

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Тихонов Алексей Валерьевич

Обоснование и разработка научно-технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия

2.4.2 - «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – докт. техн. наук, профессор Ляхомский А. В.

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 КВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Обзор исследований по вопросу коммутационных перенапряжений	11
1.2 Анализ динамики и причин аварийности в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия	12
1.3 Анализ существующих средств и устройств защиты от коммутационных перенапряжений	17
1.3.1 Ограничители перенапряжений	17
1.3.2 Резистивно-емкостные ограничители перенапряжений (РС-ограничители)	19
1.3.3 Резистивно-емкостные гасители перенапряжения (РС-гасители)	20
1.3.4 Гасители-компенсаторы ограничения перенапряжений	21
1.4 Обоснование и формулировка задач исследования	21
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ	24
2.1 Исходные положения	24
2.2 Методика экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений	25
2.2.1 Экспериментальные измерения показателей режимов коммутационных перенапряжений	25
2.2.2 Обработка данных показателей режимов коммутационных перенапряжений	28
2.2.3 Анализ экспериментальных данных	32
2.3 Моделирование режимов коммутационных перенапряжений на полунатурной физической установке	33

2.4	Выводы по главе 2	34
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ.....	36
3.1	Характеристика объекта исследования и данные экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений	36
3.2	Статистические характеристики коммутационных перенапряжений	48
3.3	Анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений на наличие «выбросов».....	53
3.4	Анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений на принадлежность к генеральной совокупности	56
3.5	Зависимости коммутационных перенапряжений от тока нагрузки...	58
3.6	Влияние типа коммутации преобразовательного трансформатора на коммутационные перенапряжения	64
3.7	Влияние типа выключателей на перенапряжение при коммутации преобразовательного трансформатора	68
3.8	Влияние высших гармоник тока нагрузки на величину перенапряжений при коммутации преобразовательного трансформатора	71
3.9	Выводы главе 3	76
4	ЗАВИСИМОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИИ	78
4.1	Общие сведения и методика исследований	78
4.2	Анализ гармонического состава токов нагрузки преобразовательного трансформатора	79
4.3	Физические процессы, возникающие при отключении преобразовательного трансформатора от сети 10 кВ при наличии высших гармоник тока	81
4.4	Моделирование режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов в сетях 10 кВ с учетом 5-й и 11-й гармоник.....	83

4.5 Результаты математического моделирования перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора без средств защиты от перенапряжений.....	88
4.6 Результаты математического моделирования перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора со средствами защиты от перенапряжений.....	99
4.7 Выводы по главе 4	104
5 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ РС-ЦЕПЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЯ НОВОКУЗНЕЦКОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА	106
5.1 Общие сведения и установка для физического моделирования	106
5.2 Результаты физического моделирования перенапряжений.....	110
5.3 Результаты опытной эксплуатации устройств типа ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1	113
5.4 Выводы по главе 5	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	122
Приложение 1.....	137
Приложение 2.....	143
Приложение 3.....	146
Приложение 4.....	149
Приложение 5.....	156
Приложение 6.....	159
Приложение 7.....	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. При производстве алюминия используется технология электролиза, питаемая от мощных преобразовательных агрегатов, являющихся частью системы электроснабжения алюминиевых заводов. Особенностью схемы питания электролизеров является наличие нескольких преобразовательных трансформаторов, преобразовательных тиристорных агрегатов, количество которых зависит от количества преобразовательных трансформаторов, шинных разъединителей, кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и жесткой ошиновки.

Схема электроснабжения электролизеров характеризуется высокоамперной нагрузкой с плавным регулированием тока. Из-за высокой мощности и компактного размещения оборудования возникают значительно высокие токи короткого замыкания. Плавное регулирование позволяет равномерно распределять нагрузку по преобразовательным тиристорным агрегатам, но не позволяет снизить коммутационные перенапряжения (КП).

Коммутация тиристорных преобразовательных агрегатов, состоящих из силовых трансформаторов и мощных выпрямительных устройств, совершается быстродействующими вакуумными и элегазовыми выключателями. Коммутация указанных трансформаторов сопровождается появлением перенапряжений, величина которых может в два и более раза превышать номинальное напряжение сети.

Перенапряжения указанной величины вызывают риск аварийного пробоя изоляции обмоток преобразовательного трансформатора. Данное утверждение основано на изучении сетей 10 кВ предприятий электролизного производства при возникновении дефектов [119].

Изученные дефекты [17, 19, 21, 49, 51, 87, 99, 101, 103] дают полагать, что в начальный момент замыканий одной фазы на землю (ОЗЗ) в сетях 10 кВ КП составляют от 22% до 25% от общей аварийности СЭС 10 кВ; при возникновении коротких замыканий (КЗ) КП составляют 64%. Частая коммутация силовых преобразовательных трансформаторов создаёт условия для более

интенсивного старения изоляции, сокращает срок эксплуатации преобразовательных трансформаторов из-за пробоев изоляции.

Эксплуатация сетей 10 кВ предприятий алюминиевой отрасли при замене масляных выключателей на выключатели элегазовые и вакуумные, впервые столкнулась с проблемой надежности изоляции трансформаторов выпрямительных агрегатов в момент их отключения и включения. С появлением современной коммутационной аппаратуры вопросы сохранения целостности и долговечности изоляции трансформаторов стали рассматриваться с повышенным вниманием, поскольку быстродействующие вакуумные и элегазовые выключатели способствуют возникновению коммутационных перенапряжений.

Основным техническим решением ограничения КП является применение ограничителей перенапряжений (ОПН). В настоящее время при развитии применения быстродействующих вакуумных и элегазовых выключателей длительность коммутационных импульсов сократилась. Это из-за инерционности ОПН привело к эффекту их «замирания», при котором происходит пропуск высокочастотных коммутационных импульсов [17].

Указанная инерционность ОПН привела к разработке устройств ограничения КП на основе RC-цепей: RC-гасителей, RC-ограничителей и гасителей-компенсаторов. Указанные устройства разрабатывались на основе исследований для защиты высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей.

