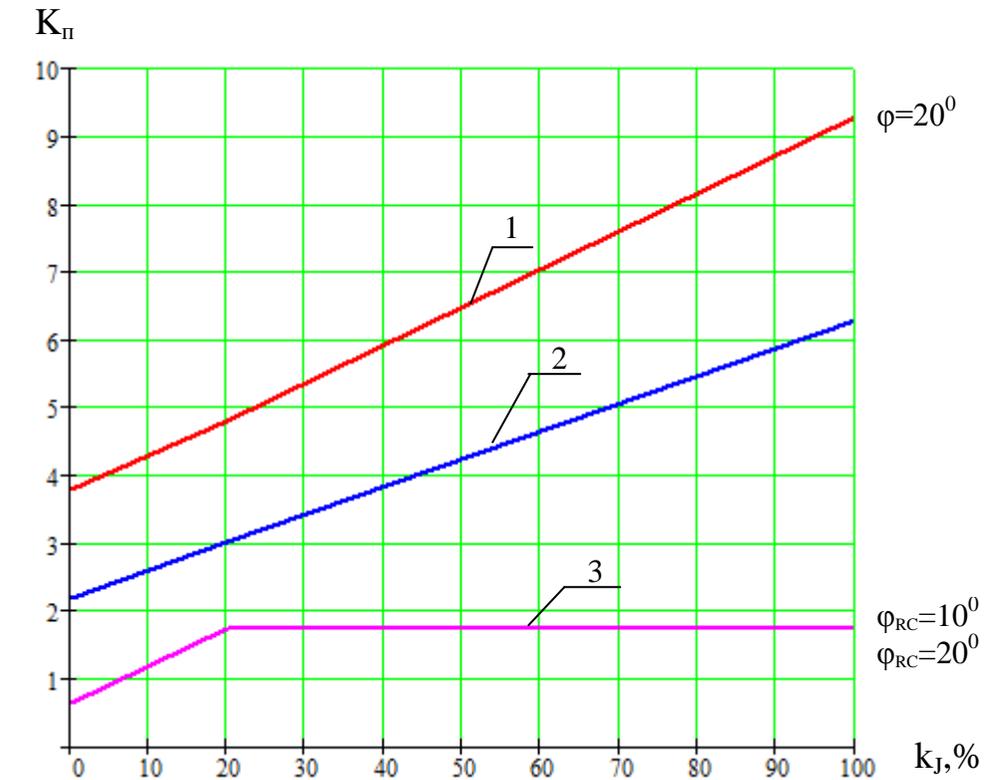
Исследования показали, что увеличение угла коммутации приводит к росту КП независимо от мощности двигателя.

Например, в случае отключения синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт при изменении угла коммутации с 10^0 и 20^0 кратность КП возрастает в среднем в 1,6 раза.

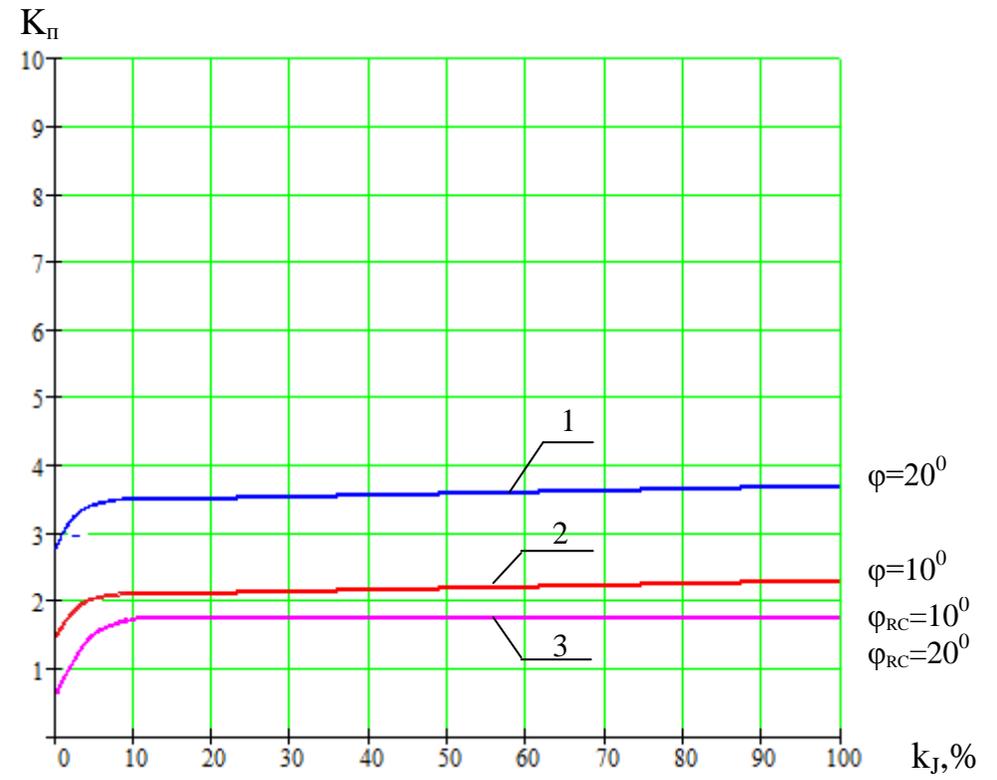
Характерные изменения переходных процессов, возникающие при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт при углах коммутации 10^0 и 20^0 , показаны на рисунках П.2.1 - П.2.4 приложения 2.

Анализ переходных процессов показывает, что со снижением мощности синхронных двигателей при одинаковых коэффициентах искажения синусоидальности кривой тока кратность КП возрастает, что не противоречит зависимостям кратности КП от мощностей двигателей, представленным в работах [50, 62]. Увеличение угла коммутации приводит к росту кратности КП и практически не влияет на характер переходного процесса.

Таким образом, при отключении синхронных двигателей без специальных средств защиты от КП рост коэффициента искажения несинусоидальности кривой тока и угла коммутации приводит к увеличению кратности КП. При этом для двигателей мощностью 1250 кВт определяющим фактором является угол коммутации, а для двигателей мощностью 520 кВт существенное влияние на кратность КП оказывают оба фактора.



a)



б)

Рисунок 3.3. – Зависимость кратности коммутационных перенапряжений от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока при отключении синхронного двигателя мощностью 520 кВт (а) и 1250 кВт (б) без устройств защиты от коммутационных перенапряжений (1, 2) и с использованием RC-гасителей (3)

3.5 Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при отключении синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт со средствами защиты от коммутационных перенапряжений

Анализ существующих средств и устройств ограничения КП показал, что наиболее надежным устройством защиты от КП высоковольтных электродвигателей являются RC-гасители, так как они обладают высокой термической устойчивостью к высшим гармоникам тока.

Остается открытым вопрос, как влияет коэффициент искажения синусоидальности кривой тока на уровень ограничения КП.

Базовым элементом RC-гасителя является RC-цепь. Емкость RC-цепи находится в диапазоне от 0,1 мкФ до 0,25 мкФ. Учитывая, что емкость RC-цепи намного больше собственной емкости обмоток электродвигателя, в схеме замещения собственная емкость двигателя была заменена на емкость RC-цепи, а активное сопротивление было увеличено на величину, равную сопротивлению RC-цепи.

При математическом моделировании рассматривалась емкость RC-цепи, равная 0,1 мкФ и 0,25 мкФ, сопротивление резистора было принято 12,5 Ом.

Математическое моделирование показало, что при емкости RC-цепи, равной 0,25 мкФ, кратность КП практически не зависит от мощности двигателя, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и угла коммутации. Значение кратности КП не превышает уровня 1,75, что ниже допустимого значения, равного 1,8.

Графики зависимостей $K_{п} = f(k_J)$ для рассматриваемых мощностей двигателей и углов коммутации представлены на рисунке 3.3.

Изменение напряжения на зажимах синхронных двигателей мощностью 520 кВт и 1250 кВт при отключении их от сети для значений емкости RC-цепи, равной 0,1 мкФ и 0,25 мкФ, при углах коммутации 10^0 и 20^0 приведены на рисунках П.2.5 - П.2.12 приложения 2.

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением емкости RC-цепи время переходного процесса снижается, а максимальное значение практически не изменяется.

На основании математического моделирования можно сделать вывод, что высшие гармоники тока не влияют на уровень ограничения КП, если в качестве средства защиты используются RC-цепи с параметрами $R=12,5$ Ом и $C=0,25$ мкФ.

Выводы по третьей главе:

1. Физические процессы, возникающие при отключении электродвигателей от сети напряжением 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник тока, приводят к росту кратности КП за счет увеличения среза тока, если угол коммутации не превышает 36° по отношению к основной гармонике. При углах коммутации от 36° до 54° будет наблюдаться снижение среза тока, так как 5 и 7 гармоники тока по отношению к основной гармонике находятся в противофазе, что может привести к снижению кратности КП. При углах коммутации от 54° до 90° может наблюдаться как снижение, так и рост кратности перенапряжений в зависимости от амплитудных значений 5-ой и 7-ой гармоник тока, которые находятся в противофазе по отношению друг к другу.
2. Математическая модель КП при наличии высших гармоник тока в результате среза тока без повторных зажигания дуги была разработана на основе принципа суперпозиций, что позволило наглядно представить физическую модель с позиции математики.
3. Отключение синхронных двигателей от сети 6 кВ показало, что основополагающим фактором, влияющим на величину КП, является мощность двигателя, коэффициент искажения синусоидальности кривой тока и угол коммутации. С увеличением мощности двигателя при прочих равных условиях кратность КП снижается. Рост ко-

эфициента искажения синусоидальности кривой тока и увеличение угла коммутации, при котором наблюдается срез тока, приводят к возрастанию значения кратности КП.

4. Для двигателей мощностью свыше 1000 кВт существенное влияние на рост кратности КП оказывает угол коммутации, в то время как для двигателей мощностью менее 1000 кВт величина КП зависит как от угла коммутации, так и от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока.
5. Использование RC-цепей с параметрами: $C = 0,25$ мкФ и $R = 12,5$ Ом - позволяет обеспечить надежную защиту электродвигателей от КП при наличии высших гармоник тока в сетях 6 - 10 кВ. При этом кратность КП не зависит от мощности двигателя, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и угла коммутации и не превышает значения 1,75.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 - 10 КВ

Показано влияние класса напряжения сети и типа кабельной линии на величину понижающего коэффициента. Отражено влияние высших гармоник тока на величину коммутационных перенапряжений. Выполнено определение корректирующих коэффициентов при расчете кратностей коммутационных перенапряжений. Разработана комплексная методика оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ.

Анализ существующих методов оценки и прогнозирования КП показал, что наиболее практичным и достоверным является экспресс - метод оценки КП [5]. Достоинствами данного метода является простой алгоритм определения величины КП для вакуумных и масляных выключателей в зависимости от типа и мощности нагрузки, длины и сечения кабельной линии. Значение КП в любой точке системы «выключатель – кабельная линия – электродвигатель (трансформатор)» определяется с помощью эмпирических кривых и понижающего коэффициента.

Эмпирические кривые, представленные на рисунках 1.11 и 1.12, отражают зависимость максимальных кратностей КП от типа и мощности нагрузки, а понижающий коэффициент определяет частичное ограничение КП относительно расчетной точки. Применение понижающего коэффициента зависит от частоты коммутационного импульса. При частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц для определения кратностей КП понижающий коэффициент не используется. Значения данного коэффициента представлены в виде зависимостей $k_{п} = f(l_{кл}; S_{кл})$ и отображены на рисунке 1.13.

Рассматриваемый метод позволяет оценить КП при использовании вакуумных и масляных выключателей и не учитывает влияние электромагнитных и элегазовых выключателей на характер перенапряжений, в связи с чем

невозможно комплексное его использование для оценки и прогнозирования КП ни на стадии проектирования, ни в процессе эксплуатации систем электроснабжения напряжением 6 - 10 кВ.

К недостаткам данного метода относится погрешность расчетов, которая может достигать 19%, что не обеспечивает обоснованный подход к выбору устройств защиты при КП. Погрешность экспресс - методов обусловлена неполнотой учета факторов, влияющих на величину и характер КП: напряжения сети, типа изоляции кабеля и наличия высших гармоник.

Изучение указанных факторов и закономерностей возникновения КП при коммутации электродвигателей и трансформаторов элегазовыми и электромагнитными выключателями позволит расширить экспресс метод оценки и прогнозирования КП, что сделает возможным использовать его как базу для разработки комплексного метода оценки и прогнозирования КП в системах электроснабжения 6 - 10 кВ.

4.1 Изучение влияния класса напряжения сети на величину понижающего коэффициента

Значения понижающих коэффициентов, представленных на рисунке 1.13, максимально приближены для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке напряжением 6 кВ типа АСГ, СГ, АСБГ, СБГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, ААШв, ААБлГ и других.

Исследования показали, что кабели напряжением 10 кВ ограничивают КП менее эффективно, так как собственная емкость кабелей напряжением 10 кВ меньше собственной емкости кабелей напряжением 6 кВ.

Во сколько раз значение понижающего коэффициента для сетей 6 кВ отличается от понижающего коэффициента для сетей 10 кВ, можно определить исходя из следующих условий: параметры электродвигателей или трансформаторов аналогичны, следовательно, можно считать, что индуктив-

ность нагрузки величина постоянная, величина среза тока в выключателях одна и та же.

Примем

$$k_u = \frac{U_{кп10}}{U_{кп6}}, \quad (4.1)$$

где $U_{кп6}$ и $U_{кп10}$ - перенапряжения в сетях 6 кВ и 10 кВ.

В то же время

$$U_{кп} = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (4.2)$$

где i_0 – ток среза, А;

L – индуктивность электроприемника, Гн;

C – емкость электроприемника, Ф.

Выражение (4.1) с учетом формулы (4.2) примет вид:

$$k_u = \sqrt{\frac{C_6}{C_{10}}}, \quad (4.3)$$

где C_6 и C_{10} – собственная емкость кабеля для сетей 6 кВ и 10 кВ, мкФ.

Емкость кабеля можно определить по величине тока однофазного замыкания на землю:

$$C = \frac{I_{уд} \cdot l}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \omega}, \quad (4.4)$$

где $I_{уд}$ – удельный емкостной ток кабеля в сетях 6 - 10 кВ, А/км;

l – длина кабельной линии, км;

ω – угловая частота, рад/с;

U_{ϕ} – фазное напряжение сети, кВ.

Значения удельных емкостных токов ($I_{уд}$) приведены в [27].

С учетом того, что фазное напряжение в сети 10 кВ в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения в сети 6 кВ, а также выражения (4.4), формула (4.3) примет вид:

$$k_u = 1,315 \cdot \sqrt{\frac{I_{уд6}}{I_{уд10}}}. \quad (4.5)$$

Соотношение понижающих коэффициентов в сетях 6 кВ по отношению к сети 10 кВ можно выразить соотношением:

$$k_{10} = \frac{k_6}{k_u}. \quad (4.6)$$

Следовательно, понижающий коэффициент для кабелей напряжением 10 кВ можно определить через понижающий коэффициент для кабелей напряжением 6 кВ с учетом поправочного коэффициента по классу напряжения (k_U).

Поправочный коэффициент на класс напряжения для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией в оболочке (броне) со стандартными сечениями 25 мм²; 35 мм²; 50 мм²; 70 мм²; 95 мм²; 120 мм²; 150 мм²; 185 мм²; 240 мм² рассчитан по выражению (4.5) и соответственно составляет 1,486; 1,463; 1,489; 1,503; 1,484; 1,539; 1,511; 1,549; 1,514. Для практических расчетов можно принять среднее значение коэффициента k_U , равное 1,5. Наибольшее отклонение среднего значения коэффициента k_U от вышеуказанных значений не превышает 3,3%.

Аналогичные результаты получены для кабелей с резиновой изоляцией, эксплуатируемых на горнодобывающих предприятиях.

Для кабелей из сшитого полиэтилена с сечением жилы 50 мм²; 70 мм²; 95 мм²; 120 мм²; 150 мм²; 185 мм²; 240 мм² среднее значение коэффициента k_U равно 1,45.

Таким образом, поправочный коэффициент по классу напряжения для кабелей из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ составляет 1,45, для остальных типов кабелей данного класса напряжения этот коэффициент равен 1,5.

4.2 Изучение влияния типа кабельной линии на величину понижающего коэффициента

В разделе 4.1 были выполнены исследования по влиянию класса напряжения на величину КП для одностипных кабелей.

В настоящем разделе рассматривается вопрос о влиянии разных типов изоляции кабелей, используемых в сетях 6 кВ или 10 кВ, на величину КП.

Поправочный коэффициент по типу изоляции кабеля ($k_{тип}$) для кабелей с резиновой изоляцией, изоляцией из пластика и сшитого полиэтилена по отношению к кабелям с бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке можно определить по выражению:

$$k_{тип} = \frac{U_{кп}}{U_{кп.тип}}, \quad (4.7)$$

где $U_{кп}$ – перенапряжения в сетях, выполненных из кабелей с бумажной пропитанной изоляцией, кВ;

$U_{кп.тип}$ - перенапряжения в сетях, выполненных из кабелей с пластиковой, резиновой изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена, кВ.

С учетом выражений (4.2) и (4.4) соотношение (4.7) примет вид:

$$k_{тип} = \sqrt{\frac{I_{уд.тип}}{I_{уд}}}, \quad (4.8)$$

где $I_{уд}$ – удельный ток кабельной линии с бумажной пропитанной изоляцией определенного класса напряжения и сечения, А/км;

$I_{уд.тип}$ - удельный ток кабельной линии с пластиковой, резиновой изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена, А/км.

Сопоставляя данные, изложенные в [27], с использованием формулы (4.6) получим, что поправочный коэффициент в зависимости от типа кабеля по отношению к кабелю с бумажной пропитанной изоляцией в сетях 6 кВ составит 1,4; 1,25 и 2,6 соответственно для кабелей с пластиковой и резиновой изоляцией; для кабелей в металлических оболочках (бронированных) и для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

В сетях 10 кВ значение поправочного коэффициента в зависимости от типа кабеля по отношению к кабелю с бумажной пропитанной изоляцией составит: для кабелей с пластиковой и резиновой изоляцией -1,39; для кабелей в металлических оболочках с пластиковой изоляцией – 1,25 и для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена – 2,7.

При этом указанные значения поправочного коэффициента не превышают 5% для стандартных сечений рассмотренных типов кабелей, что приемлемо для практического применения.

В связи с тем, что отношение поправочных коэффициентов для кабелей напряжением 6 и 10 кВ не превышает 4%, можно принять следующие величины коэффициентов, равные 1,4; 2,25 и 2,6, для кабелей с пластиковой и резиновой изоляцией; для кабелей в металлических оболочках (бронированных) и для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена соответственно.

Таким образом, значение понижающего коэффициента в зависимости от класса напряжения и типа кабеля будет определяться по выражению:

$$k_{\Pi} = \frac{k_6}{k_u \cdot k_{тип}}, \quad (4.9)$$

где k_6 – понижающий коэффициент, который определяется по графикам, представленным на рисунке 1.13;

k_U и $k_{тип}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие класс напряжения сети и тип кабельной линии.

4.3 Влияние высших гармоник тока на перенапряжения, возникающие при коммутации силовых трансформаторов

На рисунке 4.1 приведена зависимость поправочного коэффициента кратности КП от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока.

Значение данного поправочного коэффициента определялось по выражению:

$$k_{ВГ} = \frac{K_{max}}{K_{ВГ}}, \quad (4.10)$$

где K_{max} – максимальная кратность КП в сетях 6 - 10 кВ при отсутствии высших гармоник тока;

$K_{ВГ}$ - кратность КП в сетях 6 - 10 кВ при наличии высших гармоник.

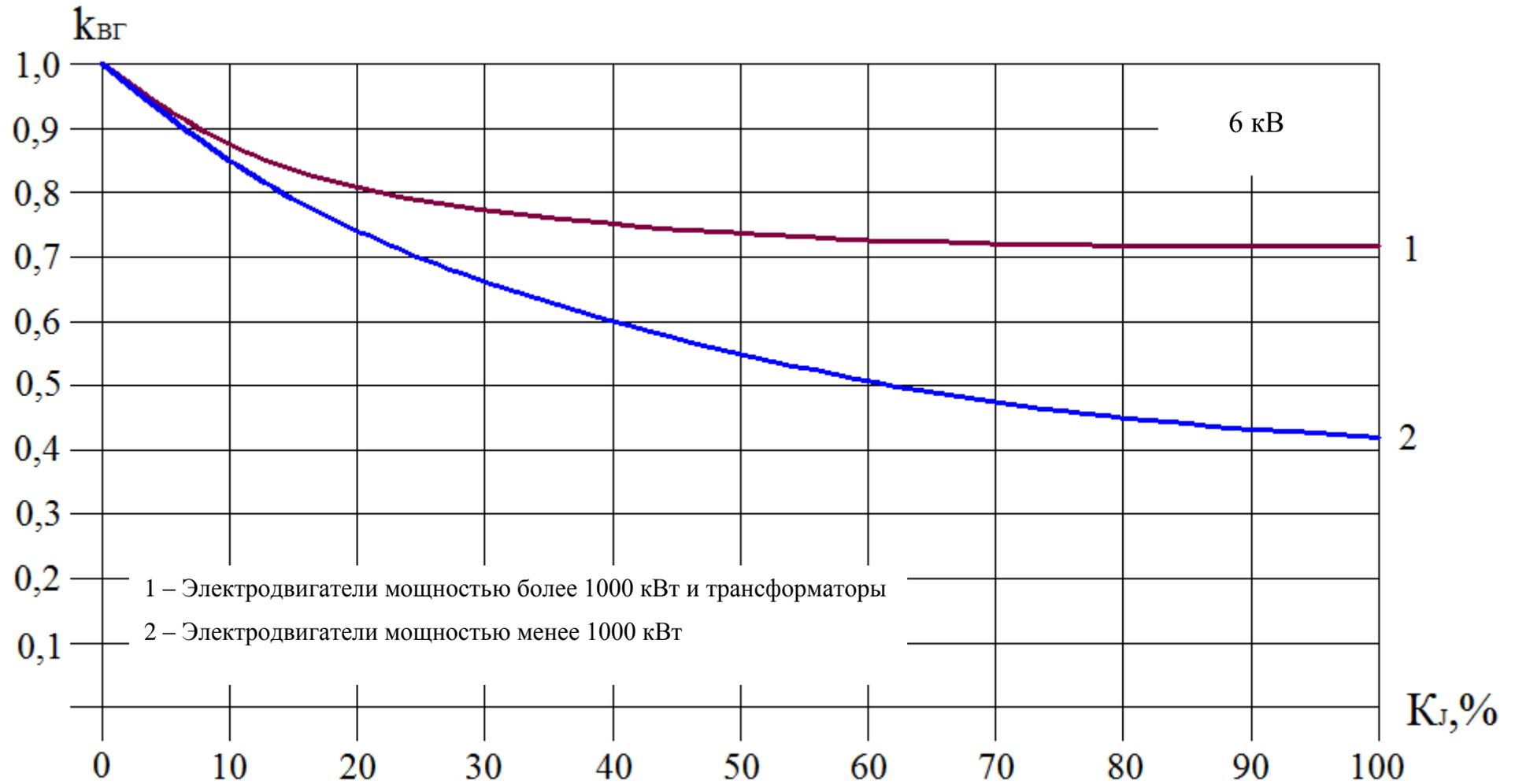


Рисунок 4.1 – Зависимость поправочного коэффициента кратности коммутационных перенапряжений от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока

4.4 Определение корректирующего коэффициента кратности КП

Для трансформаторов и электродвигателей в сетях 6 кВ значение перенапряжения определяется по формуле:

$$U_{\text{кпб}} = \frac{K_{\text{max}} \cdot U_{\text{нб}}}{k_{\text{п}}}. \quad (4.11)$$

где K_{max} – максимальная кратность перенапряжения на зажимах нагрузки при длине кабельной линии не более 50м;

$U_{\text{нб}}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$k_{\text{п}}$ – понижающий коэффициент (определяется по кривым, представленным на рисунке 1.14).