Применение RC-цепей для защиты преобразовательных трансформаторов до настоящего времени практически не исследовалось. В тоже время применение ОПН для защиты преобразовательных трансформаторов от перенапряжений не решает задачу их эффективной защиты, так как аварийность преобразовательных трансформаторов с увеличением доли быстродействующих выключателей (вакуумных и элегазовых) привело к росту пробоя их изоляции.

В связи с этим, исследования коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов для разработки технических решений и создания устройств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений

являются актуальными для снижения аварийности и повышения эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Цель работы: Исследование режимов коммутационных перенапряжений с обоснованием и разработкой технических решений по эффективному ограничению КП преобразовательных трансформаторов для снижения аварийности и повышения эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Идея работы. Повышение эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия возможно путем обоснования, разработки и внедрения технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ состояния вопроса коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов в СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.
2. Разработать методику экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.
3. Провести экспериментальные исследования режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ в условиях предприятий по производству алюминия.
4. Установить зависимости коммутационных перенапряжений от показателей режимов коммутации.
5. Провести физическое моделирование на полунатурной установке режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях без применения средств защиты от перенапряжений и с применением средств защиты от перенапряжений.

Объект исследования: система электроснабжения 10 кВ электролизного производства алюминия.

Предмет исследования: режимы коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов, питающих процесс электролиза алюминия.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались апробированные методы теории электроснабжения промышленных предприятий, электрических машин, математической статистики и математического моделирования. При анализе экспериментальных данных применялись методы Граббса и Ван-дер-Вардена.

Научная новизна диссертационной работы заключается в: установлении влияния коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки преобразовательных трансформаторов на коммутационные перенапряжения; получении эмпирических зависимостей кратности коммутационных перенапряжений от угла коммутации вакуумных и элегазовых выключателей и коэффициентов их загрузки; научно-техническом обосновании решений для создания средств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов электролизного производства.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в установлении влияния коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, суммарного коэффициента гармонических составляющих, тока нагрузки на коммутационные перенапряжения.

Практическая значимость результатов работы заключается в: получении на основе экспериментальных исследований оценок показателей режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов; разработке технического решения и схемы устройства для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Реализация полученных результатов. Результаты работы: использованы при разработке усовершенствованной схемы гасителя-компенсатора и приняты к производству в ООО «Научно-Производственное Предприятие

«РУТАС», которое занимается промышленным выпуском РС-гасителей и гасителей-компенсаторов; внедрены и применяются в ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание», отвечающего за техническую эксплуатацию, ремонты и модернизацию систем электроснабжения и электрооборудования предприятий АО «РУСАЛ».

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается достаточной (на уровне 0,95) сходимостью результатов аналитических и экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк», а также положительным опытом применения усовершенствованных гасителей-компенсаторов ГК(М)-10,5/0,75-УХЛ1.

На защиту выносятся:

1. Установленные зависимости перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов от их нагрузки и коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, позволяющие оценить влияние этих показателей на кратность коммутационных перенапряжений.
2. Зависимости кратности коммутационных перенапряжений от угла прерывания электрической дуги между контактами быстродействующих выключателей и коэффициента их загрузки, позволяющие обосновать ток нагрузки преобразовательного трансформатора, при котором исключаются возникновение опасных коммутационных перенапряжений.
3. Научно-техническое обоснование технического решения для создания средств защиты эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Апробация работы. Основные результаты и выводы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Международном научном симпозиуме НЕДЕЛЯ

ГОРНЯКА 2022, 2023 (г. Москва) XVI Международной научно-практической конференции (г. Уфа).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 4 печатных работы, из которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основной текст диссертационной работы изложен на 117 страницах, содержит 30 рисунков и 35 таблиц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 КВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Обзор исследований по вопросу коммутационных перенапряжений

Исследование вопросов, связанных с перенапряжениями при коммутации в системах электроснабжения 10 кВ промышленных предприятий, посвящены работы ученых: Альбокринов В.С., Базуткин В.В., Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Гончаров, А.Ф. и другие [2, 3, 5, 16, 17, 19, 24-26, 31, 37, 49, 51, 56, 62, 63, 67, 87, 89-91]. Системы электроснабжения 10 кВ предприятий алюминиевой отрасли имеют ряд особенностей:

- значительные токи КЗ, обусловленные близостью расположения предприятий по производству алюминия к мощным источникам генерации электроэнергии – гидроэлектростанциям;

- основными критериями выбора быстродействующих коммутационных аппаратов являются отключающая способность, электродинамическая и термическая устойчивость к токам КЗ;

- номинальные токи выключателей в 4 – 5 раз превышают номинальные токи преобразовательных агрегатов, питающих электролизеры;

- использование мощных кремниево-выпрямительных агрегатов (КВА) с базовой 12-пульсной схемой выпрямления переменного тока в постоянный, что приводит к снижению качества электрической энергии: суммарный коэффициент гармонических составляющих тока и напряжения, может изменяться от 10% до 78%, отклонение напряжения достигает $\pm (12-15)\%$ от номинального напряжения. Значение коэффициента мощности изменяется от 0,6 до 0,83 [87, 93, 94, 98].

В процессе технологического цикла по выплавке алюминия на высоковольтное оборудование, преобразовательные трансформаторы, кабельные линии воздействуют мощные магнитные поля выпрямленного тока, так как

величина тока в технологическом процессе изменяется в больших пределах от 200 до 400 кА [95, 96], а в перспективе - 600 кА [97].

Эксплуатация высоковольтных кабельных линий и высоковольтного электрооборудования в условиях сильных электромагнитных полей при наличии высших гармоник тока вызывает ускоренное старение изоляции электрооборудования и кабельных линий. Это вызывает риск аварийного пробоя изоляции обмоток преобразовательного трансформатора и возникновение (ОЗЗ), доля которого находится в диапазоне 70-80% от общего числа аварийных отключений в СЭС 6-35 кВ предприятий по производству алюминия [51, 99-101, 103] и переходят в короткие замыкания [26, 83].

Опыт эксплуатации быстродействующих выключателей в период с 2010 по 2024 гг. показывает, что при коммутации преобразовательных трансформаторов возникают перенапряжения, вызывающие риск аварийного пробоя их изоляции [49, 87-89, 91, 102]. В связи с этим исследования режимов КП в системах электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия целесообразно выполнять с учетом динамики и причин аварийности в сетях 10 кВ, оборудованных вакуумными и элегазовыми выключателями.