С учетом влияния типа кабеля и наличия высших гармоник выражение (4.11) примет вид:

$$U_{\text{кпб}} = \frac{1}{k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}} \cdot K_{\text{max}} \cdot U_{\text{нб}}. \quad (4.12)$$

Следовательно, кратность перенапряжения в рассматриваемой точке будет равна:

$$K = \frac{1}{k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}} \cdot K_{\text{max}}. \quad (4.13)$$

Исходя из выражения (4.13) значение корректирующего коэффициента будет равно:

$$k_{\text{к.к.б}} = \frac{1}{k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}}. \quad (4.14)$$

В сетях напряжением 10 кВ значение перенапряжения будет определяться по формуле:

$$U_{\text{кп10}} = \frac{k_u \cdot K_{\text{max}} \cdot U_{\text{н6}}}{k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}} \quad (4.15)$$

Кратность перенапряжения в сетях напряжением 10 кВ будет равна:

$$K_{10} = \frac{U_{\text{кп10}}}{U_{\text{н10}}} = \frac{U_{\text{кп10}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н6}}} \quad (4.16)$$

Выражение (4.16) с учетом формулы (4.15) можно записать в виде:

$$K_{10} = \frac{k_u}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}} \cdot K_{\text{max}} \quad (4.17)$$

Отсюда корректирующий коэффициент для сетей напряжением 10 кВ будет равен:

$$k_{\text{к.к.10}} = \frac{k_u}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{вг}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тип}}} \quad (4.18)$$

Корректирующий коэффициент для сети напряжением 10 кВ можно выразить через корректирующий коэффициент для сети 6 кВ:

$$k_{\text{к.к.10}} = \frac{k_u}{\sqrt{3}} \cdot k_{\text{к.к.6}} \quad (4.19)$$

Таким образом, использование корректирующего коэффициента $k_{\text{к.к.}}$ позволяет учесть влияние напряжения сети, типа и параметров кабельной линии и наличие высших гармоник на характер и величину КП.

На основе данного коэффициента и с учетом результатов исследований, приведенных во второй главе настоящей диссертации и в работе [5],

можно разработать комплексную методику по оценке и прогнозированию КП в радиальных системах электроснабжения 6 - 10 кВ.

4.5 Комплексная методика оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ

Обобщенные результаты исследований при коммутации электродвигателей и трансформаторов электромагнитными, масляными, элегазовыми и вакуумными выключателями показаны на рисунках 4.2, 4.3 и 4.4.

Изменение величины понижающего коэффициента приведено на рисунке 1.13, а значение коэффициента, учитывающего влияние высших гармоник на КП, отражено на рисунке 4.1.

Отметим, что использование понижающего коэффициента для оценки КП на зажимах нагрузки ограничивается частотой коммутационного импульса. При частоте коммутационного импульса 45 кГц и более понижающий коэффициент не используется. Для расчета кратности КП в месте соединения кабельной линии с выключателем понижающий коэффициент используется независимо от частоты коммутационного импульса.

Ниже приведены составные части комплексной методики по оценке и прогнозированию КП в сетях 6 - 10 кВ.

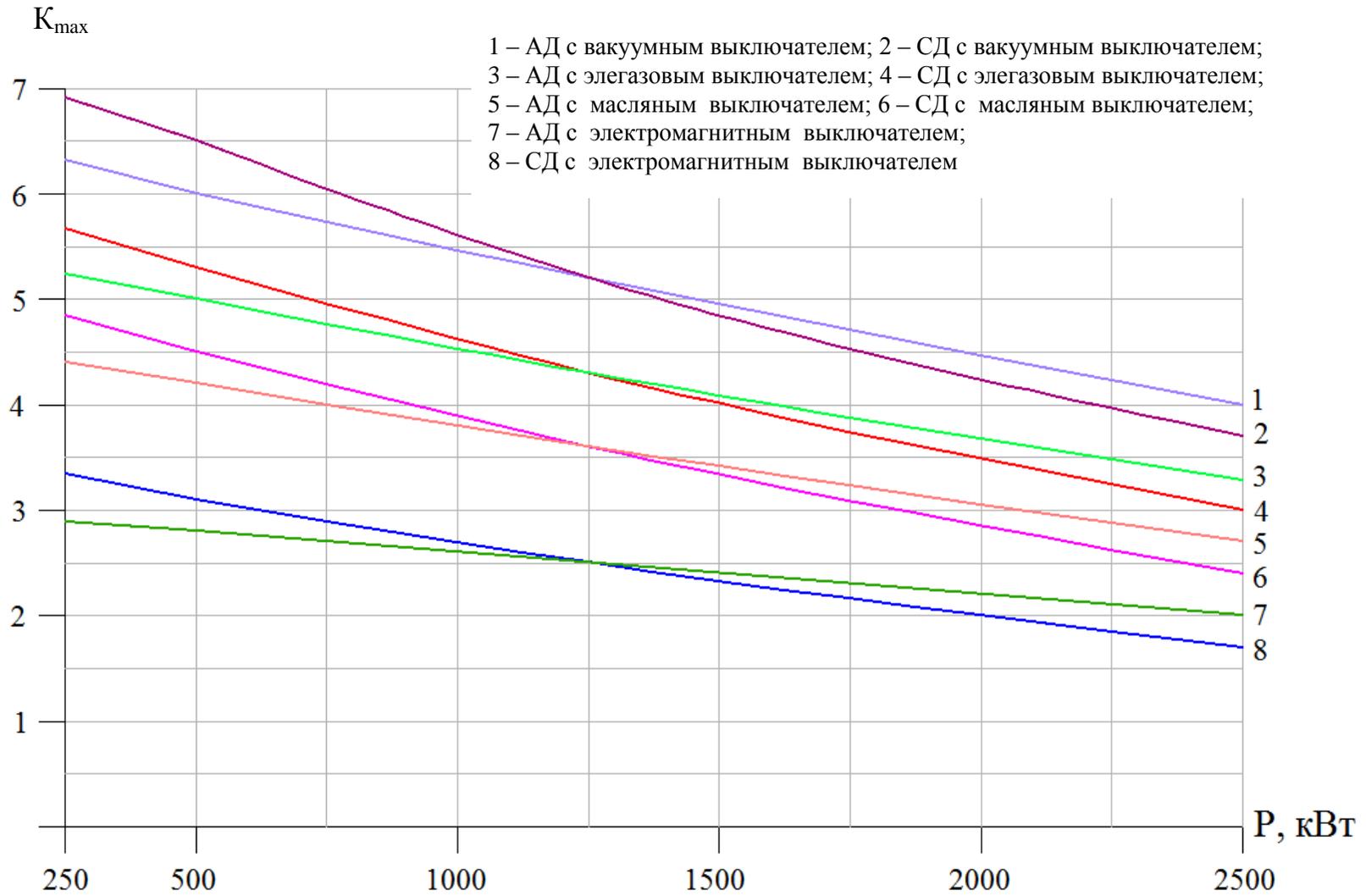


Рисунок 4.2 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для синхронных и асинхронных электродвигателей от типа выключателя

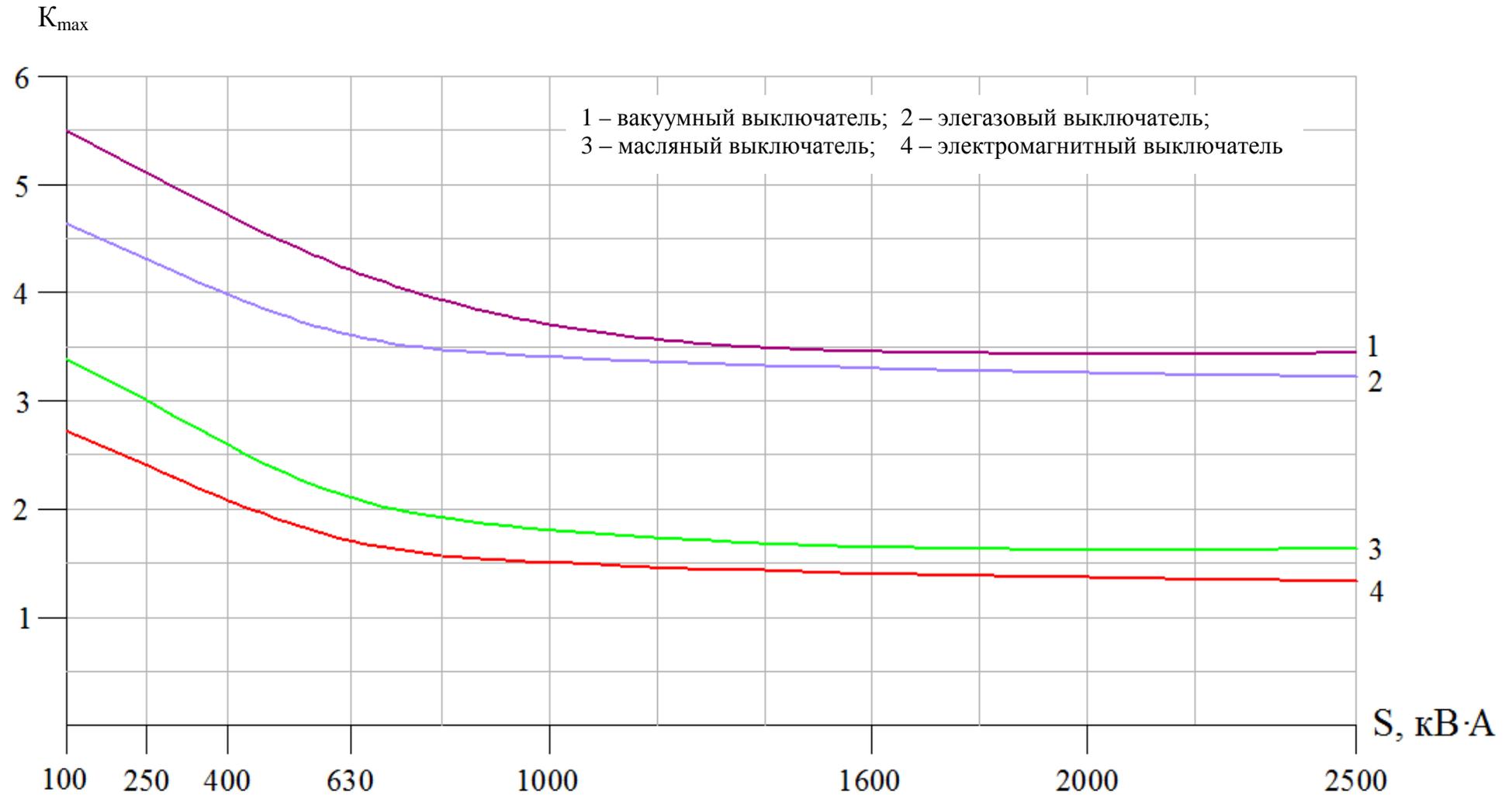


Рисунок 4.3 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для сухих трансформаторов от типа выключателя

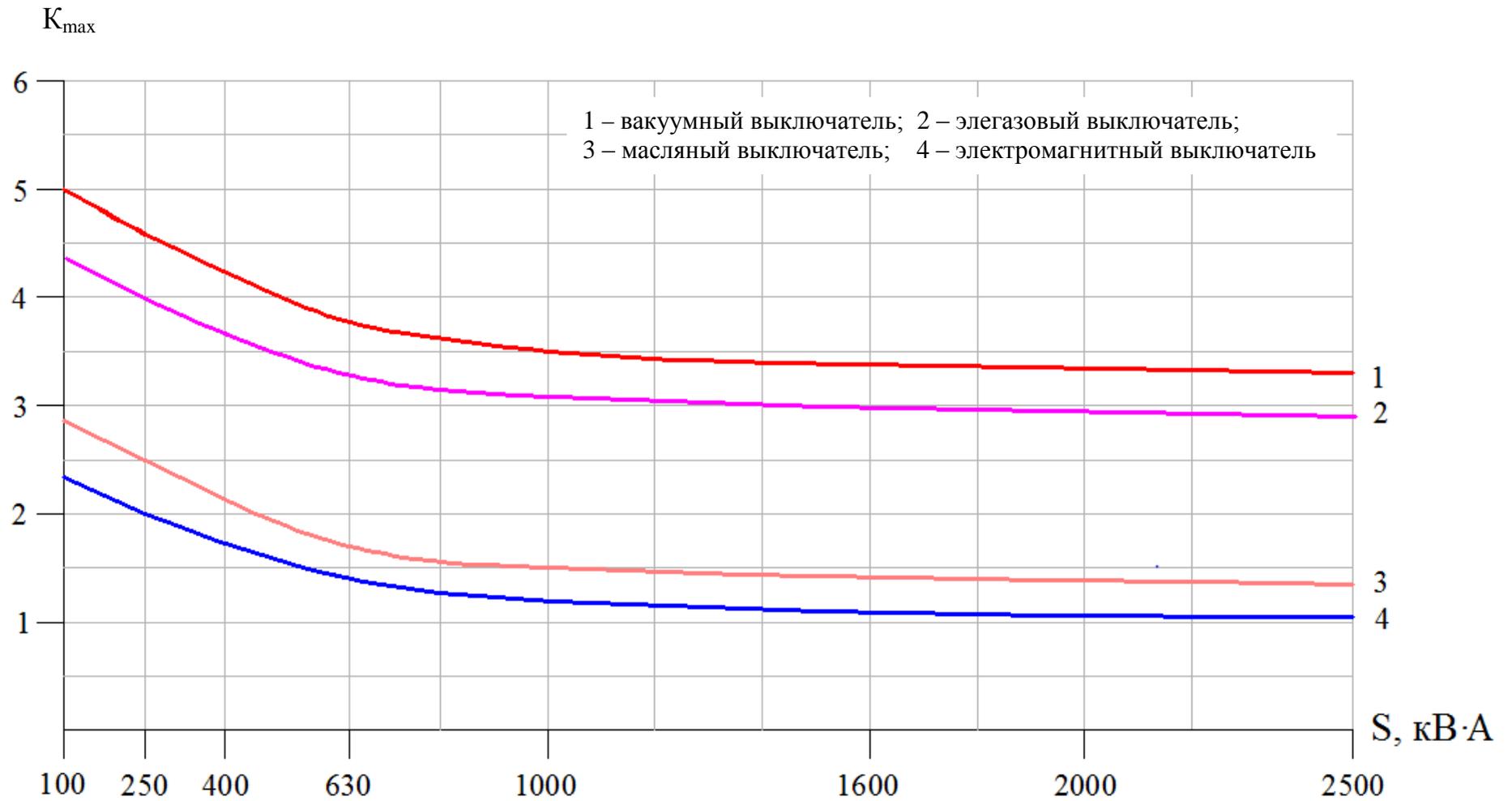


Рисунок 4.4 – Зависимости максимальных значений кратности коммутационных перенапряжений для масляных трансформаторов от типа выключателя

4.5.1 Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями

На рисунке 4.5 приведена расчетная схема для определения КП в точках соединения кабельной линии с выключателем (точка К1) и электродвигателем (точка К2).



Рисунок 4.5 – Расчетная схема для определения кратностей коммутационных перенапряжений

Согласно исследованиям, приведенным в разделе 2.4, при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляными и электромагнитными выключателями частота коммутационного импульса не превышает 38 кГц, следовательно, при оценке КП необходимо использовать понижающий коэффициент. В этом случае расчет кратности КП необходимо выполнить в следующей последовательности:

1. Величина КП на зажимах двигателя или трансформатора при отключении (точка К2) определяется по формулам:

$$K_{п10}^{(2)} = \frac{k_u}{\sqrt{3}} \cdot k_{к.к.6} \cdot K_{max}, \quad (4.20)$$

$$K_{п6}^{(2)} = k_{к.к.6} \cdot K_{max}, \quad (4.21)$$

где K_{max} – максимальное значение кратности КП на зажимах нагрузки, которое выбирается по кривым, представленным на рисунках 4.2 и 4.3 в зависи-

мости от типа и мощности электродвигателя или трансформатора с учетом типа выключателя.

2. Величина КП при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя (точка К1) определяется по выражениям:

$$K_{пб}^{(1)} = \frac{K_{пб}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (4.22)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.23)$$

3. Величина КП в сетях 6 - 10 кВ на зажимах электродвигателя или трансформатора при включении (точка К2) определяется по формуле:

$$K_{п.вкл}^{(2)} = \frac{4,2}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.24)$$

4. Величина КП в точке соединения кабельной линии и выключателя при включении (точка К1) определяется по выражению:

$$K_{п.вкл}^{(1)} = \frac{K_{п.вкл}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.25)$$

4.5.2 Оценка перенапряжений при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт и до 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями

Согласно исследованиям, приведенным в разделе 4.2, при коммутации электродвигателей мощностью до 1250 кВт элегазовыми выключателями и электродвигателей мощностью до 2500 кВт вакуумными выключателями ча-

стота коммутационного импульса превышает 45 кГц, следовательно, расчет КП необходимо производить в следующей последовательности:

1. Величина КП на зажимах электродвигателя при отключении (точка К2) определяется по формуле:

$$K_{п.6}^{(2)} = \frac{K_{\max}}{k_{вг}}, \quad (4.26)$$

$$K_{п.10}^{(2)} = \frac{k_u \cdot K_{\max}}{\sqrt{3} \cdot k_{вг}}. \quad (4.27)$$

2. Величина КП при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя (точка К1) определяется по выражению:

$$K_{п6}^{(1)} = \frac{K_{п6}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}, \quad (4.28)$$

$$K_{п10}^{(1)} = \frac{K_{п10}^{(2)}}{k_{п} \cdot k_{тип}}. \quad (4.29)$$

3. Величина КП на зажимах двигателя и выключателя при включении (точка К2 и К1) определяется по формулам (4.24) и (4.25).

4.5.3 Оценка перенапряжений при коммутации трансформаторов и электродвигателей мощностью более 1250 кВт и 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными выключателями

При коммутации трансформаторов и электродвигателей мощностью более 1250 кВт и более 2500 кВт соответственно элегазовыми и вакуумными

выключателями частота коммутационного импульса не превышает 45 кГц, следовательно, расчет КП необходимо производить по методике, изложенной в подразделе 4.5.1.

Таким образом, комплексная методика расчета КП в сетях 6 - 10 кВ состоит из трех основных частей, изложенных в подразделах 4.5.1 - 4.5.3.

4.6 Сравнительный анализ достоверности прогнозирования перенапряжений комплексным методом и методом экспресс оценки коммутационных перенапряжений

Для анализа полученных результатов по оценке и прогнозированию КП с использованием комплексного метода и экспресс метода были выполнены выборочные исследования.

С этой целью на Саяногорском алюминиевом заводе были выбраны два объекта для исследования, расчетная схема представлена на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Расчетная схема

Первый объект - силовой масляный трансформатор типа ТМ-400/10, коммутируемый вакуумным выключателем ВВ/TEL 10-12,5/630. Между выключателем и трансформатором использовался кабель типа АСБ -10 (3x70) длиной 150м. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока 43%.

Второй объект - силовой масляный трансформатор типа ТМ-400/10, коммутируемый вакуумным выключателем ВВ/TEL 10-12,5/630. Между выключателем и трансформатором использовался кабель с изоляцией из сшитого

го полиэтилена типа АПВВ-10 (3х95) протяженностью 70м. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока 24%.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

Характерные осциллограммы при включении и отключении данных объектов представлены на рисунках П.3.1 - П.3.4 приложения 3.

Сопоставляя измеренные значения кратности КП с расчетными данными, видим, что погрешность экспресс - метода оценки КП достигает 57,6% и 19,3% при включении первого и второго объекта, при отключении первого объекта погрешность расчетов составляет 42%, а при отключении второго объекта превышает 100%, что недопустимо для оценки возникновения КП.

Использование комплексного метода для оценки КП позволило снизить погрешность до 9% как при включении, так и при отключении объектов коммутации.

Таким образом, погрешность комплексного метода оценки в среднем в 6 раз меньше погрешности экспресс метода - оценки КП. Необходимо отметить более высокую трудоемкость комплексного метода по отношению к экспресс - методам оценки возникновения КП.

Выводы по четвертой главе:

1. Класс напряжения сети влияет на уровень КП. В сетях напряжением 10 кВ величина КП ниже, чем в сетях напряжением 6 кВ.
2. Тип кабеля оказывает существенное влияние на величину КП. Наибольшее значение кратности КП характерно для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией в металлической оболочке.
3. Высшие гармоники тока оказывают влияние на величину КП. С увеличением коэффициента искажения синусоидальности кривой тока величина КП возрастает.
4. Комплексный метод оценки и прогнозирования КП является более полным и точным относительно экспресс - метода оценки. Комплексный метод охватывает все типы выключателей, эксплуатируемых в сетях напряжением 6 - 10 кВ, в то время как экспресс - метод разработан только для вакуумных и масляных выключателей. Комплексный метод оценки и прогнозирования КП учитывает класс напряжения сети, тип кабельной линии и влияние высших гармоник.
5. Максимальная погрешность расчетов при использовании комплексного метода оценки и прогнозирования КП составляет 9%. При расчетах посредством экспресс - метода оценки КП погрешность может достигать 50%, если в сети присутствуют высшие гармоники.
6. Комплексный метод оценки и прогнозирования КП более трудоемкий и требует большего объема расчетов и времени для оценки кратности КП в сравнении с экспресс - методом оценки КП.