1.2 Анализ динамики и причин аварийности в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия

Аварийность в СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия за период 2006-2024 гг. достаточно полно представлена в исследованиях [17, 19, 21, 49, 51, 87, 99, 101, 103].

Проанализировано 1528 подтвержденных аварийных отключений в системах электроснабжения предприятий АО «РУСАЛ» [16, 20].

Динамика (%) вакуумных и элегазовых выключателей на предприятиях по производству алюминия приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Динамика (%) вакуумных и элегазовых выключателей от общего количества выключателей на предприятиях по производству алюминия

Периоды времени			
2006 ÷ 2010	2011 ÷ 2015	2016 ÷ 2020	2021 ÷ 2024
Количество вакуумных и элегазовых выключателей, %			
8%	12%	44%	48%

Распределение видов аварийных отключений в системах электроснабжения 10 кВ металлургических предприятий АО «РУСАЛ» приведено в табл. 1.2.

Анализ данных табл. 1.2 показывает, что основными видами аварийных отключений являются короткие замыкания, однофазные замыкания на землю и обрывы фаз сети. За период с 2006 по 2024 гг. количество аварийных отключений по причинам КЗ, ОЗЗ и обрывов фазы к общему количеству аварийных отключений составляет, соответственно, 19,1%, 65,8% и 11,6%. Неустановленные причины аварийных отключений составляют 3,5%.

Таблица 1.2 – Распределение видов аварийных отключений в системах электроснабжения 10 кВ предприятий алюминиевой отрасли

Вид аварийных отключений	2006 ÷ 2010		2011 ÷ 2015		2016 ÷ 2020		2021 ÷ 2024	
	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
КЗ	49	13,6	73	15,9	152	26,2	18	14,1
ОЗЗ	204	56,7	317	68,9	410	70,7	74	57,8
Обрыв (отгорание) фазы	89	24,7	50	10,9	12	2,1	27	21,1

Неустановлен- ная причина	18	5	20	4,3	6	1	9	7
Общее количе- ство аварийных отключений	360	100	460	100	580	100	128	100

Распределение аварийных отключений в системах электроснабжения 10 кВ предприятий АО «РУСАЛ» приведено на рис. 1.1.

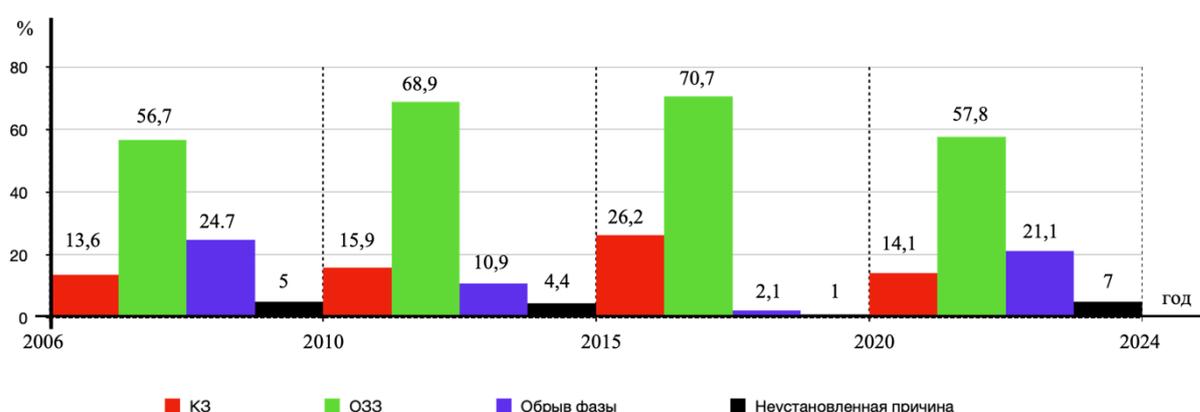


Рисунок 1.1 – Процентное распределение КЗ, ОЗЗ и обрыв фаз в распределительных сетях 10 кВ по пятилетним периодам с 2006 по 2024 гг.

Анализ данных, приведенных в табл. 1.2 и на рис.1.1, показывает, что основными видом аварийных отключений являются ОЗЗ (56,7% до 70,7%).

Рост ОЗЗ в 1,25, аварийных отключений от КЗ в 1,93 раза связан с увеличением доли быстродействующих выключателей в СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.

При росте аварийных отключений за 2006÷2010 – 2016÷2020 гг. с 360-ти до 580-ти доля КЗ и ОЗЗ в общей аварийности в 2024 г. по сравнению с 2006 г. практически не изменилась.

Распределение причин, обуславливающих КЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ предприятий АО «РУСАЛ» приведено в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Распределение причин, обуславливающих КЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ предприятий АО «РУСАЛ» по пятилетним интервалам

№ п/п	Причины КЗ	2006 ÷ 2010		2011 ÷ 2015		2016 ÷ 2020		2021 ÷ 2024	
		Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
1	Естественное старение изоляции	20	40,8	29	39,7	36	23,7	3	16,7
2	Максимальная перегрузка	2	4,1	2	2,7	7	4,6	-	0
3	Перенапряжения при дуговых ОЗЗ	13	26,5	19	26	33	21,7	2	11,1
4	Перенапряжения при коммутации электродвигателей	5	10,2	8	10,9	39	25,7	1	5,6
5	Перенапряжения при коммутации силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ	6	12,2	8	11	21	13,8	-	0
6	Перенапряжения при коммутации преобразовательных трансформаторов 10 кВ	3	6,1	7	9,6	16	10,5	12	66,6
7	Общее количество КЗ	49	100	73	100	152	100	18	100

Распределение причин, обуславливающих ОЗЗ в электрических сетях 10 кВ предприятий АО «РУСАЛ» приведено в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Динамика и распределение причин, обуславливающих ОЗЗ в электрических сетях 10 кВ предприятий АО «РУСАЛ»

№ п/п	Причины ОЗЗ	2006 ÷ 2010		2011 ÷ 2015		2016 ÷ 2020		2021 ÷ 2024	
		Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
1	Естественное старение изоляции	129	63,2	156	49,2	136	33,2	32	43,2
2	Максимальная перегрузка	12	5,9	18	5,7	16	3,9	-	0
3	Перенапряжения при дуговых ОЗЗ	44	21,6	105	33,1	148	36,1	11	14,9
4	Перенапряжения при коммутации электродвигателей	11	5,4	18	4,7	61	14,9	5	6,8

5	Перенапряжения при коммутации силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ	8	3,9	12	3,8	26	6,3	6	8,1
6	Перенапряжения при коммутации преобразовательных трансформаторов 10 кВ	-	0	8	2,5	23	5,6	20	27
7	Общее количество ОЗЗ	204	100	317	100	410	100	74	100

Основные причины КЗ или ОЗЗ определялись, исходя из следующего:

- Если КЗ или ОЗЗ возникало в рабочем режиме технологического оборудования при нормальных условиях эксплуатации (отсутствие грозы, механических воздействий, электрических перегрузок и т. д.), то за основную причину принималось старение изоляции.

- Если при перегрузке не происходило срабатывание защиты и возникали КЗ или ОЗЗ, то основными причинами КЗ или ОЗЗ считались аварийные выходы из строя трансформаторов, электродвигателей, кабельных линий.

- Если при неотключенных ОЗЗ происходило срабатывание защиты от КЗ и наблюдались многоместные повреждения изоляции кабельных линий, то основной причиной повреждений изоляции считались перенапряжения, возникающие при ОЗЗ.

- Если при срабатывании защит от ОЗЗ или КЗ во время коммутации электродвигателей или трансформаторов наблюдалось повреждение изоляции, то основной причиной являлись перенапряжения при коммутации.

На предприятиях АО «РУСАЛ» в период с 2021 по 2024 гг. внедрение резистивного и комбинированного режима нейтрали в сетях 10 кВ позволило ограничить перенапряжения при дуговых ОЗЗ до уровня 2-2,2 (U_n) [27, 34, 50, 65, 66, 73,74, 101,103]. В то же время применение РС-гасителей и гасителей компенсаторов позволило ограничить величину КП до уровня 1,7 U_n , что практически не допускает пробоя изоляции обмоток электродвигателей [5, 16, 21, 22, 25, 49, 56, 62, 70, 87, 102].

Анализ данных табл. 1.3 и 1.4 показывает, что: внедрение резистивного или комбинированного режимов нейтрали в сетях 10 кВ; использование эффективных средств защиты электродвигателей от коммутационных перенапряжений, таких как RC-гасители и гасители-компенсаторы; замена кабельных линий, срок эксплуатации которых превышает 40-45 лет – позволило практически в 5,3 раза снизить причину интенсивного старения изоляции кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов к 2024 г. по сравнению с аварийностью зафиксированной в период 2006 по 2020 гг.

Однако аварийность преобразовательных трансформаторов в период с 2021 по 2024 практически не изменилась по сравнению с периодами максимальной аварийности 2016 ÷ 2020 г. (табл. 1.3, 1.4).

Анализ данных таб. 1.3 и 1.4 показывает, что основной причиной аварийных отключений преобразовательных трансформаторов являются коммутационные перенапряжения, обусловленные в значительной степени ростом доли с 8% до 48% элегазовых и вакуумных выключателей в общем количестве выключателей на предприятиях АО «РУСАЛ».

В связи с вышеизложенным, вопрос обоснования и разработки научно-технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации преобразовательных трансформаторов, является актуальным [118].

1.3 Анализ существующих средств и устройств защиты от коммутационных перенапряжений

1.3.1 Ограничители перенапряжений

В работе профессоров Гончарова А. Ф. и Эпштейна И. Я. [31] показано, что основную опасность для изоляции обмоток двигателей и трансформаторов представляют КП, кратность перенапряжений которых превышает значения в 1,8 и 2,8 раза от номинального напряжения.

Современные нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) ограничивают перенапряжения до уровня 2,3-2,9 U_n при частоте коммутационного

импульса <45кГц [42, 43] и обеспечивают эффективную защиту преобразовательных трансформаторов.

Вместе с этим, установлено, что коммутационный импульс с частотой выше 45 кГц из-за инерционности ОПН приводит к кратковременному отказу. Данный отказ представляет «зону замирания» и характеризуется отсутствием реакции ОПН на возникающие КП.

Особенностью коммутации преобразовательных трансформаторов является то, что с увеличением нагрузки трансформаторов индуктивность обмоток снижается и возрастает частота коммутационного импульса. Увеличение нагрузки трансформатора способствуют намагничиванию магнитопровода трансформатора, что снижает индуктивность обмоток трансформатора и вызывает рост частоты коммутационного импульса в соответствии с выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1.1)$$

где L – индуктивность обмоток трансформатора, Гн;

C – емкость обмотки трансформатора, мкФ.

Наиболее интенсивное снижение индуктивности трансформатора происходит с увеличением нагрузки [7, 24, 54, 104].

Исследования [5, 21, 25] показывают, что ОПН в условиях эксплуатации характеризуются низкой термической устойчивостью в режиме однофазного замыкания на землю при работе защиты от ОЗЗ на сигнал или отказывает при перенапряжениях, превышающих номинальное напряжение в 3 и более раза. В таких условиях по ОПН, подключенным к неповрежденным фазам сети, протекают длительные токи, превышающие термическую устойчивость ОПН и приводящие к термическому разрушению ОПН.

На рис. 1.2 показано термическое разрушение ОПН режиме ОЗЗ.



Рисунок 1.2 – Термическое разрушение ОПН режиме ОЗЗ

Исходя из вышесказанного, ограничители перенапряжений не обеспечивают эффективное ограничение коммутационных перенапряжений.

1.3.2 Резистивно-емкостные ограничители перенапряжений (РС-ограничители)

К числу нелинейных ограничителей перенапряжений относятся резистивно-емкостные ограничители перенапряжений (РС-ограничители) [87]. Принцип работы РС-ограничителей заключается в снижении волнового сопротивления защищаемого объекта за счет увеличения присоединённой ёмкости. «Зона замирания» в работе РС-ограничителя не проявляется, поскольку его ёмкость ограничивает частоту коммутационного импульса на уровне не выше 3,5 кГц.