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Выполнен сравнительный анализ эффективности устройств защиты от коммутационных перенапряжений. Определены рациональные области использования нелинейных ограничителей перенапряжений, RC-ограничителей и RC-гасителей. Представлена усовершенствованная конструкция RC-гасителя, позволяющая его успешно эксплуатировать в сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник.

5.1 Общие сведения

В первой главе были рассмотрены существующие устройства по ограничению КП в сетях 6 - 10 кВ промышленных предприятий.

К данным устройствам относятся ОПН, RC-ограничители и RC-гасители. На основе эксплуатации данных устройств в сетях 6 - 10 кВ были определены их преимущества и недостатки.

ОПН обладают небольшими габаритами и весом, что позволяет встраивать их в ячейки совместно с выключателями. Слабой стороной ОПН является низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю и наличие «зоны замирания» при частоте коммутационного импульса более 45 кГц.

RC-ограничители состоят из базовых RC-цепей, собранных по схеме «звезда» с заземленной нейтральной точкой. В связи с этим RC-ограничитель в режиме однофазного замыкания на землю увеличивает ток однофазного замыкания на землю, что негативно отражается на условиях электробезопасности и может привести к изменению нейтрали сети 6 - 10 кВ. Кроме этого, RC-ограничители имеют недостаточную термическую устойчивость к воздействию токов высших гармоник. К положительным свойствам RC-ограничителей относятся отсутствие «зоны замирания» в работе при

ограничении КП и высокая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю.

РС-гасители по конструкции близки к РС-ограничителям. Отличительной чертой РС-гасителей является отсутствие связи между нейтральной точкой устройства и землей и гораздо меньшее по величине сопротивление, встроенное в РС-цепи.

Подобная конструкция позволила повысить термическую устойчивость к токам высших гармоник и исключить влияние емкости РС-гасителя на величину тока однофазного замыкания на землю. В связи с этим аварийность данных устройств самая минимальная. Практика показала, что РС-гасители по сравнению с РС-ограничителями выходят из строя из-за воздействия высших гармоник реже практически в 5 раз. В основном это происходит на металлургических предприятиях, где используются мощные тиристорные преобразователи.

Перечисленные положительные стороны и недостатки позволяют охарактеризовать каждое устройство с общих позиций, но не отвечают на вопрос, какое из них более эффективно.

Анализ эффективности устройств защиты от КП приведен ниже.

5.2 Сравнительный анализ эффективности средств защиты от коммутационных перенапряжений

Сравнительный анализ эффективности существующих защит от КП произведен по следующим критериям:

- уровень ограничения КП;
- термическая устойчивость в нормальном режиме эксплуатации сети;
- термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю сети 6 кВ;
- влияние частоты коммутационного импульса на работу устройства;

- влияние параметров устройства на величину тока от однофазных замыканий на землю;
- массогабаритные показатели.

Для анализа эффективности рассматриваемых устройств использовался метод относительных критериев [59].

Согласно данному методу максимальная относительная величина по конкретному критерию определяется количеством рассмотренных устройств. В нашем случае максимальная относительная величина критерия равна 3, а минимальная - единице. Если рассматриваемый критерий оказывает негативное влияние на работу устройства, величина критерия минимальная, в противном случае величина критерия максимальная. Частичное влияние определенного критерия на работу устройства оценивается средним значением. Итоговое значение относительной величины всех критериев определяется по формуле:

$$K_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n K_i, \quad (5.1)$$

где K_i – относительная величина каждого критерия.

Однако не все рассматриваемые критерии влияют на функциональные свойства устройства, например, массогабаритные показатели.

Следовательно, итоговое значение функциональных критериев определяется по выражению:

$$K_{\phi} = \prod_{i=1}^n K_{i\phi}, \quad (5.2)$$

где $K_{i\phi}$ – значение функциональных критериев

Относительный критерий эффективности определяется из выражения:

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{K_{\phi}}{K_{\Sigma}}. \quad (5.3)$$

Чем больше относительный критерий эффективности, тем эффективнее устройство для реализации поставленной задачи. Во сколько раз одно устройство эффективнее другого, можно определить следующим образом:

$$\Phi = \frac{K_{эj}}{K_{эу}}, \quad (5.4)$$

где $K_{эj}$ и $K_{эу}$ – относительные критерии эффективности каждого из рассмотренных устройств.

Результаты анализа представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ эффективности устройств защиты от КП

№	Критерий	Тип устройств					
		ОПН	О.В.К ¹	RC-ограничитель	О.В.К ¹	RC-гаситель	О.В.К ¹
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Уровень ограничения КП	$(2,4-3,2)U_n$	1	$(1,6-1,8)U_n$	2	$(1,5-1,75)U_n$	2
2	Термическая устойчивость в нормальном режиме работы СЭС	Высокая	3	Высокая при отсутствии высших гармоник тока	2	Высокая	3
3	Термическая устойчивость в режиме ОЗЗ	Низкая	1	Высокая	3	Высокая	3
4	Влияние частоты коммутационного импульса на работу устройства	При $f_{ки} > 45 \text{ кГц}$ – «зона замирания»	1	Не оказывает	3	Не оказывает	3
5	Влияние высших гармоник тока на работу устройства	Не оказывает	3	Может вызвать термическое разрушение	1	Низкое	2
6	Влияние устройства на величину тока ОЗЗ	Не оказывает	3	Одно уст-во увеличивает емкостной ток ОЗЗ на 0,8 А	1	Не оказывает	3

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8
7	Вес базового элемента, кг	(1-1,2) кг	3	5 кг	2	5 кг	2
8	Габариты базового элемента, мм (высота, длина, ширина, диаметр)	h=150мм ø=(80-100)	3	240x160x120	2	270x180x120	1
9	Суммарное значение относительной величины всех критериев K_{Σ}	243		144		648	
10	Суммарное значение относительной величины функционального критерия K_{Φ}	27		36		324	
11	Относительный критерий эффективности K_{Ω}	0,111		0,25		0,5	

Примечание 1 – относительная величина критерия

Исходя из данных, представленных в таблице 5.1, можно сделать заключение, что наиболее эффективным устройством является РС- гаситель.

РС- гаситель эффективнее нелинейного ограничителя перенапряжения и РС- ограничителя соответственно в 4,5 и 2 раза.

Рассмотрим более детально области применения указанных средств защиты от КП.

5.3 Рациональные области использования и применения устройств защиты от коммутационных перенапряжений

При выборе области применения того или иного устройства ограничения КП необходимо исходить из минимальной аварийности данного устройства и необходимой эффективности по ограничению КП.

5.3.1 Нелинейные ограничители перенапряжений

В работе ОПН наблюдается временный функциональный отказ при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц и низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю. ОПН рационально использовать для защиты трансформаторов, так как частота коммутационного импульса не будет превышать 45 кГц, что не приведет к появлению «зоны замирания» в работе ОПН в системах электроснабжения с нечастыми однофазными замыканиями на землю. Режим нейтрали таких сетей должен быть резистивным или комбинированным, что позволит исключить термическое разрушение ОПН в режиме однофазного замыкания на землю, так как кратность перенапряжений при дуговом однофазном замыкании на землю не будет превышать значения 2,2 [65, 73], что ниже порога срабатывания ОПН. Отметим, что ОПН не реагируют на токи высших гармоник, а уровень ограничения КП находится в диапазоне $(2,4 - 2,7)U_{ном}$.

Совместное использование ОПНов с вакуумными или элегазовыми выключателями для коммутации электродвигателей нерационально из-за недостаточного уровня ограничения КП и наличия «зоны замирания» в работе ОПН.

Для электродвигателей допустимая кратность КП не должна превышать 1,8, что ниже кратности перенапряжений, которую обеспечивает ОПН. Если коммутация электродвигателя производится вакуумным выключателем, то частота коммутационного импульса более 45 кГц будет наблюдаться при отключении электродвигателей до 2500 кВт. Для элегазовых выключателей частота коммутационного импульса свыше 45 кГц присуща электродвигателям мощностью до 1250 кВт.

С учетом указанных факторов наиболее рациональной областью использования ОПНов является защита трансформаторов в системах электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий с резистивным или комбинированным режимом нейтрали.

5.3.2 RC- ограничители

RC-ограничители подвержены термическому разрушению, если коэффициент искажения синусоидальности кривой тока более 10%.

Один трехфазный RC-ограничитель с параметрами: $C=0,25$ мкФ и $R = 50$ Ом - в сети 6 кВ и 10 кВ будет увеличивать емкостной ток замыкания на землю соответственно на 0,8 А и 1,4 А.

Поэтому использование RC-ограничителей в системах электроснабжения 6 – 10 кВ с токами однофазного замыкания на землю более 5 А и наличием высших гармоник нерационально, так как количество RC-ограничителей определяется допустимой величиной тока однофазного замыкания на землю, а высшие гармоники тока могут вызвать термическое разрушение устройства. К таким СЭС относятся распределительные сети металлургических предприятий.

Применение RC-ограничителей в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий, таких как Ачинский глиноземный комбинат, железорудные обогатительные фабрики и обогатительные фабрики предприятий, связанных с производством минеральных удобрений (ОАО «Уралкалий»), нецелесообразно, в связи с тем, что существующие токи однофазного замыкания на землю в сетях 6 кВ и 10 кВ выше значений, предусмотренных Правилами устройства электроустановок соответственно 30А и 20А [68, 69]. Дальнейшее увеличение тока однофазного замыкания на землю за счет RC-ограничителя приведет к увеличению мощности дугогасящих реакторов, используемых для компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю.

Следовательно, RC-ограничители рационально использовать на горных предприятиях, занимающихся добычей полезных ископаемых открытым способом, так как токи однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6кВ данных предприятий не превышают 5 А [32, 33], а количество высоковольтных электродвигателей, подключенных к одной секции шин транс-

форматорной подстанции 110/6 или 35/6, не превышает 15 единиц [61]. В этом случае значение емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю с учетом влияния RC-ограничителей на ток замыкания на землю не превысит 16 А, что ниже допустимого значения, равного 30 А.

Практическое отсутствие искажения синусоидальности кривой тока в сетях 6 кВ угольных разрезов и карьеров исключает условия термического разрушения RC-ограничителей от воздействия токов высших гармоник, что позволяет обеспечить высокую эффективность ограничения КП при коммутации высоковольтных электродвигателей. В этом случае кратность перенапряжений не превысит значения 1,7.

5.3.3 RC-гасители

RC-гасители можно использовать в системах электроснабжения 6 - 10 кВ практически на любых предприятиях, в том числе и на металлургических заводах и комбинатах.

Однако применение RC-гасителей в сетях 6 - 10 кВ металлургических предприятий не исключает их термического разрушения. Это связано с конструкцией базовых RC-цепей, в которых резистор и конденсатор вместе размещены в герметичном корпусе, и при нагреве резисторов, как правило, из-за воздействия высших гармоник тока может наступить разгерметизация базовых элементов и отклонение параметров RC-цепи, при которых RC-гаситель не обеспечит необходимого уровня ограничения КП, а дальнейшая эксплуатация разгерметизированных базовых элементов приведет к их термическому разрушению.

Таким образом, наиболее рациональными областями использования ОПНов и RC-ограничителей соответственно являются металлургические и горные предприятия с открытым способом добычи полезных ископаемых. RC-гасители можно использовать практически на всех предприятиях, если

свести к минимуму влияние высших гармоник на их термическую устойчивость.

5.4 Усовершенствованный RC-гаситель

Для расширения области использования RC-гасителей необходимо разработать специальный RC-гаситель, который будет успешно эксплуатироваться в сетях 6 - 10 кВ с наличием высших гармоник. Для этой цели достаточно изменить конструкцию базового элемента: вынести отдельно блок резисторов из герметичного корпуса, где находится конденсатор. Это позволит исключить вскипание диэлектрической жидкости конденсатора и, следовательно, ликвидировать условия разгерметизации RC-цепи за счет высокого давления.

Использование выносных резисторов позволит улучшить отвод тепла во внешнюю среду и тем самым обеспечит высокую термическую устойчивость RC-гасителей к воздействию высших гармоник тока.

Для уменьшения габаритов RC-цепи в усовершенствованном RC-гасителе собраны по схеме «звезда» с изолированной нейтральной точкой. Внешний вид данного устройства представлен на рисунке 5.1

Технические характеристики:

Номинальное напряжение сети 6 – 10 кВ

Уровень ограничения КП $\leq 1,75$

Электрические параметры: $R = 12,5$ Ом, $C=0,25$ мкФ

Габаритные размеры (h×l×b): 700 × 700 × 350, вес – 28 кг.

Степень защиты IP - 54

На рисунке 5.2 показаны зависимости температуры на поверхности блоков резисторов и внутри герметичного корпуса конденсатора от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока.



Рисунок 5.1 – Внешний вид RC-гасителя с выносным блоком сопротивлений

Полученные зависимости соответствуют двум значениям температуры окружающей среды: $+20^{\circ}\text{C}$ (кривые 1 и 3 на рисунке 5.2) и $+35^{\circ}\text{C}$ (кривые 2 и 4 на рисунке 5.2). Анализ данных зависимостей показывает, что максимальная температура нагрева конденсаторов не превысит 50°C , если температура окружающей среды составляет 35°C . При снижении температуры окружающей среды до 20°C температура нагрева конденсатора снизится до 32°C . Допустимая температура нагрева конденсаторов, используемых в базовых RC-цепях, не должна превышать 60°C .

Процесс нагрева резисторов происходит более интенсивно. Если температура окружающей среды составит 20°C и 35°C , то максимальная температура на поверхности резисторов соответственно будет равна 60°C и 75°C . Допустимая температура нагрева резисторов типа ТВО не должна превышать 80°C .

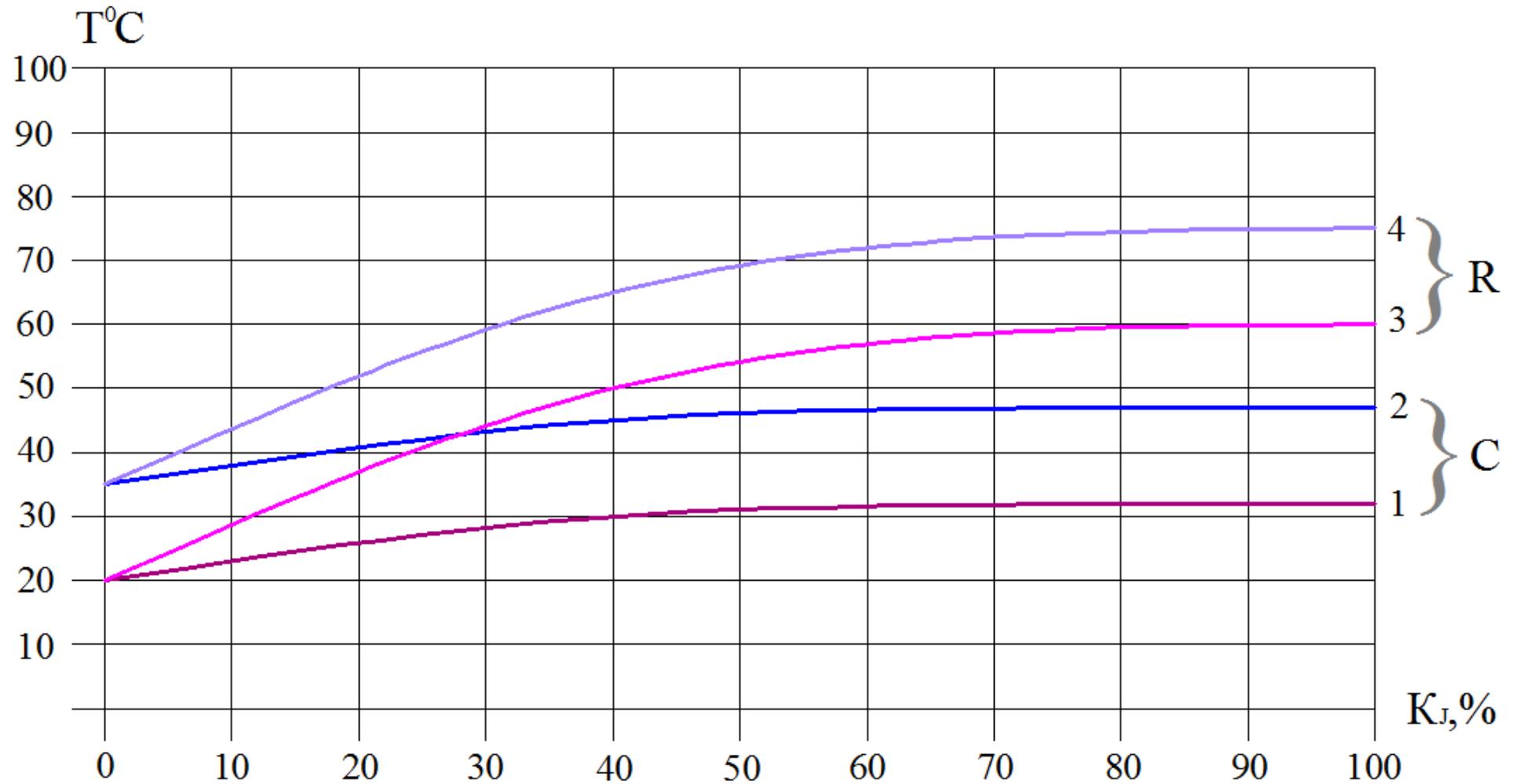


Рисунок 5.2 – Зависимость изменения температуры основных элементов RC-цепи RC-гасителя от коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и температуры окружающей среды

РС-гасители подобной конструкции успешно эксплуатируются в течение трех лет на Саяногорском и Иркутском алюминиевых заводах. Отзыв об их работе прилагается. В то же время срок эксплуатации РС-гасителей прежней конструкции на данных предприятиях не превышал 1,4 года.

Таким образом, использование двух конструкций РС-гасителей позволит расширить область их применения, включая и металлургические предприятия.

Выводы по пятой главе:

1. Эффективность РС-гасителей по отношению к нелинейным ограничителям перенапряжения и РС-ограничителям выше в 4,5 и 2,5 раза соответственно.
2. Рациональная область применения нелинейных ограничителей перенапряжения – защита силовых трансформаторов в распределительных сетях 6 – 10 кВ с наличием высших гармоник и резистивным или комбинированным режимом нейтрали.
3. РС – ограничители наиболее рационально использовать для защиты электродвигателей на горных предприятиях по добыче полезных ископаемых открытым способом с токами однофазного замыкания на землю менее 5 А.
4. Использование двух конструкций РС-гасителей позволяет успешно защищать как электродвигатели, так и трансформаторы от коммутационных перенапряжений в сетях 6 - 10 кВ практически на любых предприятиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Выполненный анализ аварийности распределительных сетей 6 - 10 кВ показал, что в настоящее время основной причиной аварийных отключений в системах электроснабжения промышленных предприятий является совокупность естественного старения изоляции кабельных линий и электрооборудования с КП, поэтому эффективное ограничение КП на основе достоверного прогнозирования КП позволит повысить надежность СЭС промышленных предприятий.
2. При выполнении экспериментальных исследований получены диапазоны частот коммутационных импульсов при использовании вакуумных, элегазовых, масляных и электромагнитных выключателей для коммутации электродвигателей и трансформаторов, что позволяет эффективно использовать кабельные линии для ограничения КП. Ограничение КП за счет параметров кабельной линии наблюдается, если частота коммутационного импульса менее 45 кГц, что приводит к ограничению перенапряжений на зажимах электродвигателей мощностью 2500 кВт и более при их коммутации вакуумным выключателем. При использовании элегазовых выключателей кабельная линия снижает величину КП на зажимах электродвигателей мощностью 1250 кВт и более. При эксплуатации масляных и электромагнитных выключателей кабельная линия уменьшает перенапряжения при коммутации электродвигателей независимо от их мощности. Кабельная линия снижает перенапряжения при коммутации трансформаторов любыми типами выключателей.
3. На основе статистической обработки экспериментальных данных получены зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для элегазовых и электро-

магнитных выключателей, что позволяет оценить кратность КП на вводах электроприемников при использовании указанных типов выключателей и выбрать необходимые устройства защиты от КП.

4. Результаты математического моделирования показывают, что для двигателей мощностью свыше 1000 кВт существенное влияние на рост кратности КП оказывает угол коммутации, в то время как для двигателей мощностью менее 1000 кВт величина КП зависит как от угла коммутации, так и от наличия высших гармоник, что позволило установить зависимость кратности КП от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока.
5. По результатам математического моделирования и экспериментальных исследований определено, что использование RC-цепей с параметрами: $C = 0,25$ мкФ и $R = 12,5$ Ом - позволяет обеспечить надежную защиту электродвигателей от КП при наличии высших гармоник тока в сетях 6 - 10 кВ, так как кратность КП не превышает значения 1,75, что ниже допустимого уровня для изоляции обмоток электродвигателей, равного 1,8, и практически не зависит от мощности и типа двигателя, коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и угла коммутации. Усовершенствованные RC-гасители выносным блоком резисторов и данными параметрами успешно эксплуатируются в течение трех лет в сетях 10 кВ на Саяногорском и Иркутском алюминиевых заводах компании РУСАЛ.
6. Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования КП в СЭС 6 - 10 кВ, охватывающий все типы высоковольтных коммутационных аппаратов, с учетом влияния напряжения сети, типа кабеля, параметров электродвигателей и трансформаторов и наличия высших гармоник тока.
7. Анализ эффективности устройств защиты от КП на основе использования методов относительных критериев позволил определить рациональные области использования ОПН, RC-ограничителей и RC-

гасителей. Рациональная область использования ОПН – защита трансформаторов от КП в распределительных сетях 6 - 10 кВ с резистивным и комбинированным режимом нейтрали. RC-ограничители и RC-гасители со встроенным блоком резисторов целесообразно использовать для защиты электродвигателей в сетях 6 - 10 кВ с коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока не более 10% и токами однофазного замыкания на землю менее и более 5А соответственно. RC-гаситель с выносным блоком резисторов может эксплуатироваться в распределительных сетях независимо от режима нейтрали, величины тока однофазного замыкания на землю и наличия высших гармоник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович, Б. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6 – 35 кВ [Текст] / Б. Абрамович, С.Кабанов, А. Сергеев, В. Полищук // Новости электротехники. – 2002. - №5. – С.22 - 24.
2. Альбокринов, В.С. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности [Текст] / В.С. Альбокринов, В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов // - Самара: Самарский университет. – 1997. – 324с.:ил.
3. Базуткин, В.В. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями [Текст] / В.В. Базуткин, Г.А. Евдокунин, Ф.Х. Халилов // Электричество. – 1994. - №2.
4. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах [Текст] / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь // – М.: Энергоатомиздат. - 1986. – 464с.:ил.
5. Барышников, Д.В. Экспресс - методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий [Текст] / Д.В. Барышников // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2010.
6. Белкин, Г.С. Закономерности среза тока в вакууме [Текст]/ Г.С. Белкин // Электричество. – 1991. – № 4. – С.6 – 10.
7. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. [Текст] / Л.А. Бессонов // – М.: Гардарики, 1999. – 638 с.: ил.
8. Бикфорд, Д.П. Моделирование на цифровых ЭВМ процесса неявного среза тока в вакуумных выключателях [Текст] / Д.П. Бикфорд // Electric Applications. - 1979. - №4. – С.125 – 131.

9. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров [Текст] / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын // – М.: Недра. - 1986. – 184с.:ил.
10. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А.И. Важнов // - Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние. – 1980. – 256 с.: ил.
11. Вакуумные дуги: Перевод с английского [Текст] / Под ред. Дж. Лаффети. – М.: Мир. – 1982. – 432с.
12. Васюра, Ю.Ф. Коммутационные перенапряжения при самозапуске высоковольтных электродвигателей [Текст] / Ю.Ф. Васюра, Г.А. Евдокунин // Электротехника. – 1985. № 9.
13. Виноградов, А.В. Защита ВЛ, выполненных СИП, от грозовых перенапряжений [Текст] / А.В. Виноградов // КАБЕЛЬ–news. – 2009. - №4. – С.31 – 34.
14. Воздвиженский, В.А. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями [Текст] / В.А. Воздвиженский, А.Ф. Гончаров, В.Б. Козлов // - М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 200с.
15. Воздвиженский, В.А. Срез тока в вакуумном выключателе [Текст] / В.А. Воздвиженский // Электричество. – 1973. - №6. – С.57-61.
16. Гаврилова, Е.В. Анализ аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири и основные направления по снижению аварийности [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, И.С. Зыков // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 22 – 24.
17. Гаврилова, Е.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6 - 10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Д.В. Барышников // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - №2. – С. 41 – 44.

18. Гаврилова, Е.В. Влияние процесса дугогашения выключателя на уровень и характер коммутационных перенапряжений [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 322 – 325.
19. Гаврилова, Е.В. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, В.А. Меньшиков, М.В. Коровина // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №3. – С. 6 – 9.
20. Гаврилова, Е.В. Исследование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий в режиме однофазного замыкания на землю [Текст] / Е.В. Гаврилова, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, Р.А. Майнагашев // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 66 – 67.
21. Гаврилова, Е.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, С.В. Немков // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №4. – С.53 - 54.
22. Гаврилова, Е.В. Основные направления по снижению аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ промышленных предприятий [Текст] / Е.В. Гаврилова, И.С. Зыков, Р.А. Майнагашев, В.В. Дементьев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2008. – С.142 – 146.
23. Гаврилова, Е.В. Сравнительный анализ высоковольтных коммутационных аппаратов с точки зрения коммутационных перенапряжений, возникающих в системах электроснабжения электродвигателей [Текст]

- / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, В.Н. Язев // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С. 280 – 285.
24. Гаврилова, Е.В. Устойчивость силовых трансформаторов 6 - 35 кВ к коммутационным перенапряжениям объектами [Текст] / Е.В. Гаврилова, В.В. Павлов, Р.А. Майнагашев, И.С. Кузьмин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2009.
25. Гаврилова, Е.В. Электромагнитная совместимость средств защиты от коммутационных перенапряжений с защищаемыми объектами [Текст] / Е.В. Гаврилова, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.Н. Язев, В.И. Суров, В.Е. Дубин, В.А. Меньшиков // Техничко-экономический вестник РУСАЛа. – 2006. - №17 – С. 62 – 64.
26. Гандулин, Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов // – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192 с.
27. Герасимов, А.И. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А.И. Герасимов, С.В. Кузьмин // Учебное пособие. – Красноярск: ГУЦМиЗ. – 2005. – 250с.
28. Гинзбург, С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях [Текст] / С. Г. Гинзбург // - М.: Высшая школа. – 1967. – 389 с.
29. Голубев, В.А. Вакуумные выключатели в электрических сетях открытых горных разработок [Текст] / В.А. Голубев, В.А. Котлярчук // - М.: Недра. – 1975.
30. Гольдберг, О.Д. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность электродвигателей [Текст] / О.Д. Гольдберг, И.М. Комлев, Н.И. Суворов // Электротехника. – 1968. - №5. – С.14 – 18.
31. Гончаров, А.Ф. Анализ результатов измерения перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей экскаваторов [Текст] / А.Ф.

- Гончаров, И.Я. Эпштейн, Ю.Н. Попов // Электротехника. - 1986. - №9. - С.13 – 16.
32. Гончаров, А.Ф. Влияние RC-защиты от коммутационных перенапряжений на условия электробезопасности [Текст] / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, С.В. Кузьмин, Ю.Н. Попов // Изв. вузов – Горный журнал. – 1989. – №8.
33. Гончаров, А.Ф. Выбор защитных емкостей для высоковольтных двигателей экскаваторов с учётом тока однофазного замыкания на землю [Текст] / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1986. – № 11.
34. Дегтярев, И.Л. Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами [Текст] / И.Л. Дегтярев, К.П. Кадомская, Р.В. Ког // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции // – Новосибирск. – 2002. – С.146 – 150.
35. Джуварлы, Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сетях с изолированной нейтралью [Текст] / Ч.М. Джуварлы // Электричество. - 1953. - №6. – С.18 – 27.
36. Евдокунин, Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения [Текст] / Г.А. Евдокунин, Г. Тиллер // – С.-Петербург: Издательство Сизова М.П.. – 2002. – 147 с.
37. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в сетях 6 (10) кВ создаются при коммутации как вакуумными, так и элегазовыми выключателями [Текст] / Г.А. Евдокунин, С. Гитенков // Новости электротехники. – 2002. - №5 (17). – С.27 – 29.
38. Жуковский, Ю.Л. Повышение надежности и эффективности систем электроснабжения с автоматическим секционированием на стороне 6 (10) кВ [Текст] / Ю.Л. Жуковский // Автореферат диссертации на соис-

- кание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург. – 2006. – 22с.
39. Закс, Л. Статическое оценивание [Текст] / Пер. с нем. В.Н. Варыгина. Под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. горского // - М.: Статистика. – 1976.
40. Зимин, В.И. Обмотки электрических машин: 7-е издание [Текст] / В.И. Зимин, М. Я. Каплан, М. М. Палей // - Л.: Энергия. - 1975. – 288 с.
41. Каганов, З. Г. Волновые напряжения в электрических машинах [Текст] / З.Г. Каганов // – М.: Энергия 1970. – 209 с.
42. Каталог «Защитные аппараты. Ограничители перенапряжений» [Текст] // - Великие Луки: ЗАО «Завод электрического оборудования». – 2000. – 32с.
43. Каталог ОПН типа ОПН/TEL [Текст] // - М.: РК «Таврида Электрик». – 2007. – 8с.
44. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов // - М.: Высшая школа. – 1987. – 248с.
45. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам [Текст] / Ю.В. Корицкий // - Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – 728с.
46. Котлярчук, В.А. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутации сетевых двигателей экскаваторов вакуумными выключателями. Отчет о НИР (промежут.) [Текст] / КИЦМ; Руководитель В. А. Котлярчук. – Красноярск, 1975. – 85 с.: ил.
47. Кузнецов, Д.В. К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена [Текст] / Д.В.Кузнецов, Ю.С. Попов, Ф.Х. Халилов, Н.А. Шилина // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. - №3. – С. 30 – 34.
48. Кузнецов, Н.Д. Перенапряжения при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями [Текст] / Н.Д. Кузнецов, И.Л. Дегтярев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции // – Новосибирск. – 2002. – С.142 – 146.

49. Кузьмин, Р.С. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников [Текст] / Р.С. Кузьмин, В.В. Павлов, Р.А. Майнагашев, И.С. Зыков, В.В. Дементьев // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №2. – С. 31 – 33.
50. Кузьмин, Р.С. Совершенствование методов и средств снижения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6-35 кВ промышленных предприятий [Текст] / Р.С. Кузьмин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006.
51. Кузьмин, С.В. Анализ аварийности в системе электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири [Текст] / С.В. Кузьмин, И.С. Зыков, Р.А. майнагашев, К.П. Ящук // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - №3. – С. 23 – 25.
52. Кузьмин, С.В. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10кВ угольных разрезов [Текст] / С.В. Кузьмин, А.И. Кожин // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции // – Новосибирск. – 2002. – С.283 – 287.
53. Кузьмин, С.В. Влияние кабельной линии на ограничение коммутационных перенапряжений [Текст] / С.В. Кузьмин, Д.В. Барышников // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции // Красноярск. – 2007. – С/ 297 – 303.
54. Кузьмин, С.В. Проблемы перенапряжений при использовании вакуумных коммутационных аппаратов [Текст] / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, Б.С. Заварыкин, И.В. Краснова // Сборник материалов международной научно-практической конференции: "Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота". ГОУ ВПО "ГУЦМиЗ". – Красноярск. – 2006. – С.283 – 287.
55. Кузьмичева, К.И. ограничение перенапряжений при отключении вакуумными выключателями пусковых токов электродвигателей с помо-

- щью ОПН [Текст] / К.И. Кузьмичева, В.Н. Подьячев, И.Л. Шлейфман // Электростанции. – 1996. - №4.
56. Куликовский, В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями [Текст] / В.С. Куликовский // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2002. – 26с.
57. Куликовский, В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями [Текст] / В.С. Куликовский // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2002.
58. Лайбль, Т. Теория синхронной машины при переходных процессах [Текст] / Т. Лайбль // - М.: Л.: Госэнергоиздат. 1957. – 126 с.
59. Леман, Э. Теория точечного оценивания [Текст] / Э. Леман // - М.: Наука. – 1991.
60. Лютер, Р.А. Расчет синхронных машин [Текст] / Р.А. Лютер // - Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние. – 1979. – 272 с.: ил.
61. Ляхомский, А.В. Электрификация горного производства [Текст] / А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, Н.И. Чеботаев, В.И. Щуцкий и др. // Учебник для вузов: В 2 т. / Под ред. Л.А. Пучкова, Г.Г. Пивняка. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2007.
62. Меньшиков В.А. Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6 (10) кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению [Текст] / В.А. Меньшиков // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2006.
63. Мнухин, А.Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений [Текст] / А.Г. Мнухин, Б.И. Коневский // – М.: Недра. – 1987. – 143 с.

64. Немцов, М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности [Текст] / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев // - М.: Энергоиздат. – 1981. – 136 с.
65. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сети 6 - 35 кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции [Текст] // Под ред. К.П. Кадомской и др. – Новосибирск. – 2002. – 200с.
66. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сети 6 - 35 кВ: Труды третьей Всероссийской научно-технической конференции [Текст] // Под ред. К.П. Кадомской и др. – Новосибирск. – 2004.
67. Попов, Ю.Н. Исследование коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей карьерных экскаваторов вакуумным выключателем [Текст] / Ю.Н. Попов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 1986.
68. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [Текст] // - М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
69. Правила устройства электроустановок. Издание 7 [Текст] // - М.: НЦ ЭНАС. 2004.
70. Разгильдеев, Г.И. Эксплуатация вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий [Текст] / Г.И. Разгильдеев, В.В. Курехин В.В. // – М.: Недра. – 1988. – 102 с.: ил.
71. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме [Текст] / В.И. Раховский // – М.: Наука. – 1970. – 536.: ил.
72. Рыбкин, В.А. Определение волновых параметров и коммутационных перенапряжений при отключении вакуумным выключателем двигателя 6 кВ [Текст] / В.А. Рыбкин, С.С. Чубрик, В.Н. Помыткин // Промышленная энергетика. – 1977. – №11. – С. 41 – 44.
73. Самойлович, И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров [Текст] / И.С. Самойлович // – М.: "Недра". – 1976. – 175 с.
74. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий [Текст] / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, Б.М. Ягудаев // – М.: Наука. – 1985.

75. Скакунов, Д.А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 - 6 кВ нефтеперерабатывающих предприятий [Текст] / Д.А. Скакунов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 2010г.
76. Справочник по электрическим машинам: В 2т. [Текст] / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова // - М.: Энергоатомиздат. 1988. – 456 с.: ил.
77. Справочник энергетика карьера [Текст] / В.А. Голубев, П.П. Мирошкин, Н.М. Шадрин. Под ред. В.А. Голубева // - М.: Недра. – 1986. – 420 с.
78. Филиппов, В.И. Внедрение вакуумных выключателей на экскаваторах [Текст] / В.И. Филиппов // Сборник материалов первой научной конференции по проблемам одноковшовых экскаваторов «Электропривод одноковшовых экскаваторов». – Свердловск. – 1972. – С.294.
79. Филиппов, В.И. Исследования и пути повышения надежности систем распределения электрической энергии на разрезах Канско–Ачинского бассейна [Текст] / В.И. Филиппов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск. – 1972.
80. Фишман, В. Способы заземления нейтрали в сетях 6 - 35 кВ. Точка зрения проектировщика [Текст] / В.Фишман // Новости электротехники. – 2008.- №2(50).
81. Чистяков, Г.Н. Экспериментальные исследования на синтетической модели импульсных перенапряжений при коммутации вакуумного выключателя [Текст] / Г.Н. Чистяков // Промышленная энергетика. – 2003. – №12.
82. Шабунов, В.А. Разработка схем испытаний выключателей в режиме отключения двигателей высокого напряжения [Текст] / В.А. Шабунов // Электротехн. пром-сть. Сер. аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1984. – вып. 6 (152). - С.12 – 16.
83. Щуцкий, В.И. Защита от замыканий на землю в сетях приисков перенапряжением 6 кВ [Текст] / В.И. Щуцкий, А.А. Буралков, В.С. Смир-

- нов, С.В. Кузьмин, В.М. Соломенцев // - М.: ЦНИИцветмет экономики и информатики. – 1990. – 52.
84. Эпштейн, И.Я. Перспективы применения вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий Севера [Текст] / И.Я. Эпштейн // Сборник материалов технической конференции «Проблемы промышленного развития северных районов Красноярского края». - Красноярск. – 1971. – С.125.
85. Эпштейн, И.Я. Применение вакуумных выключателей в электрических сетях 6 кВ угольных разрезов [Текст] / И.Я. Эпштейн // Сборник материалов технической конференции «Надежность электроснабжения угольных разрезов». – Красноярск. – 1971. – С.133.
86. Юу, К.У. Моделирование на цифровых ЭВМ процесса неявного среза тока в вакуумных выключателях [Текст] / К.У. Юу, Дж. П. Бикфорд // *Elektric power Applications*. – 1979. – №4. – С.125 – 131.
87. Headley A. Meeting system requirements with modern switchgear [Текст] // *Proceedings IEEE Symp. On trends in modern switchgear design 3,3 – 150 kV/*. – Newcastle. – 1984. – pp.9.1 – 9.5.
88. Interruption of small inductive currents: Chapter 5: Switching of transformers [Текст] / Part2. *Electra*. – 1991. - №134. – p.29 – 34.
89. Matsui, Y. Reignition current interruption characteristics of the vacuum interrupters [Текст] / Y. Matsui, T. Yokoyama, E. Umeya // *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol.3. – 1988. - № 4. – p. 1672 – 1677.
90. Working group paper: Interruption of small inductive currents (chapter 1, 2) [Текст] // *Electra*. – 1980. - №72. – pp.73 – 103.
91. Yokokura, K. Multiple restriking voltage effect in a vacuum circuit breaker on motor insulation / K. Yokokura, S. Masuda, H. Nishikava // “*IEEE Trans. on PAS*” Vol PAS-100. – 1981. - №4.

Приложение 1

Таблица П.1.1 – Результаты статистической обработки коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженных синхронных электродвигателей электромагнитными и элегазовыми выключателями

Объект		Результаты исследований				
		X	D	S	V	k _{max}
1		2	3	4	5	6
1. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; P=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АВВг 6 - (3x95); L=35М		2,78	1,306	1,143	0,411	5,1
K(Zi)	2,1; 2,2; 2,8; 3,1; 2,6; 3,4; 3,7; 3,6; 1,9; 5,1; 1,5; 1,2; 1,6; 1,8; 5,1; 2,1; 4,6; 3,5; 3,5; 4,7; 3,1; 2,1; 2,8; 1,9; 1,5; 2,2; 5,1; 2,5; 2,0; 3,8; 3,3; 2,0; 1,6; 1,8; 1,6					
2. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДПК2-18-41-16-УХЛЗ; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип ка- бельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=42М		2,45	1,360	1,166	0,476	4,3
K(Zi)	2,6; 1,7; 2,8; 1,7; 3,1; 2,5; 2,2; 4,3; 1,9; 0,8; 1,8; 4,2; 1,3; 1,2; 2,3; 0,9; 2,2; 1,2; 4,3; 4,0; 3,4; 3,4; 4,2; 4,2; 0,8; 1,7; 0,9; 1,9; 2,4; 1,2; 1,9; 2,8; 1,8; 4,2; 4,0					
3. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабель- ной линии: СБГ 6 - (3x120); L=40М		2,1	0,370	0,604	2,093	3,0
K(Zi)	1,9; 1,4; 1,3; 1,9; 1,6; 1,8; 2,6; 2,1; 2,8; 1,4; 3,0; 2,2; 1,4; 1,6; 1,9; 2,1; 3,0; 1,6; 1,9; 3,0; 1,5; 1,6; 1,9; 1,7; 3,0; 3,0; 3,0; 1,5					
4. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; P=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x95); L=40М		1,93	0,411	0,641	0,332	3,0
K(Zi)	2,0; 1,5; 1,7; 2,2; 1,2; 3,0; 1,1; 1,0; 2,7; 0,9; 1,8; 2,2; 2,0; 2,9; 1,1; 1,8; 1,4; 2,6; 1,3; 1,7; 3,0; 2,3; 2,4; 1,8; 2,1; 2,6; 2,7; 1,1					
5. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: СДПК2-18-41-16-УХЛЗ; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип ка- бельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=45М		1,63	0,269	0,544	0,334	2,5
K(Zi)	1,7; 1,9; 1,4; 1,4; 1,7; 1,2; 1,0; 2,5; 1,2; 0,8; 2,4; 2,5; 2,0; 1,1; 2,1; 2,3; 1,0; 1,0; 1,9; 2,0; 1,5; 1,7; 2,0; 0,8; 2,3; 0,9					

Продолжение таблицы П.1.1

1		2	3	4	5	6
6. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/12/3,5; тип двигателя: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x120); L=35М		1,3	0,212	0,460	0,275	1,7
K(Zi)	0,9; 1,1; 1,7; 1,6; 1,3; 1,4; 1,4; 1,1; 1,2; 1,6; 1,4; 1,6; 1,1; 1,1; 1,0; 1,6; 1,4; 0,9; 1,7; 0,9; 1,1; 1,1; 1,6; 1,1; 1,7; 1,5; 1,1					
7. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; P=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x95); L=120М		1,29	0,060	0,245	0,189	1,7
K(Zi)	1,2; 1,7; 1,3; 0,9; 1,3; 1,4; 1,7; 1,1; 1,1; 1,4; 1,3; 1,2; 1,7; 1,2; 1,1; 1,6; 1,3; 1,1; 1,3; 1,4; 1,1; 1,7; 1,2; 0,8; 1,1; 1,4					
8. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДПК2-18-41-16-УХЛ3; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип ка- бельной линии: АСБ 6 - (3x95); L=150М		2,23	0,425	0,648	0,291	3,3
K(Zi)	2,1; 2,2; 2,3; 2,1; 1,7; 3,2; 1,6; 3,3; 1,4; 1,3; 1,4; 3,2; 1,8; 1,5; 2,5; 2,6; 2,0; 1,4; 3,3; 1,9; 1,2; 2,7; 3,3; 2,5; 2,8; 2,8; 1,9; 2,1; 2,6; 2,3					
9. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x120); L=150М		1,04	0,019	0,138	0,133	1,4
K(Zi)	0,9; 1,0; 1,1; 0,8; 1,1; 1,1; 1,2; 0,9; 1,0; 1,1; 1,4; 1,2; 1,0; 1,0; 1,1; 1,1; 0,9; 0,8; 1,2; 1,2; 1,1; 0,8; 0,9; 1,2; 1,0; 1,0					
10. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: FРX074016; тип двигателя: СДПК2-18-41-16-УХЛ3; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип ка- бельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=40М		2,39	1,100	1,049	0,438	4,3
K(Zi)	3,3; 2,3; 2,4; 3,2; 1,7; 1,0; 1,6; 4,3; 1,5; 1,0; 2,6; 1,4; 2,4; 4,3; 3,5; 3,4; 3,6; 3,2; 4,3; 3,4; 0,8; 1,9; 1,4; 2,1; 2,2; 1,4; 1,7; 3,0; 1,6; 1,4					
11. ОАО «КрАЗ»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; P=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x95); L=240М		2,78	1,091	1,04	0,374	4,3
K(Zi)	1,9; 1,8; 2,1; 3,1; 4,3; 3,5; 2,7; 1,3; 1,9; 3,1; 3,3; 4,1; 4,3; 1,1; 3,9; 2,9; 2,3; 1,9; 2,1; 1,8; 1,3; 3,7; 4,3; 1,4; 3,1; 2,6; 3,9; 4,1					