Данный ограничитель перенапряжений собран по схеме «звезда» с изолированной нейтральной точкой. Значение резистора составляет 30 Ом, значение конденсатора 0,25 мкФ.

В режиме ОЗЗ резистивный ограничитель создает ток 0,75 А [56, 57]. В связи с этим количество РС-ограничителей, которое можно подключать к одной секцией шин подстанции напряжением 10 кВ, рассчитается по формуле:

$$N_{\text{огр}} = \frac{I_{\text{ОЗЗ.доп}} - I_{\text{ОЗЗ.сети}}}{0,75} \quad (1.2)$$

где: $I_{\text{ОЗЗ.доп}}$ – допустимый емкостной ток для сети 6 кВ – 30 А; для сети 10 кВ – 20 А;

$I_{O33.сети}$ – максимально существующий ток ОЗЗ в сети 10 кВ.

В исследованиях [50, 101] отмечается, что при эксплуатации сетей напряжением 10 кВ на промышленных предприятиях по производству алюминия токи ОЗЗ в сетях 10 кВ, связанных с одной секцией шин главной понижающей подстанции (ГПП), как правило, не превышают 15 А. Поэтому к одной секции шин подстанции 10 кВ количество РС-ограничителей не должно превышать 6 единиц. При дальнейшем увеличении количества РС-ограничителей требуется переводить изолированный режим нейтрали на компенсированный режим.

Вместе с этим, широкое применение РС-ограничителей не позволяет обеспечивать переход с изолированного режима нейтрали сети на резистивный, что снижает надежность системы электроснабжения в режиме ОЗЗ из-за низкой эффективности ограничений перенапряжений в этом режиме.

РС-ограничители при наличии высших гармоник тока и напряжения в сети подвержены сильному термическому воздействию, так как резистор и конденсатор расположены в одном герметичном корпусе. Поэтому с увеличением частоты тока сопротивление конденсатора снижается и увеличивается ток, протекающий через резистор, что приводит к росту тепловыделения. При длительном протекании тока высших гармоник резистор и РС-ограничитель подвержены термическому разрушению [33, 87].

Исходя из вышеизложенного, РС-ограничители в дальнейшем не рассматриваются как эффективное средство защиты от КП.

1.3.3 Резистивно-емкостные гасители перенапряжения (РС-гасители)

Действие РС-гасителя основано на вышеуказанном устройстве ограничения коммутационных перенапряжений.

В РС-гасителе схема соединения РС-цепей выполнена по схеме «звезда с изолированной нейтральной точкой». По РС-цепям не будут протекать гармоники кратные трем, что приводит к повышению термической устойчивости

RC-гасителя. Соединение RC-цепей, собранных по схеме «звезда с изолированной нейтральной точкой», не оказывает влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю.

Исходя из вышесказанного, RC-гасители более устойчивы к термическому воздействию и не оказывают влияния на величину и характер тока ОЗЗ [21, 50, 51, 87].

1.3.4 Гасители-компенсаторы ограничения перенапряжений

Гаситель-компенсатор – многофункциональное устройство, предназначенное для ограничения КП и перенапряжений при дуговых ОЗЗ с частичной компенсацией реактивной мощности за счет емкостей, включенных между фазными проводами на линейное напряжение. В гасителе-компенсаторе емкости фаз собраны по схеме «треугольник». Величина емкости универсальная и составляет 0,75 мкФ. Принцип действия гасителей-компенсаторов основан на ускоренном обмене электромагнитной энергией между фазными обмотками электродвигателя за счет увеличения присоединенной емкости. Данное устройство преимущественно применяется для защиты электродвигателей [105].

В настоящее время отсутствуют исследования, подтверждающие эффективность применения гасителей-компенсаторов для защиты преобразовательных трансформаторов от КП.

1.4 Обоснование и формулировка задач исследования

Проведенный анализ состояния вопроса ограничения коммутационных перенапряжений показывает:

1. В настоящее время для защиты трансформаторов от КП в основном используются ОПН. Наличие вышеуказанной «зоны замирания» в работе ОПН и их невысокая термическая устойчивость в режиме длительного неотключенного ОЗЗ показывает, что указанные ограничители являются недостаточно эффективными.

2. Количество RC-ограничителей для защиты преобразовательных трансформаторов от КП ограничено их влиянием на величину тока ОЗЗ. С увеличением количества RC-ограничителей ток ОЗЗ будет возрастать. Согласно ПУЭ, величина тока ОЗЗ в сетях 6 кВ не должна превышать 30А, а в сетях 10 кВ – 20 А. В режиме ОЗЗ один RC-ограничитель создает добавочный активный ток 0,75 А в сетях 6 кВ, 1,3 А в сетях 10 кВ. Преобразовательные трансформаторы эксплуатируются в сетях 10 кВ, следовательно, максимальное количество RC-ограничителей не должно превышать 6 единиц. Это обстоятельство усложняет использование RC-ограничителей для защиты преобразовательных трансформаторов от КП.

3. В настоящее время отсутствуют исследования, подтверждающие эффективность применения RC-гасителей и RC-гасителей-компенсаторов для защиты преобразовательных трансформаторов от КП. В связи с этим целесообразно, на основе исследования коммутационных режимов, выполнить оценку и обосновать рациональные параметры RC-гасителей и RC-гасителей-компенсаторов для эффективной защиты преобразовательных трансформаторов от КП.

На основании вышеизложенного сформулирована цель диссертационного исследования «Обоснование и разработка технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия».

Для достижения вышеуказанной цели в диссертационном исследовании поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор исследований по вопросу коммутационных перенапряжений с анализом причин аварийности и существующих средств защиты от коммутационных перенапряжений в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.
2. Выполнить экспериментальные исследования режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.

3. Провести аналитическое и физическое моделирование КП в системе: «выключатель – кабельная линия – преобразовательный трансформатор» для обоснования и разработки технических решений по эффективному ограничению КП.
4. Разработать технические решения, направленные на повышение эффективности ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов, применяемых в электролизе алюминия.

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ

2.1 Исходные положения

Эффективная и надёжная работа энергетических систем и электролизных алюминиевых производственных комплексов связана с устойчивостью их электрических сетей и стабильностью режимов питания мощных кремниевых выпрямительных агрегатов (КВА). Особенностью электролизных алюминиевых производственных комплексов является высокая плотность электрических нагрузок, обусловленная необходимостью длительной подачи значительных токов на анодно-катодные узлы электролизёров. Любое нарушение режима электроснабжения, в том числе вызванное коммутационными процессами, может вызывать технологические отклонения, влияющие на энергопотребление, срок службы оборудования и качество продукции.

При проведении электролиза имеет место повышенная чувствительность элементов электрических сетей 10 кВ к воздействиям коммутационного характера. Это обусловлено мощными токовыми нагрузками, наличием нелинейных элементов в выпрямительных агрегатах, а также воздействием высших гармоник, возникающих при тиристорном управлении током электролизеров. При этом существующие методики расчёта и оценки коммутационных перенапряжений не полностью учитывают специфику режимов электролиза алюминия, в которых процессы включения и отключения преобразовательных трансформаторов (ПРТР) происходят при нагрузочных токах выключателя равных $(0,0175-38) I_n$ и высокоамплитудных токовых коммутационных импульсов.

В таких условиях параметры коммутационных перенапряжений должны рассматриваться как случайные величины, формируемые под воздействием переменных технологических, режимных и динамических факторов, присутствующих процессу электролиза алюминия. Нелинейные свойства

кремниево-выпрямительных агрегатов, широкий диапазон рабочих токов и наличие гармонических искажений вызывают существенную вариативность коммутационных процессов.

В связи с вышеизложенным целесообразно разработать методику и на ее основе провести исследования режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.

2.2 Методика экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений

2.2.1 Экспериментальные измерения показателей режимов коммутационных перенапряжений

Измерения показателей режимов коммутационных перенапряжений требуется выполнять в следующих режимах работы ПРТР:

- включение и отключение выключателей при работе ПРТР в холостом режиме - без нагрузки;
- включение и отключение выключателей при работе ПРТР под нагрузкой.

При экспериментальных исследованиях должны измеряться показатели коммутационных режимов:

- коммутационные перенапряжения в сети 10 кВ;
- токи нагрузки ПРТР;
- спектральный состав токов нагрузки ПРТР.

Схемы подключения измерительной аппаратуры для измерения показателей коммутационных перенапряжений, токов нагрузки ПРТР и спектрального их состава приведены на рис 2.1 и 2.2.

Для измерения КП применялись трехфазный компенсационный резистивно-емкостной делитель напряжения ДНЕК и осциллограф Tektronix TDS2024B в комплекте с персональным комплексом, предназначенным для фиксации КП и получения осциллограмм.

Для измерений рабочих токов выключателя и спектрального состава токов нагрузки использовался прибор комплексного контроля качества электроэнергии ПКК-57. Прибор позволяет измерять напряжение и ток в электрических сетях, определять активную, реактивную и полную мощность, вычислять коэффициент мощности, фиксировать частоту и анализировать гармонический состав токов и напряжений, оценивать уровень искажений (THD), а также регистрировать параметры качества электроэнергии в режиме длительного мониторинга.

Измерительная аппаратура имела актуальный срок метрологической проверки.

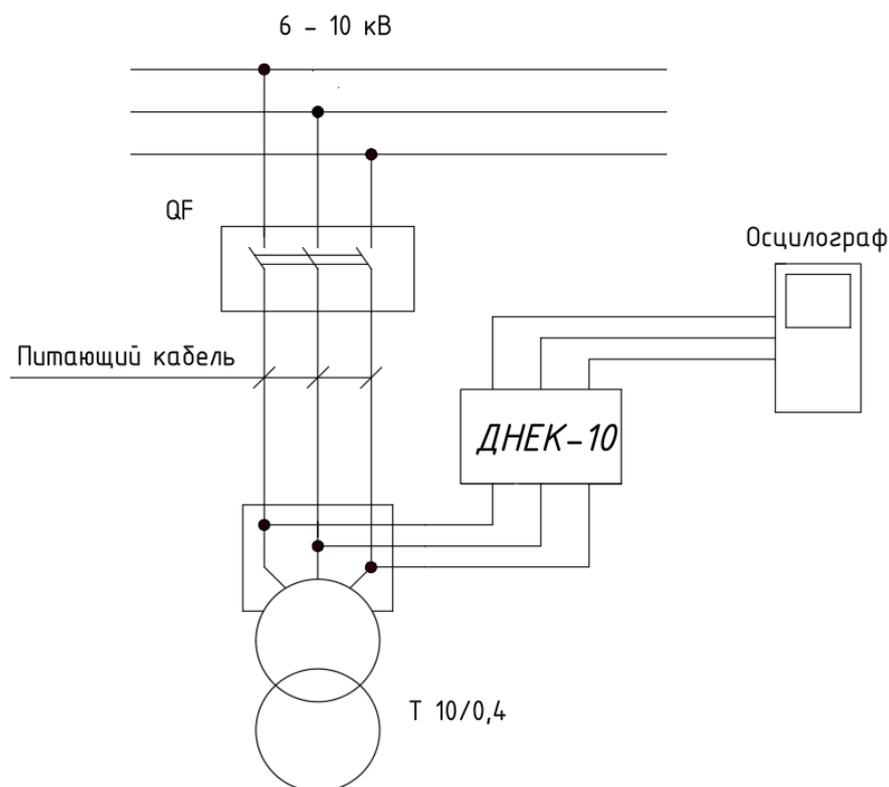


Рисунок 2.1 – Схема подключения измерительной аппаратуры при измерении коммутационных перенапряжений