Продолжение таблицы П.1.1

1		2	3	4	5	6
12. ОАО «АГК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; Р=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3x95); L=248М		2,78	1,032	1,01	0,363	4,3
К(Zi)	2,4; 2,3; 3,2; 2,8; 3,1; 3,1; 4,0; 3,7; 2,1; 4,1; 1,8; 1,1; 1,5; 1,0; 4,1; 2,7; 2,3; 4,0; 3,6; 4,3; 3,5; 2,4; 2,8; 1,7; 1,7; 2,3; 3,5					
13. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: FРX074016; тип двигателя: СДК2-17-26-12-КТ4; Р=630 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3x95); L=231М		2,76	1,020	1,01	0,366	4,2
К(Zi)	1,4; 2,3; 1,0; 3,1; 2,9; 4,2; 3,1; 2,8; 3,9; 2,9; 1,7; 2,3; 3,1; 2,5; 3,3; 4,2; 3,5; 4,1; 2,9; 2,8; 3,8; 1,7; 0,8; 2,4; 1,1; 4,0					
14. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: СДПК2-18-41-16-УХЛ3; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип ка- бельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=145М		0,88	0,095	0,3	0,341	1,3
К(Zi)	0,9; 1,0; 1,2; 1,2; 0,9; 0,6; 0,5; 1,3; 0,6; 0,4; 1,2; 1,3; 1,0; 0,6; 1,1; 1,2; 0,5; 0,5; 1,0; 1,0; 0,8; 0,9; 1,0; 0,4; 1,2; 0,5					
15. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/12/3,5; тип двигателя: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; Р=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабель- ной линии: СБГ 6 - (3x120); L=135М		0,8	0,034	0,185	0,230	1,1
К(Zi)	1,1; 1,0; 0,9; 0,8; 0,6; 0,7; 0,7; 1,1; 0,6; 0,8; 0,7; 0,8; 1,1; 0,6; 1,0; 0,8; 0,7; 1,1; 0,9; 1,0; 0,6; 0,6; 0,8; 0,6; 0,9; 0,7; 0,5					

Таблица П.1.2 – Результаты статистической обработки коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженных асинхронных электродвигателей электромагнитными и элегазовыми выключателями

Объект		Результаты исследований				
		X	D	S	V	k _{max}
1		2	3	4	5	6
1. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: BAO2-560L-2У2-5; P=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3х95); L=40м		2,92	1,362	1,167	0,399	5,0
K(Zi)	1,9; 1,9; 2,4; 2,7; 2,7; 3,1; 3,1; 1,4; 3,9; 3,6; 1,1; 5,0; 4,0; 4,1; 3,9; 1,5; 1,9; 2,3; 2,5; 3,5; 5,0; 3,9; 2,6; 4,5; 3,1; 2,9; 1,5; 1,8; 2,6; 2,1; 1,4; 4,1; 4,2; 1,1; 5,0					
2. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: АКДЭ-10-62-10У2; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3х95); L=38м		2,47	1,102	1,052	0,425	4,3
K(Zi)	1,7; 1,6; 2,5; 2,8; 0,8; 4,3; 2,2; 2,3; 3,4; 1,9; 3,6; 0,9; 0,8; 2,5; 4,3; 1,9; 3,6; 1,8; 2,7; 4,3; 1,9; 1,6; 2,1; 3,4; 2,9; 4,2; 2,0; 4,2; 1,9; 2,0; 1,3; 3,2; 1,8; 1,6					
3. ОАО «АГК»: тип выключателя: : VF 12.08.16 ; тип двигателя: АДО; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3х120); L=42м		2,29	0,389	0,624	0,272	3,2
K(Zi)	1,9; 2,7; 1,5; 3,2; 1,4; 1,8; 2,1; 2,3; 1,1; 3,2; 1,9; 2,9; 2,8; 2,0; 3,1; 1,5; 2,8; 3,0; 1,7; 1,9; 2,2; 2,4; 3,2; 2,9; 1,9; 2,6; 1,9					
4. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: BAO2-560L-2У2-5; P=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3х95); L=45м		1,81	0,411	0,64	0,354	2,8
K(Zi)	1,2; 1,1; 2,1; 1,7; 1,5; 2,2; 2,8; 2,5; 2,7; 0,8; 1,0; 2,1; 1,7; 2,6; 2,8; 0,7; 1,7; 1,4; 1,9; 2,1; 2,6; 1,3; 2,7; 1,1; 0,8; 2,1; 2,2; 1,4					
5. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: АКДЭ-10-62-10У2; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3х95); L=45м		1,64	0,299	0,55	0,335	2,5
K(Zi)	1,9; 1,5; 1,8; 1,0; 1,2; 2,5; 2,0; 2,1; 1,0; 1,9; 1,5; 2,0; 2,3; 0,8; 0,9; 1,6; 2,1; 1,1; 2,3; 1,1; 2,4; 0,8; 2,5; 1,2; 1,4; 1,7					

Продолжение таблицы П.1.2

1		2	3	4	5	6
6. ОАО «АГК»: тип выключателя: ВЭМ-10Э-1000/12,5 ; тип двигателя: АДО; Р=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x120); L=43м		1,5	0,183	0,42	0,280	2,1
K(Zi)	1,3; 1,2; 1,5; 1,6; 1,9; 1,4; 1,9; 1,0; 2,1; 2,0; 0,8; 0,9; 2,1; 1,4; 1,2; 1,9; 1,5; 1,9; 1,6; 2,0; 1,1; 1,0; 2,1; 0,8; 1,4; 1,5					
7. ОАО «АГК»: тип выключателя: ВЭМ-10Э-1000/12,5 ; тип двигателя: АДО; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x120); L=78м		1,21	0,039	0,20	0,165	1,5
K(Zi)	1,1; 1,6; 1,0; 1,4; 1,2; 1,2; 1,3; 1,4; 0,9; 1,1; 1,2; 1,0; 1,6; 0,9; 1,3; 1,4; 1,1; 1,5; 1,2; 0,8; 1,3; 1,2; 1,2; 1,4; 1,0					
8. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: BAO2-560L-2Y2-5; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной ли- нии: СБГ 6 - (3x95); L=45м		2,94	1,376	1,173	0,400	5,0
K(Zi)	1,7; 2,1; 2,1; 2,9; 3,0; 2,4; 3,5; 5,0; 3,4; 4,0; 1,6; 3,5; 1,5; 4,8; 1,3; 4,8; 1,8; 2,3; 2,6; 3,3; 3,3; 3,1; 1,9; 5,0; 4,1; 1,3					
9. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип двигателя: BAO2-560L-2Y2-5; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной ли- нии: АСБ 6 - (3x95); L=320м		2,9	0,446	0,668	0,230	3,9
K(Zi)	3,2; 1,4; 2,9; 2,8; 3,2; 2,6; 3,7; 3,6; 3,3; 1,9; 2,7; 3,3; 3,9; 1,7; 2,3; 1,3; 2,3; 3,9; 3,8; 2,8; 3,4; 2,5; 2,7; 3,1; 2,9; 3,2					
10. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: FPX074016; тип двигателя: BAO2-560L-2Y2-5; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной ли- нии: СБГ 6 - (3x95); L=320м		2,20	0,789	0,89	0,404	3,9
K(Zi)	2,3; 1,5; 2,1; 2,3; 2,4; 2,1; 2,8; 1,7; 3,9; 2,6; 2,1; 3,7; 1,3; 1,5; 1,2; 1,1; 1,5; 1,3; 2,1; 3,1; 3,9; 3,6; 2,3; 1,2; 2,8; 0,9					
11. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: FPX074016; тип двигателя: АКДЭ-10-62-10У2; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=138м		1,48	0,393	0,62	0,419	2,4
K(Zi)	1,2; 1,1; 1,7; 2,2; 0,5; 0,8; 1,4; 1,5; 2,3; 2,3; 2,4; 0,6; 0,5; 1,7; 0,9; 1,3; 2,4; 1,9; 1,8; 0,7; 1,3; 1,1; 2,0; 2,3; 2,3; 0,8; 0,6; 0,8; 1,3; 1,3; 1,5; 2,1; 1,9; 1,7					

Продолжение таблицы П.1.2

1		2	3	4	5	6
12. ОАО «АГК»: тип выключателя: : FPX074016; тип двигателя: АДО; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3x120); L=142м		1,26	0,262	0,51	0,405	2,0
K(Zi)	1,3; 1,8; 1,0; 0,6; 0,9; 1,2; 1,3; 1,5; 0,7; 0,6; 1,3; 2,0; 1,9; 0,7; 1,0; 1,9; 0,7; 1,2; 1,3; 1,4; 1,6; 0,6; 2,0; 1,3; 1,7; 1,3					
13. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: ВАО2-560L-2У2-5; P=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной ли- нии: СБГ 6 - (3x95); L=145м		1,21	0,194	0,44	0,366	1,9
K(Zi)	0,8; 0,7; 1,3; 1,2; 1,0; 1,4; 1,9; 1,7; 1,8; 0,5; 0,6; 1,3; 1,2; 1,7; 1,9; 0,4; 1,2; 0,9; 1,3; 1,3; 1,7; 0,8; 1,8; 0,7; 1,3; 1,4; 0,9					
14. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: WMSWZ/PI-10/6/6,3; тип двигателя: АКДЭ-10-62-10У2; P=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x95); L=245		0,60	0,056	0,25	0,412	1,1
K(Zi)	0,8; 0,6; 0,7; 0,4; 0,4; 0,8; 0,9; 0,4; 0,8; 0,6; 0,8; 0,9; 0,3; 0,3; 0,6; 0,9; 0,4; 0,9; 0,4; 1,0; 0,3; 1,1; 0,4; 0,5; 0,7					
15. ОАО «АГК»: тип выключателя: : ВЭМ-10Э-1000/12,5 ; тип двигателя: АДО; P=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x120); L=243м		0,71	0,044	0,21	0,294	1,0
K(Zi)	0,6; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,7; 0,9; 0,5; 1,0; 0,9; 0,3; 0,4; 1,0; 0,7; 0,6; 0,9; 0,7; 0,9; 0,8; 0,9; 0,5; 0,5; 1,0; 0,3; 0,7; 0,7					

Таблица П.1.3 – Результаты статистической обработки коммутационных перенапряжений при отключении масляных трансформаторов в режиме холостого хода электромагнитными и элегазовыми выключателями

Объект		Результаты исследований				
		X	D	S	V	k _{max}
1		2	3	4	5	6
1. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=35 м		2,63	0,65	0,809	0,308	4,0
K(Zi)	2,7; 3,2; 3,6; 3,3; 3,7; 1,8; 2,2; 2,4; 2,5; 2,9; 1,9; 1,8; 1,6; 1,7; 4,0; 2,9; 2,4; 2,2; 1,6; 1,8; 4,0; 2,7; 3,3; 2,4; 1,9; 4,0; 1,3; 3,1; 3,5; 2,3; 1,9; 3,3; 1,8; 4,0; 2,3					
2. ОАО «АГК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=42м		2,36	0,337	0,580	0,246	3,3
K(Zi)	2,5; 2,1; 3,3; 2,0; 2,1; 2,6; 2,7; 3,3; 2,4; 3,0; 2,2; 1,8; 1,6; 1,4; 2,7; 1,2; 2,8; 1,6; 2,4; 2,7; 1,6; 2,5; 1,8; 3,3; 3,0; 2,0; 3,1; 2,4; 2,9; 1,4; 2,3; 2,6; 2,2; 2,2; 3,0					
3. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=40 м		2,19	0,399	0,632	0,288	3,1
K(Zi)	3,1; 1,3; 1,6; 2,3; 1,9; 3,1; 2,4; 1,6; 1,9; 1,7; 2,8; 2,6; 1,3; 1,2; 3,1; 2,4; 2,7; 1,2; 2,3; 2,8; 1,3; 1,9; 2,2; 3,0; 2,4; 2,7; 2,8; 1,8					
4. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=40 м		1,56	0,086	0,293	0,188	2,0
K(Zi)	2,0; 1,8; 1,6; 1,8; 1,5; 2,0; 1,3; 1,2; 1,6; 1,1; 1,4; 1,1; 1,6; 1,9; 1,3; 1,4; 1,7; 1,5; 1,5; 2,0; 2,0; 1,2; 1,3; 1,6					
5. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТМ-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=45 м		1,18	0,026	0,163	0,138	1,4
K(Zi)	0,9; 1,3; 1,2; 1,4; 1,4; 1,2; 1,1; 1,3; 1,4; 0,9; 1,2; 1,1; 1,3; 1,2; 1,2; 1,1; 1,2; 0,9; 1,4; 1,1; 1,3; 1,2; 0,9; 1,3; 1,2; 0,9; 1,2					
6. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=35 м		0,96	0,04	0,2	0,209	1,2
K(Zi)	0,6; 0,8; 1,2; 1,2; 1,0; 1,1; 0,9; 0,8; 0,9; 1,2; 1,1; 1,2; 0,8; 0,8; 0,8; 1,2; 1,1; 0,6; 1,2; 0,7; 0,8; 0,8; 1,1; 0,8; 1,2; 1,1; 0,9					

Продолжение таблицы П.1.3

1		2	3	4	5	6
7. ОАО «АГК»: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=120м		1,15	0,031	0,177	0,154	1,4
K(Zi)	1,4; 1,3; 0,9; 1,1; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,3; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,2; 1,4; 1,2; 1,1; 1,3; 1,1; 0,9; 1,4; 1,2; 1,0; 1,0; 1,3; 0,9					
8. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=120 м		1,57	0,108	0,328	0,209	1,9
K(Zi)	1,1; 1,0; 1,1; 0,9; 1,7; 1,9; 1,8; 1,9; 1,8; 1,6; 1,7; 1,4; 1,3; 1,9; 1,3; 1,6; 1,6; 1,8; 1,6; 1,6; 1,4; 1,6; 1,9; 1,3; 1,7; 1,8; 1,7; 1,1; 1,6; 1,2					
9. ОАО «КрАЗ»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=150 м		1,29	0,058	0,242	0,187	1,8
K(Zi)	1,0; 1,2; 1,3; 0,9; 1,3; 1,3; 1,4; 1,0; 1,1; 1,3; 1,6; 1,4; 1,1; 1,2; 1,3; 1,3; 1,0; 1,8; 1,4; 1,4; 1,3; 1,8; 1,0; 1,4; 1,7; 1,1					
10. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=40 м		2,34	0,347	0,589	0,251	3,3
K(Zi)	2,4; 2,8; 2,9; 3,0; 2,1; 3,3; 1,9; 1,6; 1,9; 1,2; 1,4; 1,8; 3,3; 3,3; 3,0; 2,7; 2,7; 2,6; 2,4; 2,4; 3,0; 2,3; 1,8; 2,5; 2,7; 1,7; 2,0; 1,9; 1,9; 1,8					
11. ОАО «АГК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=40 м		2,95	0,454	0,974	0,228	4,0
K(Zi)	2,4; 2,3; 2,7; 3,7; 2,9; 2,7; 3,4; 3,6; 2,4; 3,7; 2,6; 3,5; 2,1; 4,0; 2,4; 3,6; 2,1; 2,4; 2,7; 2,3; 4,0; 3,7; 2,9; 4,0; 3,0; 3,2; 1,6; 3,8					
12. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3x70); L=48 м		2,94	0,318	0,564	0,192	3,6
K(Zi)	3,2; 2,8; 3,3; 3,5; 3,3; 3,4; 3,6; 2,7; 3,2; 3,6; 2,5; 1,4; 1,9; 3,3; 2,6; 3,3; 2,8; 2,5; 2,8; 2,1; 2,9; 3,0; 3,5; 2,2; 2,2; 2,8; 2,9; 3,6					
13. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТМ-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: ААБ 6 - (3x70); L=31 м		2,96	0,665	0,815	0,275	4,0
K(Zi)	1,8; 2,8; 1,3; 3,3; 2,3; 3,7; 2,2; 3,6; 3,2; 3,7; 2,2; 2,9; 1,7; 3,2; 4,0; 3,7; 2,7; 3,5; 3,6; 3,5; 1,6; 2,1; 4,0; 3,1; 4,0; 3,3					

Таблица П.1.4 – Результаты статистической обработки коммутационных перенапряжений при отключении сухих трансформаторов в режиме холостого хода электромагнитными и элегазовыми выключателями

Объект		Результаты исследований				
		X	D	S	V	k _{max}
1		2	3	4	5	6
1. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=40 М		2,46	1,258	1,122	0,407	4,3
K(Zi)	2,4; 2,4; 3,0; 3,4; 3,4; 3,8; 3,9; 1,8; 4,3; 4,2; 1,3; 4,3; 1,2; 1,4; 1,1; 1,9; 2,4; 2,8; 3,1; 4,2; 4,2; 4,3; 3,2; 1,9; 3,9; 3,6; 1,9; 2,3; 3,2; 4,3; 1,8; 1,3; 1,6; 1,4; 1,3					
2. ОАО «АГК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=38М		2,52	0,603	0,776	0,308	3,6
K(Zi)	2,0; 1,9; 3,0; 3,6; 1,9; 1,6; 2,7; 2,7; 3,3; 3,3; 3,5; 1,1; 3,6; 3,0; 1,8; 2,3; 2,7; 3,4; 3,2; 1,3; 2,3; 1,9; 2,1; 3,3; 2,6; 1,4; 1,1; 1,6; 2,3; 2,4; 2,7; 3,5; 3,4; 3,2					
3. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=42 м		2,24	0,446	0,668	0,298	3,4
K(Zi)	2,2; 3,4; 1,8; 1,1; 1,6; 2,2; 2,4; 2,7; 1,3; 1,8; 2,3; 1,7; 3,1; 2,4; 3,4; 1,8; 2,6; 1,3; 2,0; 2,2; 2,6; 2,8; 1,0; 2,5; 2,2; 3,0; 3,1					
4. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТС-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=45 М		1,76	0,197	0,444	0,252	2,4
K(Zi)	1,5; 1,3; 2,4; 2,1; 1,8; 1,8; 1,7; 2,2; 1,6; 1,0; 1,2; 1,8; 2,1; 2,4; 1,8; 0,9; 2,1; 2,3; 1,7; 2,3; 1,6; 1,7; 1,3; 1,0; 1,8; 2,4; 1,7					
5. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТС-630; S = 630 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=45 М		1,37	0,052	0,228	0,166	1,7
K(Zi)	1,7; 1,6; 1,3; 1,2; 1,4; 1,3; 1,6; 1,6; 1,2; 1,4; 1,6; 1,7; 1,2; 1,0; 1,1; 1,1; 1,6; 1,3; 1,1; 1,3; 1,2; 1,0; 1,3; 1,5; 1,7; 1,6					
6. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТС-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=43 м		1,18	0,047	0,217	0,184	1,5
K(Zi)	1,5; 1,4; 0,9; 1,1; 1,3; 0,8; 1,4; 1,1; 1,1; 1,5; 0,9; 1,0; 1,1; 1,1; 1,4; 1,3; 0,9; 1,3; 1,1; 1,3; 1,3; 1,2; 1,1; 0,8; 1,5					

Продолжение таблицы П.1.4

1		2	3	4	5	6
7. ОАО «АГК»: тип выключателя: WMWZ/PI-10/6/6,3; тип трансформатора: ТС-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=78м		0,88	0,048	0,218	0,247	1,2
K(Zi)	1,2; 1,1; 0,9; 0,8; 1,0; 1,0; 1,1; 0,9; 1,1; 0,5; 0,6; 1,2; 1,1; 1,1; 0,7; 0,9; 0,5; 1,0; 0,7; 1,0; 0,7; 0,7; 0,6; 0,8					
8. Ангарский нефтеперерабатывающий завод: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=150 м		1,99	0,307	0,554	0,279	2,6
K(Zi)	2,2; 2,6; 2,5; 2,0; 2,1; 2,5; 1,9; 1,3; 1,8; 2,5; 2,0; 1,0; 1,9; 1,0; 2,6; 1,0; 2,3; 2,1; 2,4; 1,7; 2,6; 2,3; 2,4; 1,1; 1,3; 2,6					
9. ОАО «КрАЗ»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АСБ 6 - (3x70); L=320 м		1,41	0,118	0,344	0,244	1,9
K(Zi)	1,3; 1,8; 1,1; 1,9; 1,6; 1,7; 1,2; 1,2; 1,7; 1,6; 1,3; 0,8; 1,6; 0,9; 1,7; 1,3; 1,9; 1,1; 1,4; 1,9; 1,3; 1,9; 0,9; 1,0; 1,1; 1,4					
10. ОАО «АНПЗ ВНК»: тип выключателя: VF 12.08.16; тип трансформатора: ТС-250; S = 250 кВА; тип кабельной линии: АВВг 6 - (3x70); L=320 м		1,47	0,084	0,289	0,196	1,9
K(Zi)	1,2; 1,9; 1,8; 1,3; 1,4; 1,8; 1,0; 1,3; 1,6; 1,6; 1,8; 1,9; 1,5; 1,6; 1,0; 1,6; 1,4; 1,6; 1,0; 1,4; 1,6; 1,2; 1,2; 1,6; 1,9; 1,1					

Таблица П.1.5 – Результаты статистической обработки влияния высших гармоник тока на коммутационные перенапряжения

Объект		Результаты исследований					
		X	D	S	V	k_{\max}	$K_{J_{\max}}$, %
1		2	3	4	5	6	7
1. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=40 м		2,35	0,50	0,709	0,302	3,4	2
K(Zi)	1,2; 1,6; 1,8; 2,7; 2,3; 2,5; 2,8; 1,9; 2,2; 2,0; 3,4; 3,1; 1,6; 1,4; 1,3; 2,9; 3,3; 1,4; 2,7; 3,4; 1,5; 2,2; 2,6; 2,4; 2,8; 3,3; 3,4; 2,1						
2. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=32 м		2,4	0,55	0,739	0,306	3,5	11
K(Zi)	1,6; 2,5; 1,4; 1,6; 2,1; 1,9; 3,0; 3,4; 1,4; 2,8; 2,7; 3,5; 3,4; 2,9; 1,2; 1,6; 2,9; 2,3; 3,5; 2,6; 2,2; 2,9; 2,3; 3,5; 1,4; 3,2; 2,0; 1,4; 3,2; 2,0; 2,4						
3. ОАО «КрАЗ»: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=45 м		2,5	0,57	0,755	0,302	3,6	19
K(Zi)	1,5; 3,1; 1,7; 2,9; 2,7; 1,5; 3,6; 2,3; 1,3; 1,9; 2,4; 3,0; 2,3; 3,3; 2,6; 3,5; 2,2; 3,6; 3,0; 2,8; 1,6; 2,9; 3,5; 1,4; 1,7; 3,6; 2,1; 2,0						
4. Братский алюминиевый завод: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=35 м		2,8	0,70	0,837	0,300	4,0	28
K(Zi)	2,5; 3,6; 3,1; 1,8; 3,2; 3,9; 1,5; 1,9; 4,0; 2,6; 3,3; 2,7; 2,1; 1,4; 4,0; 3,9; 2,8; 2,6; 4,0; 1,6; 3,4; 1,6; 3,6; 2,4; 2,2; 2,9; 3,2; 1,9; 3,3						
5. Саяногорский алюминиевый завод: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=38 м		3,3	0,83	0,911	0,28	4,6	43
K(Zi)	2,2; 3,7; 3,4; 3,8; 3,0; 4,6; 2,2; 1,8; 4,5; 3,6; 2,0; 3,5; 3,8; 4,6; 2,8; 4,5; 3,2; 3,0; 4,6; 1,9; 4,0; 1,9; 4,2; 2,7; 2,6; 3,4; 3,1; 2,4;						
6. ОАО «КрАЗ»: тип выключателя: ВВТЭ 10-12,5/630; тип трансформатора: ТМ-1000; S = 1000 кВА; тип кабельной линии: СБГ 6 - (3x70); L=40 м		3,2	0,92	0,961	0,301	4,7	77
K(Zi)	2,9; 3,2; 1,9; 2,6; 4,6; 4,0; 4,7; 2,2; 3,3; 2,1; 4,6; 3,9; 3,7; 2,5; 1,8; 3,0; 4,7; 3,9; 3,6; 3,0; 1,7; 2,2; 3,7; 3,5; 2,8; 4,3; 1,9						