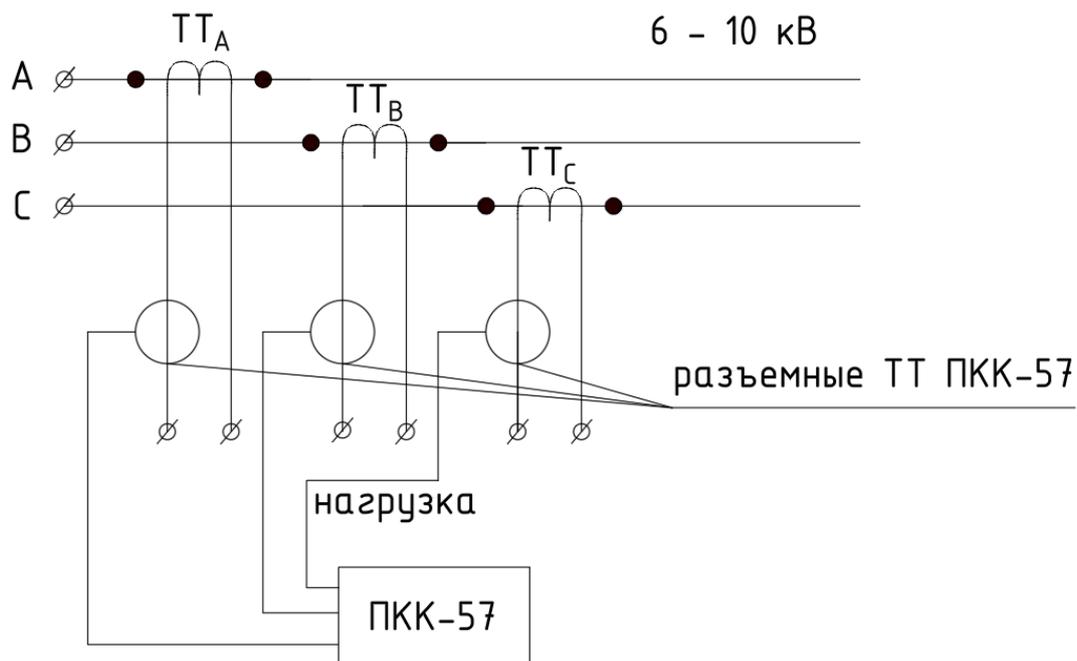


Рисунок 2.2 – Схема подключения ПКК-57 при измерении гармонического состава тока нагрузки

В процессе измерения показателей качества электрической энергии прибор ПКК-57 осуществлял регистрацию осциллограмм, значений токов нагрузки до 1000А, а также их спектрального состава до 65-й гармоники.

Прибор подключался к каждой фазе концевой муфты в кабельном отсеке фидерной ячейки подстанции с помощью специальных разъемных, гибких трансформаторов тока.

Перед каждым отключением преобразовательного трансформатора производились измерения токов нагрузки, регистрировался их спектральный состав и записывались соответствующие осциллограммы.

Вышеприведенная методика экспериментальных измерений обеспечила получение исходного статистического материала для проведения дальнейших экспериментальных исследований показателей режимов коммутационных перенапряжений.

2.2.2 Обработка данных показателей режимов коммутационных перенапряжений

В результате измерений получены статистические выборки значений показателей режимов коммутационных перенапряжений в виде кратностей коммутационных перенапряжений.

Обработка статистических данных осуществлялась по блок-схеме, приведенной на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Блок схема обработки экспериментальных данных

В соответствии с блок-схемой выполнялось:

1. Получение исходных данных, включающих значения: тока нагрузки ПРТР ($I_{\text{нагр}}$), суммарного коэффициента гармонического состава тока (K_I), коммутационных перенапряжений ($U_{\text{п}}$), коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора ($K_{\text{з.Тр}}$) и выключателя ($K_{\text{з.В}}$) по току.
2. Определение статистических показателей коммутационных перенапряжений: среднего, дисперсии, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации в соответствии с табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Определение статистических характеристик коммутационных перенапряжений

Статистика	Математическое выражение	Примечание
Среднее значение	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$	X_i – i -тое значение измеряемого показателя; n – количество значений в выборке
Дисперсия	$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2$	-
Среднеквадратичное отклонение	$\sigma = \sqrt{D}$	-

3. Формирование статистических выборок коммутационных перенапряжений и их очищение от «выбросов» по критерию Граббса.

На основании корректировки («очищения») по критерию Граббса исходных статистических рядов обеспечивается устранение аномальных значений, способных исказить значения вероятностно-статистических характеристик исследуемых коммутационных перенапряжений.

Применение критерия Граббса позволяет формализованно оценить степень отклонения экстремальных значений от центральной тенденции выборки и определить, являются ли такие значения статистически допустимыми.

Проверка выборок по критерию Граббса включает следующие этапы.

1. Упорядочивание выборок $X = \{X_1, <X_2 < \dots < X_n\}$;
2. Определение среднего значения в соответствии с табл. 2.1;
3. Определение среднеквадратического отклонения по табл. 2.1.
4. Определение значения статистик Граббса G , представляющие собой нормированные отклонения максимального значения (G_{max}) и минимального значения (G_{min}) от среднего значения.

Отклонение максимального значения выборки от среднего значения определяется по выражения:

$$G_{max} = \frac{|x_{max} - \bar{X}|}{\sigma} \quad (2.1)$$

Отклонение минимального значения выборки от среднего значения определяется по выражения:

$$G_{min} = \frac{|x_{min} - \bar{X}|}{\sigma} \quad (2.2)$$

Критическое значение критерия Граббса $G_{кр}$ рассчитывается по выражению:

$$G_{кр} = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{t^2_{\frac{\alpha}{2n}, n-2}}{n-2+t^2_{\frac{\alpha}{2n}, n-2}}} \quad (2.3)$$

где:

n - объём выборки;

$\frac{t^2_{\alpha}}{2n} \cdot \frac{n-2}{n}$ - табличное значение распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha/(2n)$ и числе степеней свободы $n - 2$;

α - уровень значимости (для доверительной вероятности $1-\alpha=0,95$ принято $\alpha=0,05$).

Анализ на выбросы отдельных значений выборки (первое приближение) проводился в соответствии с условиями:

если $G_{\min} \leq G_{кр}$ и $G_{\max} \leq G_{кр}$, то минимальные и максимальные значения признаются статистически допустимыми и не подлежат исключению;

если $G_{\min} > G_{кр}$ и $G_{\max} > G_{кр}$, то минимальные и максимальные значения рассматриваются как статистически недопустимыми как «выбросы» и подлежат исключению из выборки.

Затем анализ проводится для выборки без исключенных значений (второе приближение). Анализ продолжается до тех пор, пока не наступит условие $G_{\min} \leq G_{кр}$ и $G_{\max} \leq G_{кр}$.

4. Проверка статистических выборок на однородность с определением их принадлежности к генеральной совокупности по критерию Ван-дер-Вардена.