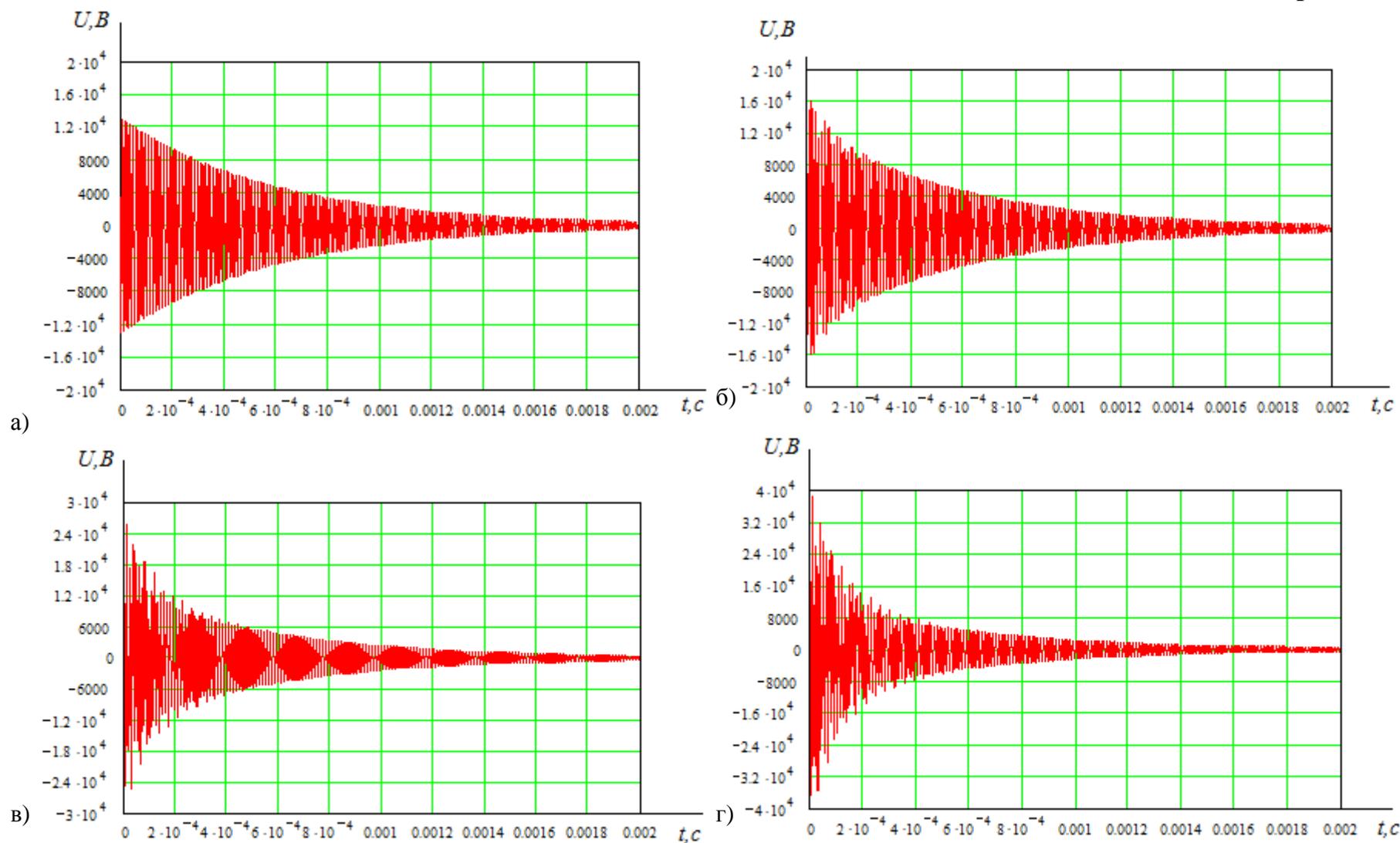


Рисунок П.2.1 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^0$ для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

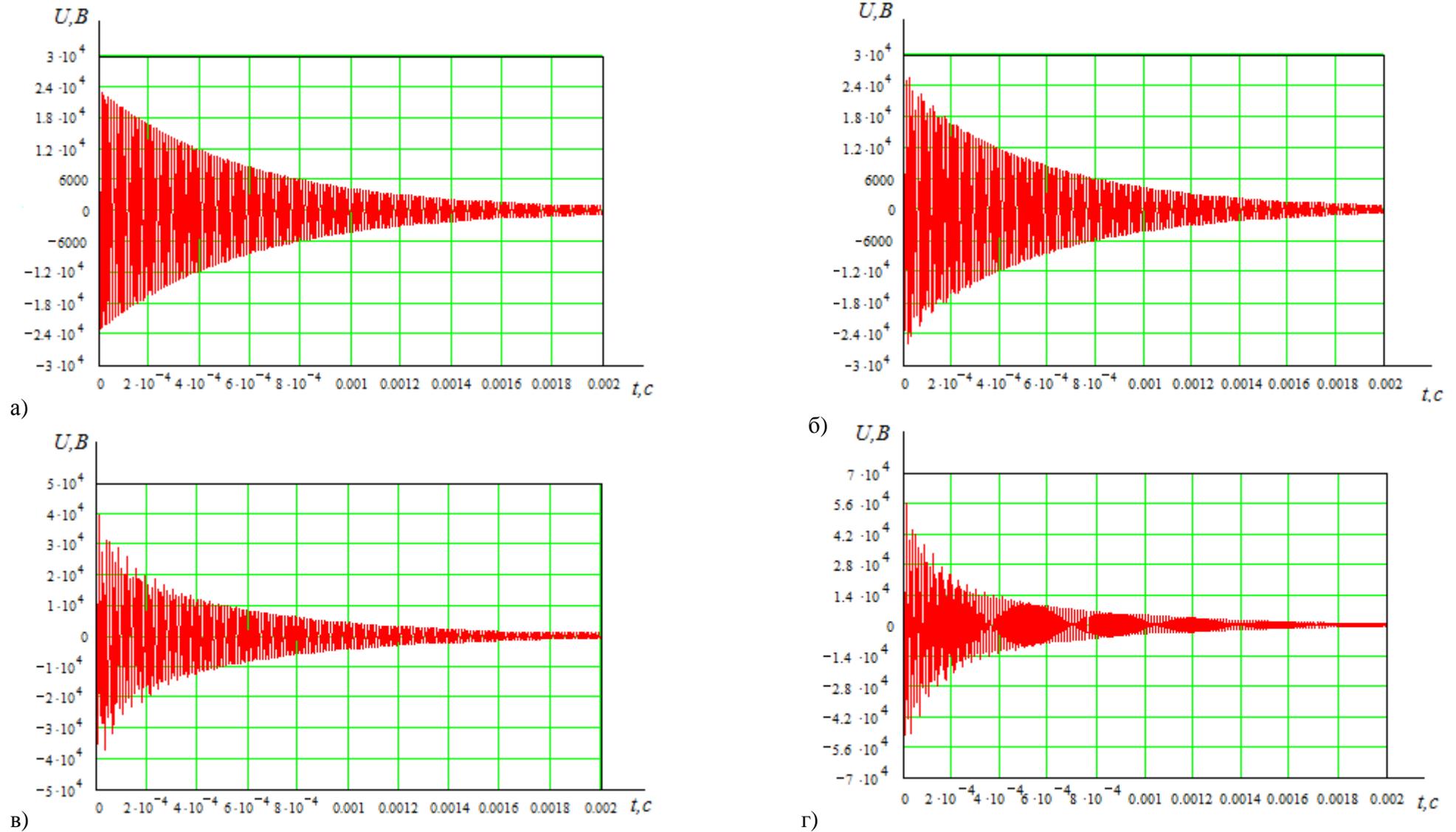


Рисунок П.2.2 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$ для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

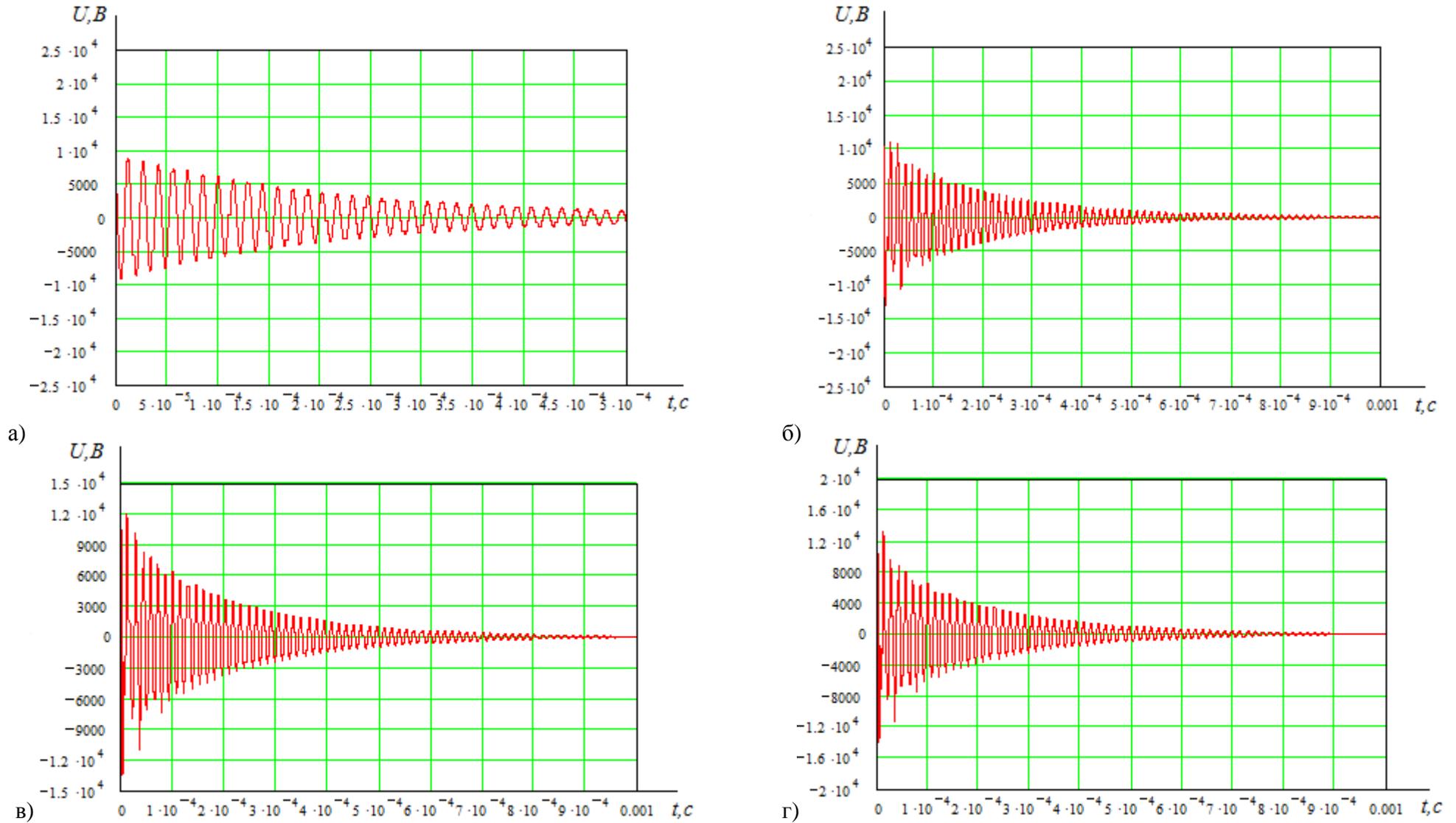


Рисунок П.2.3 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^\circ$ для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

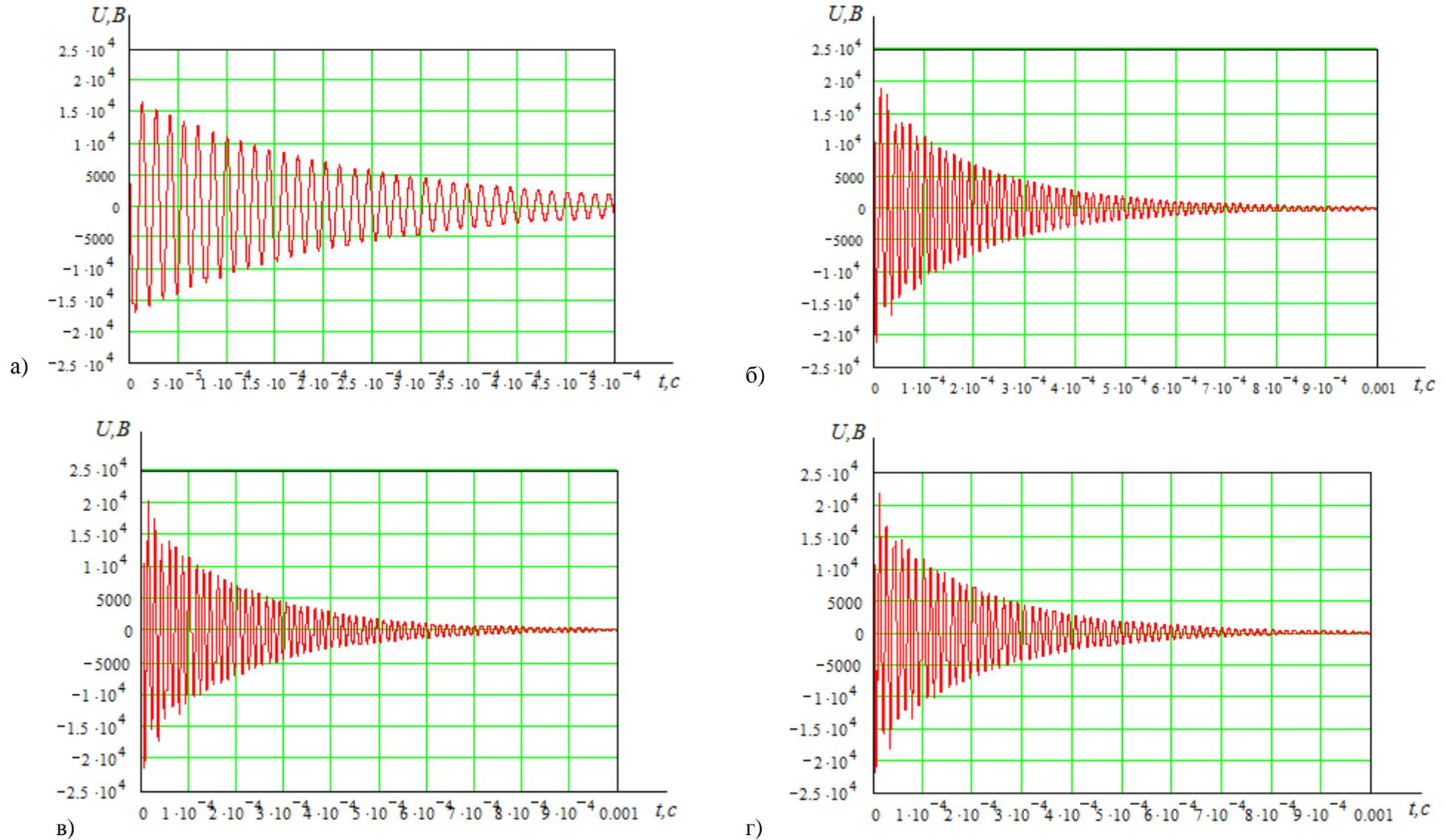


Рисунок П.2.4 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$ для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

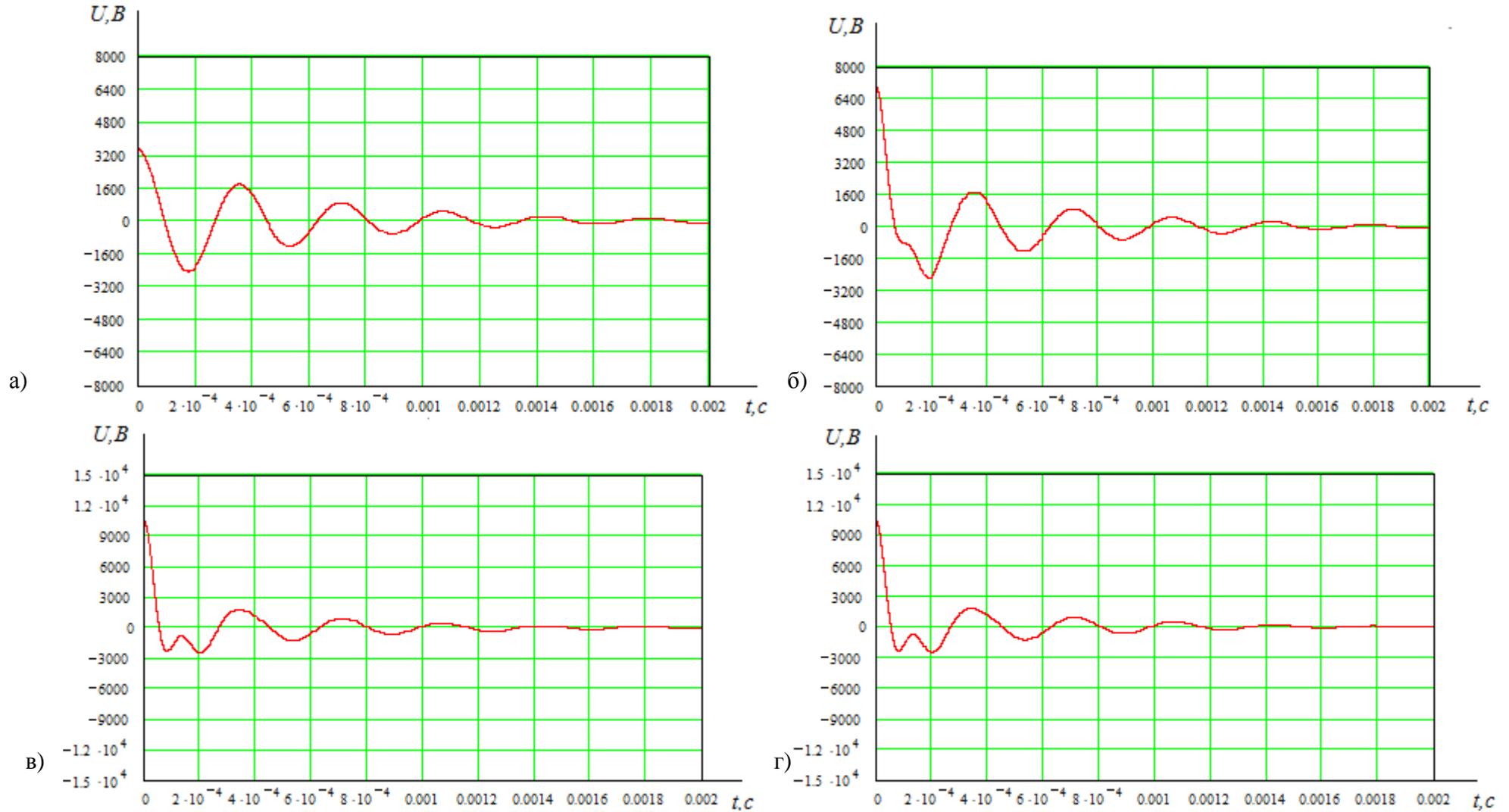


Рисунок П.2.5 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^0$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

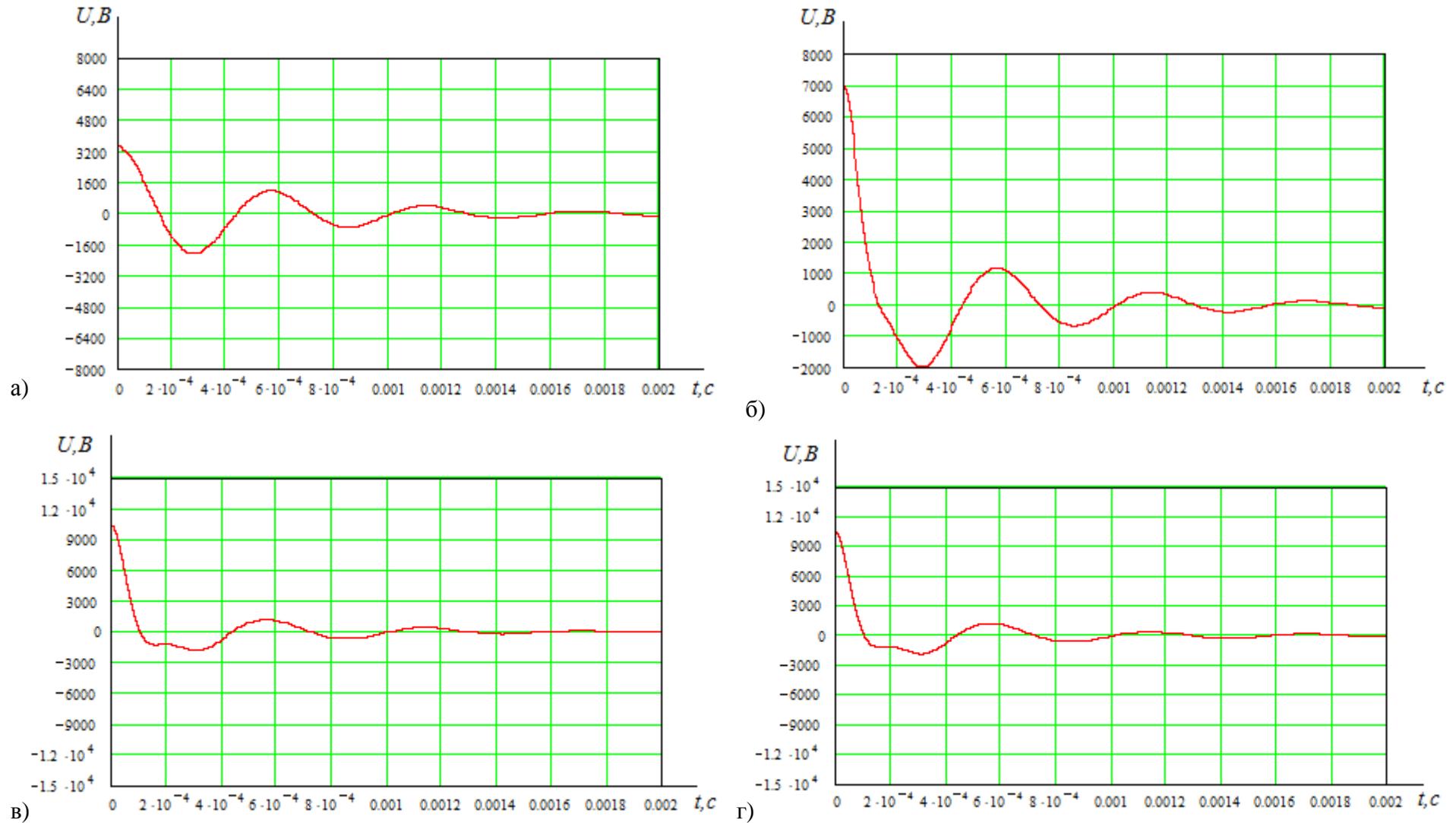


Рисунок П.2.6 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^0$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,25$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

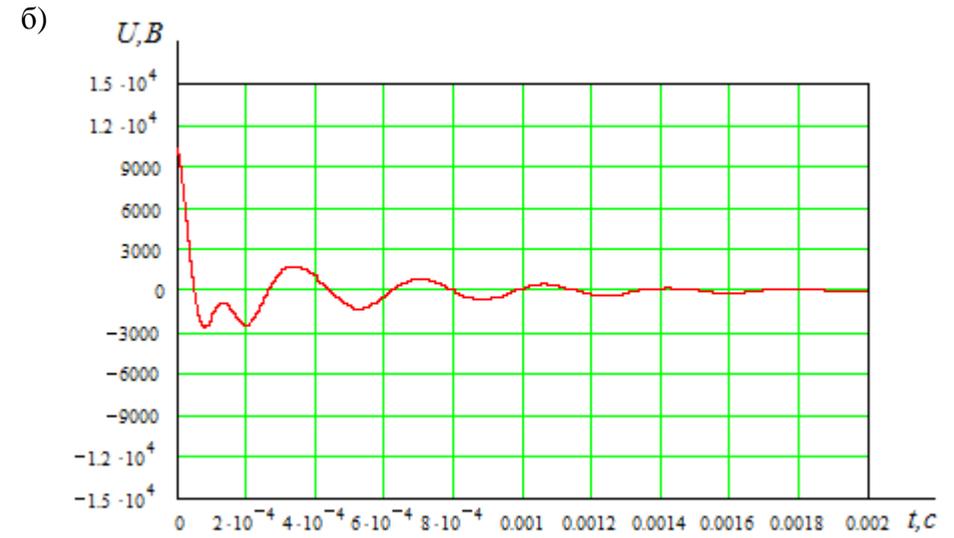
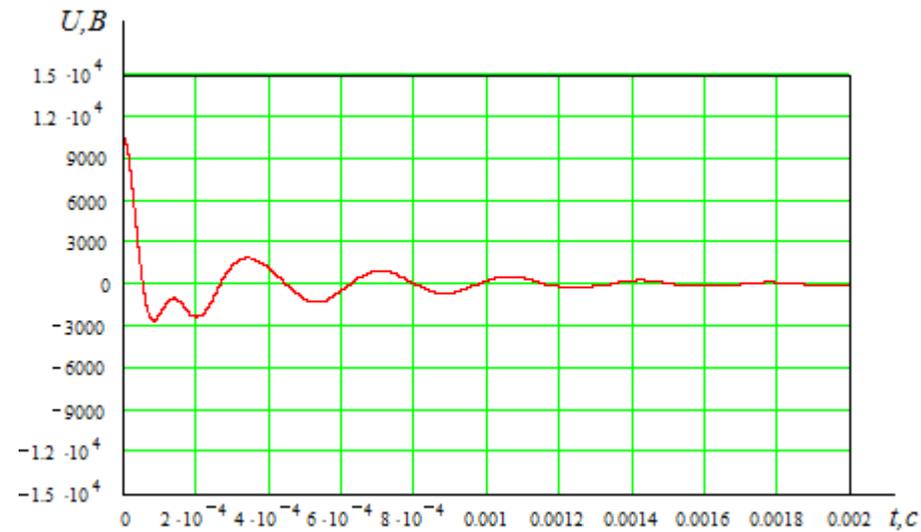
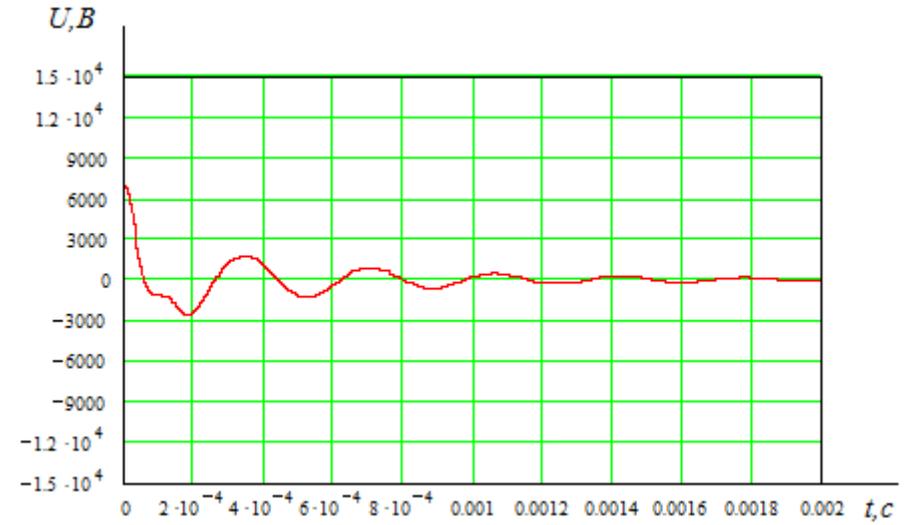
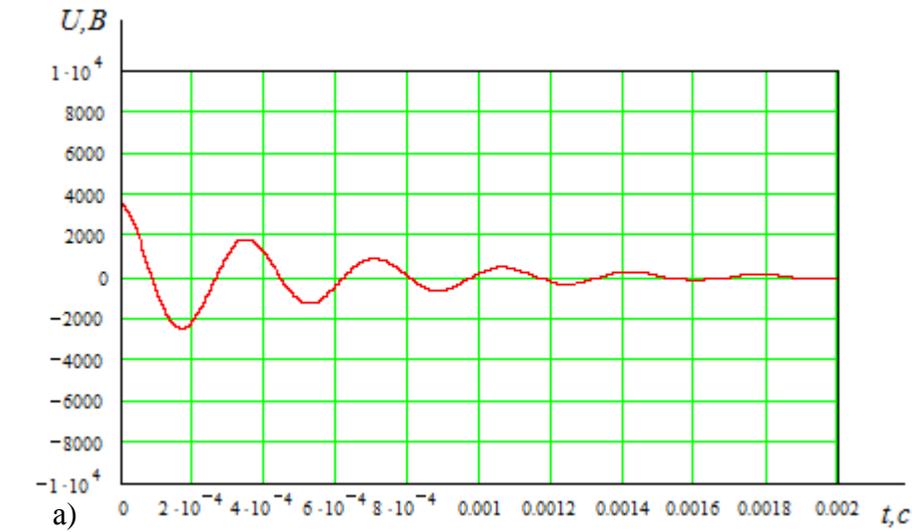


Рисунок П.2.7 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

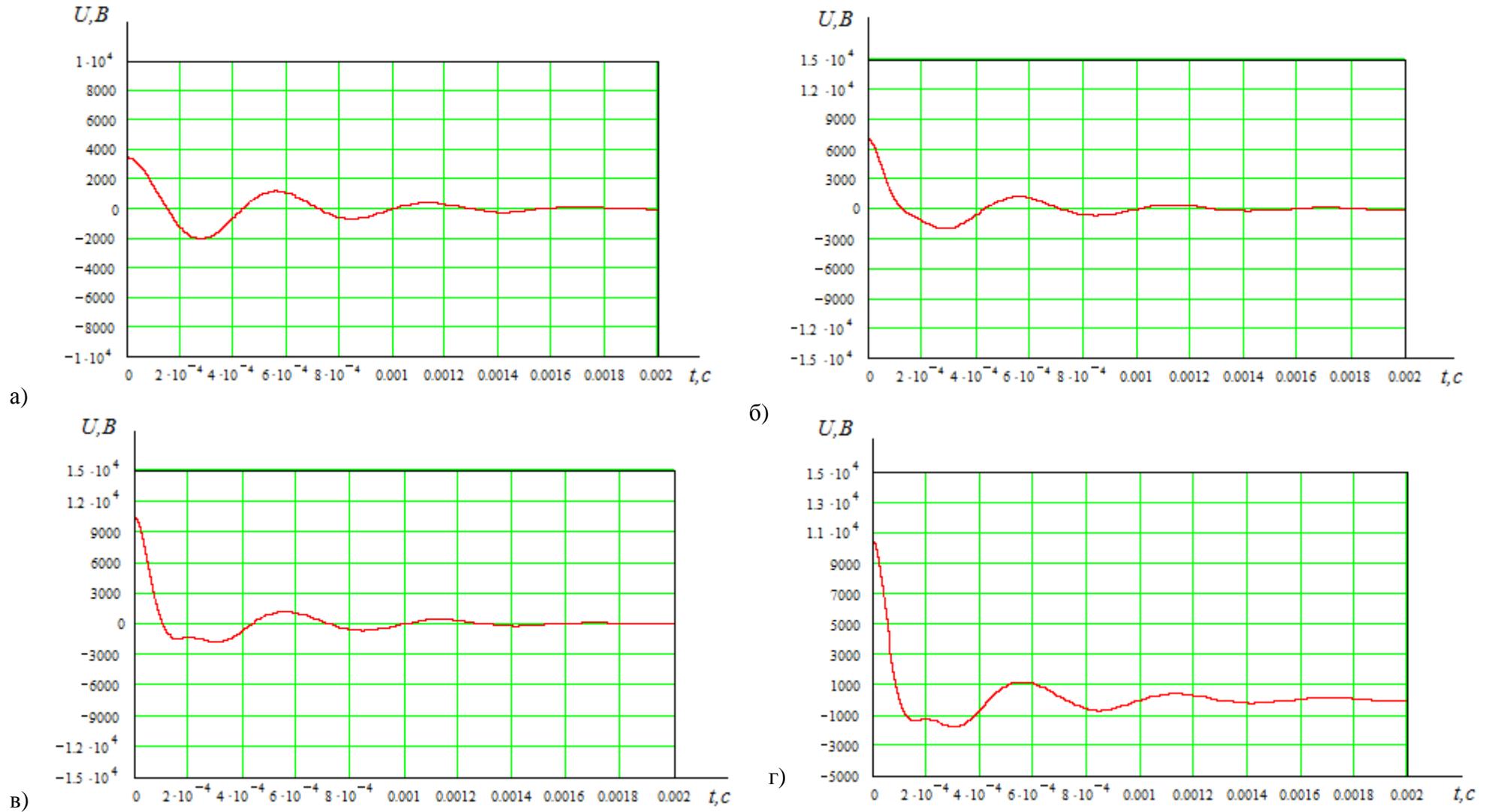


Рисунок П.2.8 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 520 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5 \text{ Ом}$ и $C = 0,25 \text{ мкФ}$, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

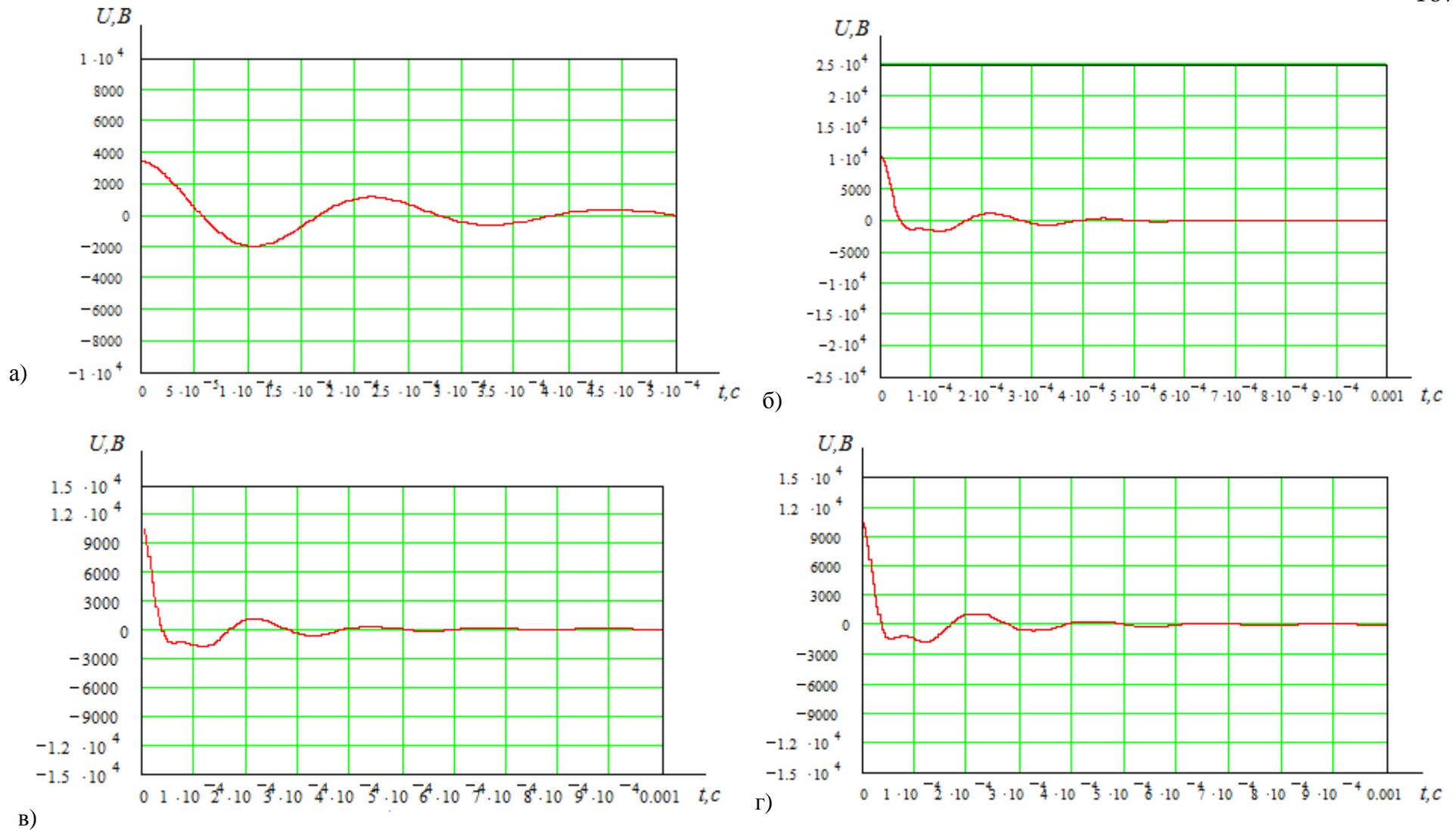


Рисунок П.2.9 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^\circ$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

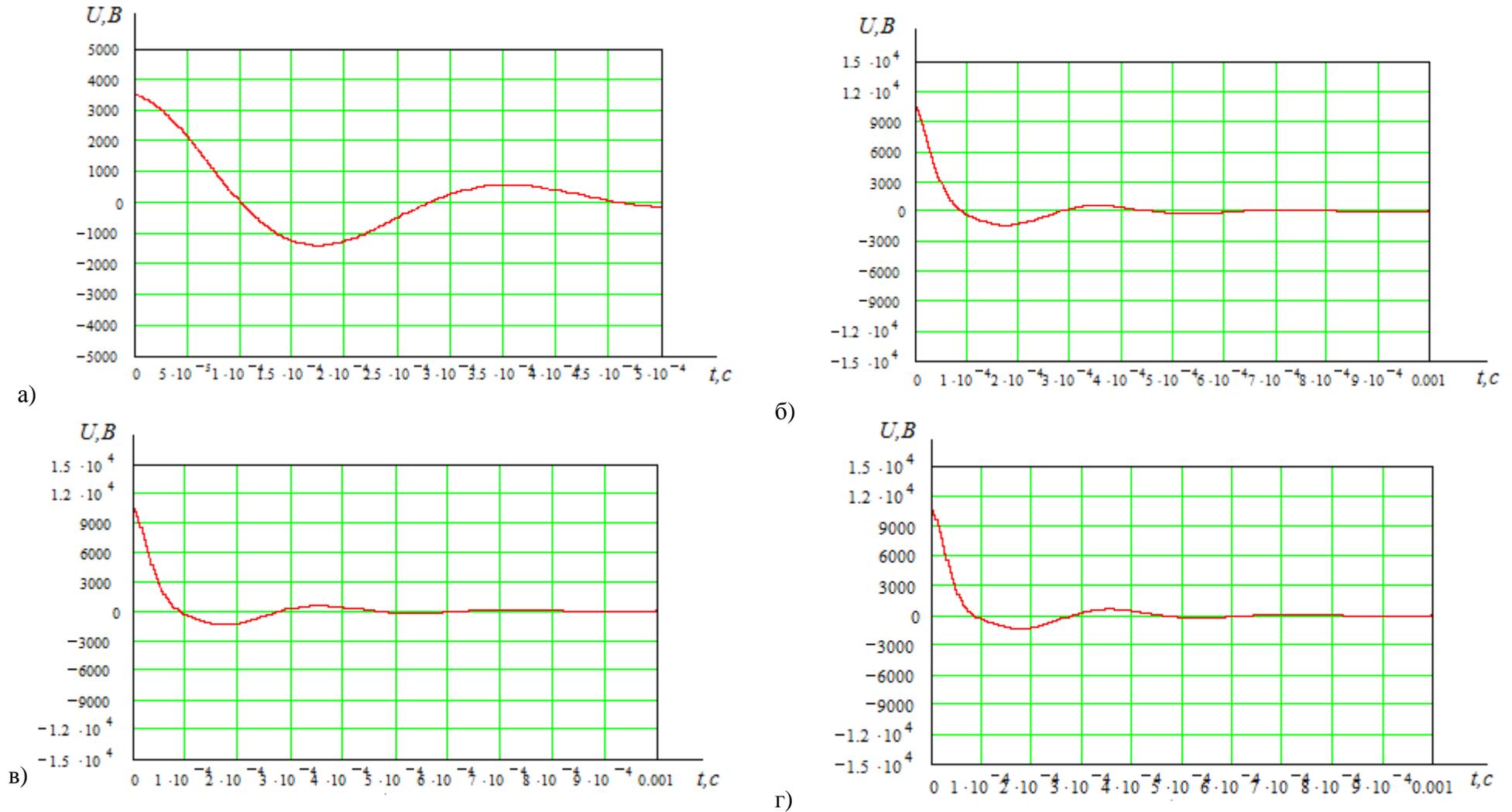


Рисунок П.2.10 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 10^0$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,25$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100$

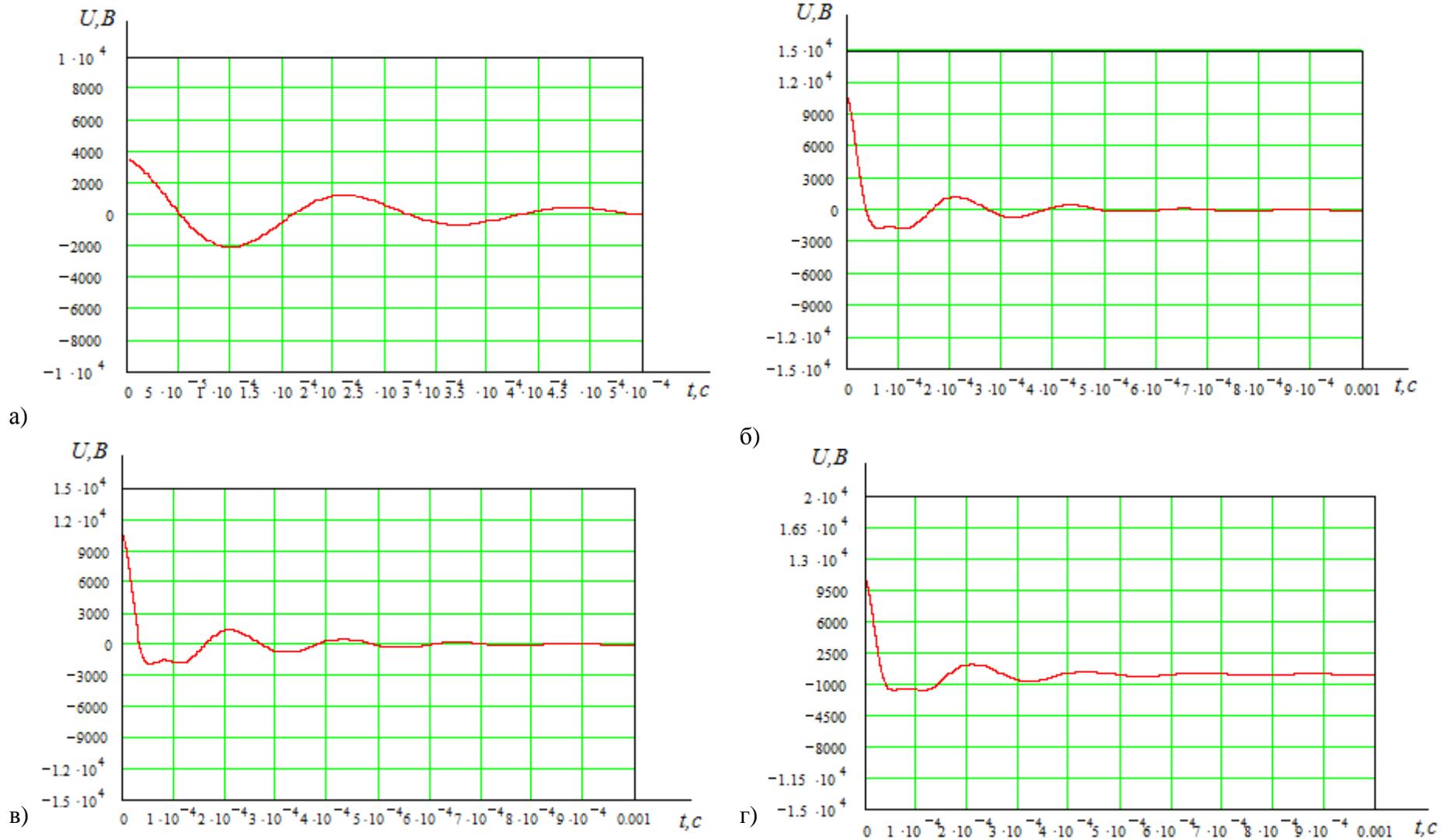


Рисунок П.2.11 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100$

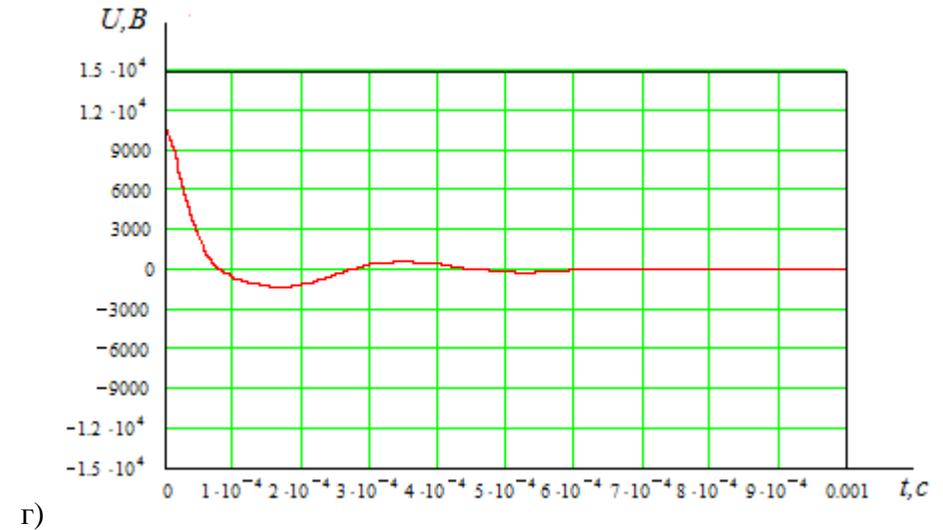
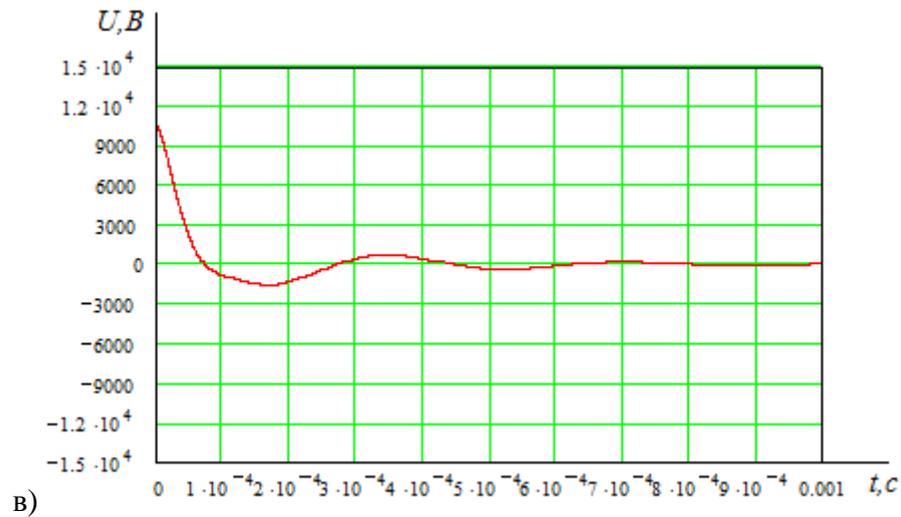
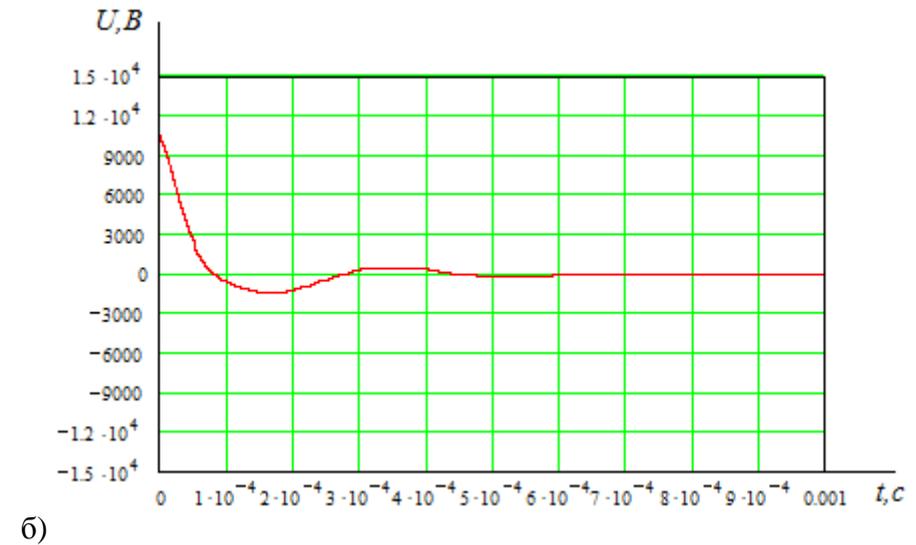
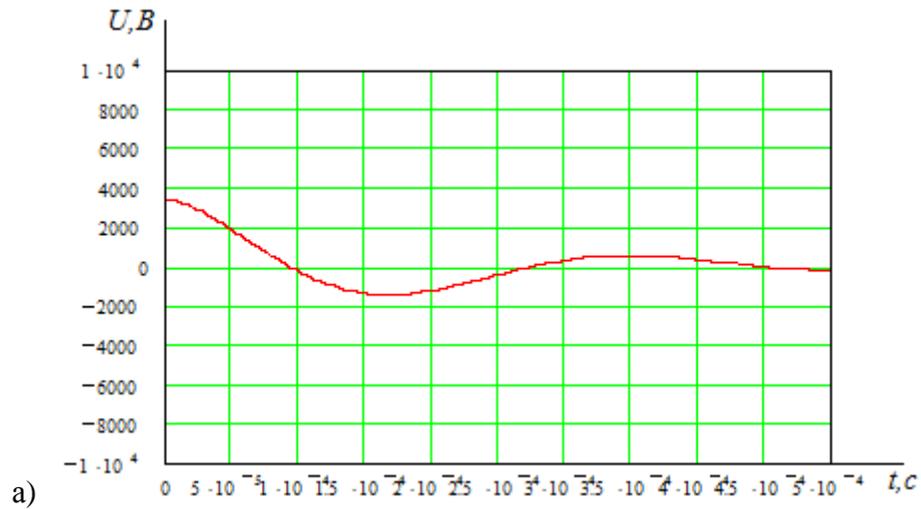


Рисунок П.2.11 – Изменения напряжений на зажимах синхронных электродвигателей мощностью 1250 кВт при угле коммутации $\varphi = 20^\circ$, если в качестве устройства защиты RC-цепи используют RC-цепи с параметрами $R = 12,5$ Ом и $C = 0,25$ мкФ, для различных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой тока: а) $k_J = 0\%$; б) $k_J = 10\%$; в) $k_J = 50\%$; г) $k_J = 100\%$

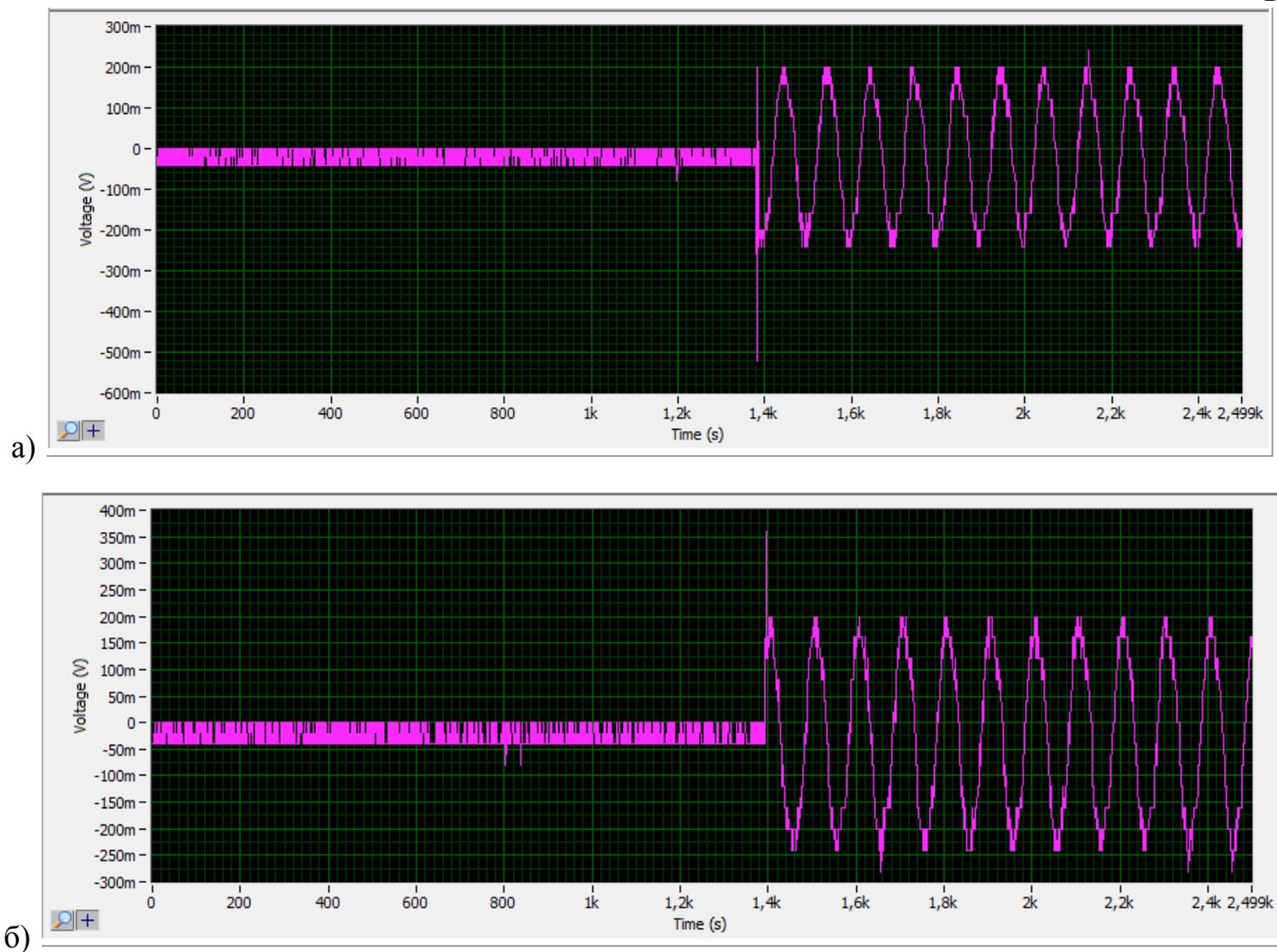


Рисунок П.3.1 – Осциллограммы перенапряжений при включении первого объекта: а) точка К2; б) точка К1

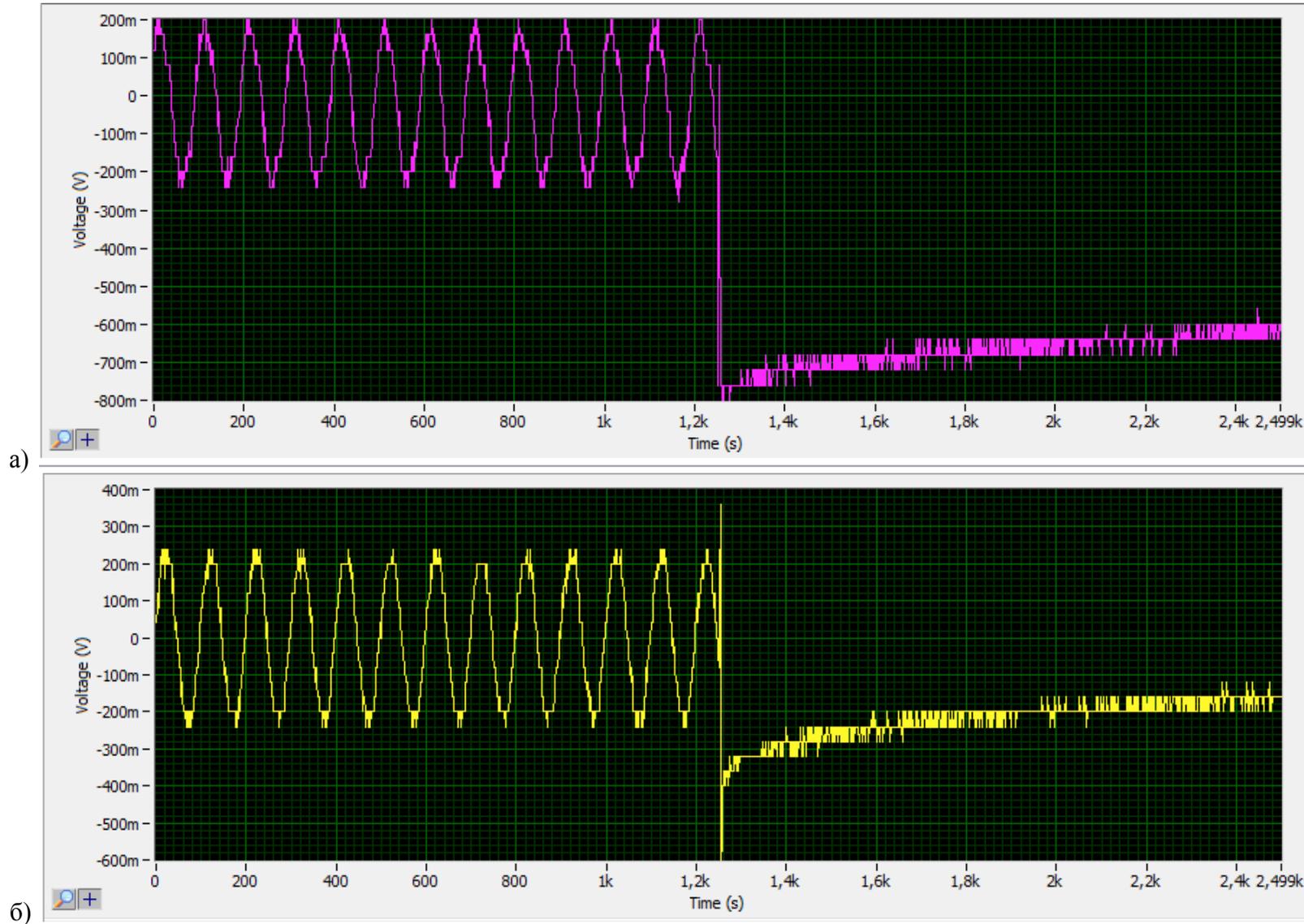


Рисунок П.3.2 – Осциллограммы перенапряжений при отключении первого объекта: а) точка К2; б) точка К1

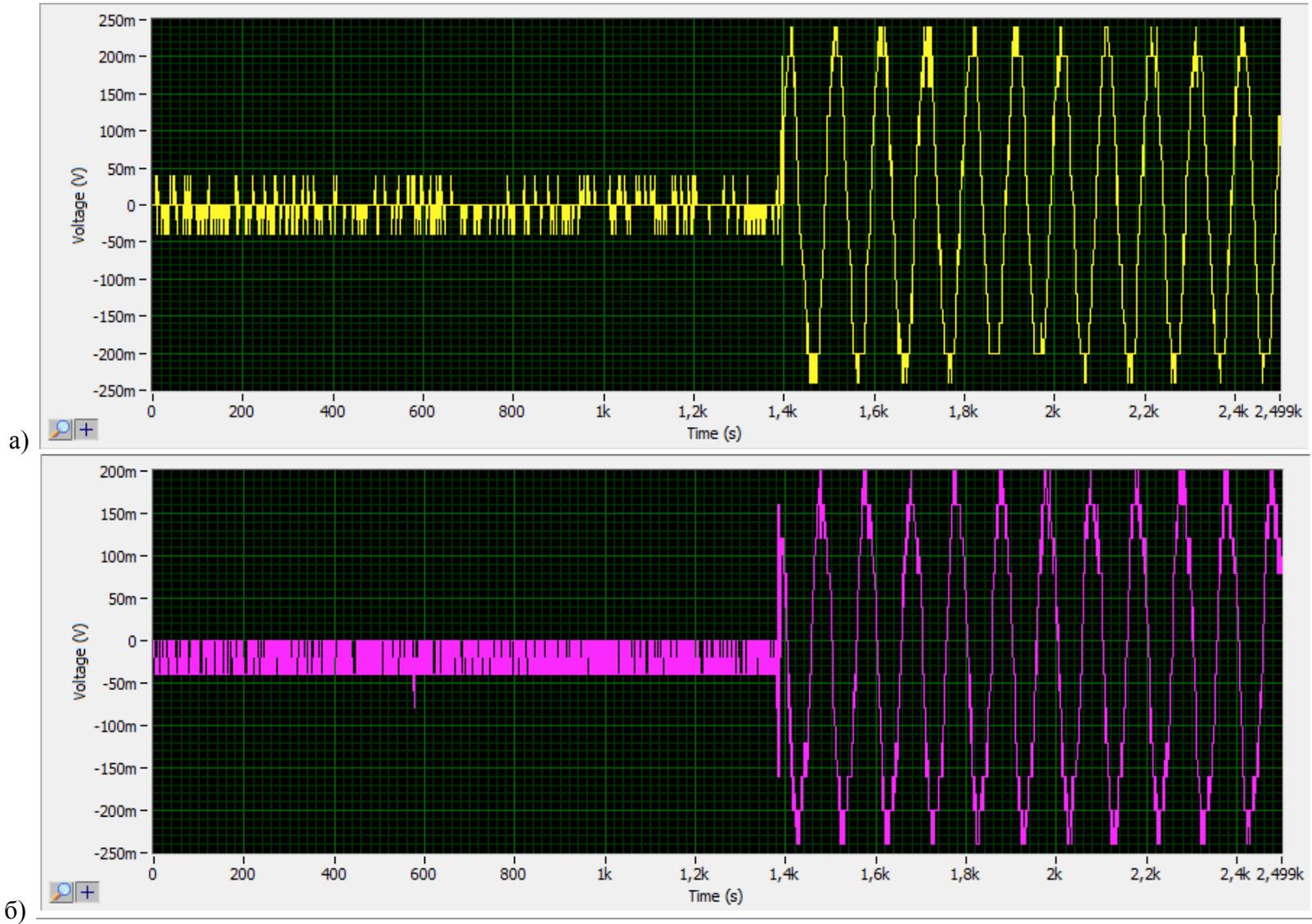


Рисунок П.3.3 – Осциллограммы перенапряжений при включении второго объекта: а) точка К2; б) точка К1

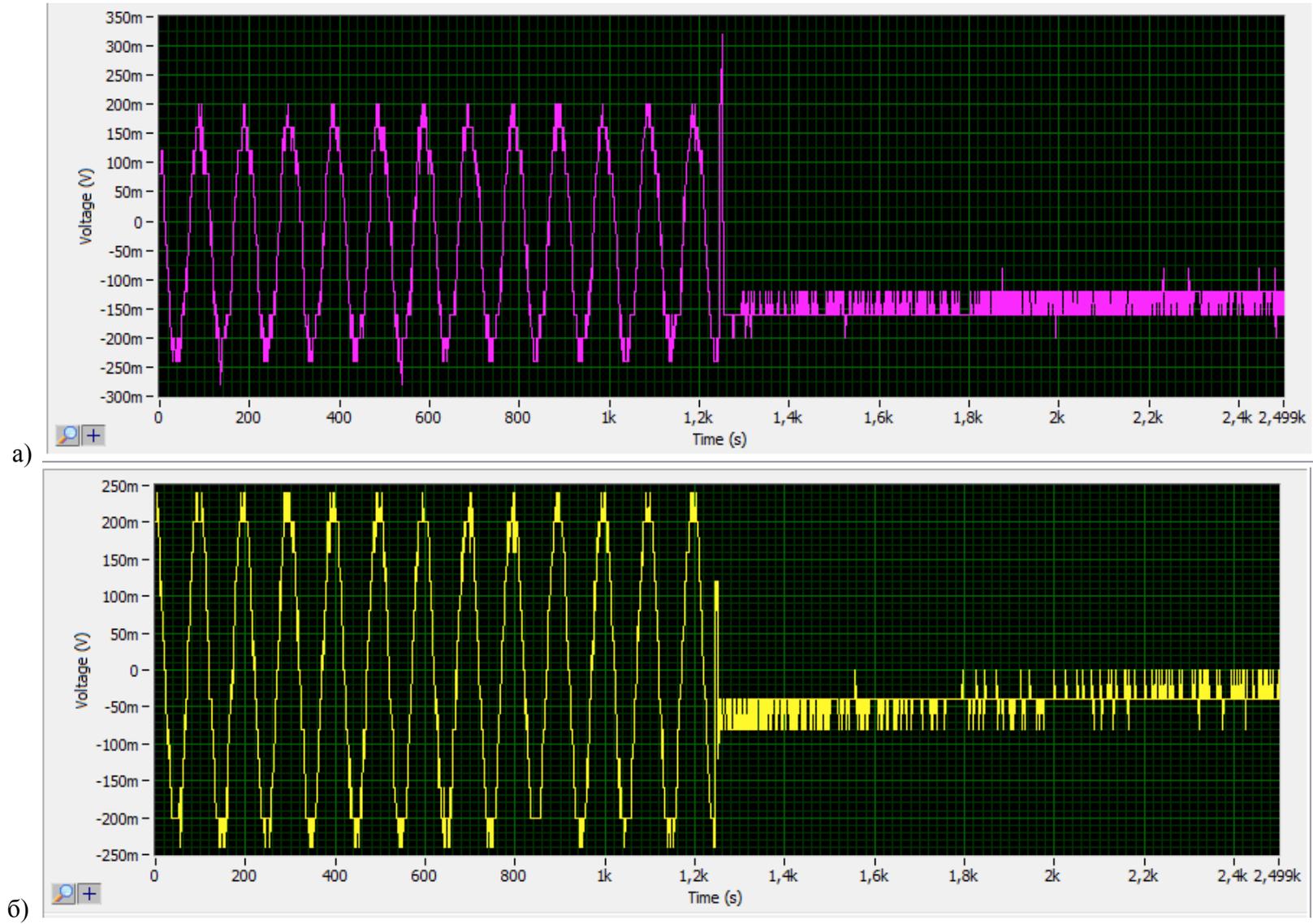


Рисунок П.3.4 – Осциллограммы перенапряжений при отключении второго объекта: а) точка К2; б) точка К1