С учетом того, что коммутационные режимы ПРТР реализуются в сходных условиях – идентичные токи нагрузки ПРТР, процессы и токи электролиза алюминия, номинальные токи и время отключения выключателей, можно предположить, что статистические выборки принадлежат к генеральной совокупности.

В связи с этим можно принять гипотезу о принадлежности статистических выборок к генеральной совокупности, объединить выборки в единую совокупность с целью определения обобщенных статистических характеристик.

Для принятия вышеуказанной гипотезы используется непараметрический критерий Ван-дер-Вардена.

Расчетное значение критерия Ван-дер-Вардена определяется по выражению:

$$X_{эмп} = \sum_{i=1}^{n=2} \psi \left(\frac{R_i}{n_1 + n_2 + 1} \right), \quad (2.4)$$

где ψ – квантиль стандартного нормального закона;

R_i – ранг i -го наблюдения каждой из выборок;

n_1 и n_2 – число членов первой и второй выборок.

Проверка гипотезы о принадлежности статистических выборок кратности коммутационных перенапряжений к генеральной совокупности отвергнута с доверительной вероятностью 0,95 проводится на основании сравнения расчетного значения $X_{эмп}$ и критического значения $X_{кр}$ критерия Ван-дер-Вардена, которое определяется по таблице критических значений указанного критерия.

В случае, когда $X_{эмп} \leq X_{кр}$, то гипотеза об отсутствии статистических различий, то есть принадлежности отдельных выборок к генеральной совокупности, принимается.

Проверив выполнение нулевой гипотезы об отсутствии статистически значимых различий между выборками энерготехнологических параметров, полученными для выключателей одинаковых номиналов при коммутации ПРТР (при одинаковом токе нагрузки ПРТР и одинаковом токе электролиза) в условиях различных предприятий, выполняется их объединение в обобщённые выборки и определение вероятностных и энерготехнологических профилей процесса коммутации ПРТР указанными выключателями.

2.2.3 Анализ экспериментальных данных

Анализ экспериментальных данных выполняется на основе измеряемых, расчетных показателей, а также осциллограмм перенапряжений и гармонического состава тока нагрузки ПРТР.

На первом этапе определяется кратность коммутационных перенапряжений в соответствии с ГОСТ 32144–2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.» [109]:

$$K_{п} = \frac{U_{max}}{U_{н}}, \quad (2.5)$$

где U_{max} - максимальное мгновенное значение напряжения, зафиксированное при коммутации преобразовательного трансформатора, кВ

U_n - номинальное напряжение сети, кВ.

На втором этапе определяются эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений ($K_{п}$) от тока нагрузки ПРТР ($I_{нагр}$) и коэффициента загрузки выключателя ($K_{з.в}$):

$$K_{п} = f_1(I_{нагр}), \quad (2.6)$$

$$K_{п} = f_2(K_{з.в}), \quad (2.7)$$

Коэффициент загрузки выключателя ($K_{з.в}$) определяется по выражению:

$$K_{з.в} = \frac{I_{нагр}}{I_{н.в.}}, \quad (2.8)$$

где $I_{нагр}$ – ток нагрузки ПРТР, А,

$I_{н.в.}$ – номинальный ток выключателя, А.

На третьем этапе определяется эмпирическая зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I от тока нагрузки ПРТР:

$$K_I = f_3(I_{нагр}), \quad (2.9)$$

Полученные результаты требуются для обоснования технических решений для разработки средств по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений ПРТР.

2.3 Моделирование режимов коммутационных перенапряжений на полунатурной физической установке

Схема полунатурной физической установки для моделирования коммутационных перенапряжений имеет вид, аналогичный схеме, приведенной на рис 2.1.

Задачами моделирования являются:

1. Моделирование на полунатурной физической установке режимов коммутационных перенапряжений, включение, отключение преобразовательного трансформатора.
2. Разработка схем и выбор параметров средств защиты от КП на основе РС-цепей для эффективного ограничения КП.

3. Сравнение максимальной кратности коммутационных перенапряжений без средств защиты от КП с максимальной кратностью коммутационных перенапряжений со средствами защиты от КП с оценкой коэффициента эффективности ограничения перенапряжений, определяемого по выражению:

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{п.мах1}}}{K_{\text{п.мах2}}} \quad (2.10)$$

где $K_{\text{п.мах1}}$ – максимальная кратность коммутационных перенапряжений без средств защиты от КП;

$K_{\text{п.мах2}}$ – максимальная кратность коммутационных перенапряжений со средствами защиты от КП.

Вышеизложенная методика позволяет выполнить экспериментальные исследования режимов КП в условиях полунатурной физической модели и предприятий по производству алюминия.

2.4 Выводы по главе 2

Разработана методика экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия, в составе которой:

1. Определение состава измеряемых показателей режимов коммутации – коммутационные перенапряжения, токи нагрузки ПРТР, их спектрального состава) при включении, отключении ПРТР в режимах холостого хода и под нагрузкой.
2. Порядок обработки экспериментальных данных:
 - 2.1 Получение исходных данных по: току нагрузки ПРТР ($I_{\text{нагр}}$), суммарному коэффициенту гармонического состава тока (K_I), коммутационным перенапряжениям ($U_{\text{п}}$), коэффициентам загрузки ПРТР ($K_{\text{з.тр}}$) и выключателей по току ($K_{\text{з.в}}$).
 - 2.2 Определение статистических показателей коммутационных перенапряжений: среднего, дисперсии, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации.

- 2.3 Формирование статистических выборок коммутационных перенапряжений и их очищение от «выбросов» по критерию Граббса.
- 2.4 Проверка статистических выборок на однородность с определением их принадлежности к генеральной совокупности по критерию Вандер-Вардена.
3. Анализ экспериментальных данных с получением зависимостей: кратности коммутационных перенапряжений от тока нагрузки ПРТР $K_{п} = f_1(I_{нагр})$ и коэффициента загрузки выключателя $K_{п} = f_2(K_{з.в})$, а также суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I от тока нагрузки ПРТР $K_I = f_3(I_{нагр})$.
4. Задачи и порядок полунатурного физического моделирования режимов коммутационных перенапряжений, включающие:
- 4.1 Моделирование на полунатурной физической установке режимов коммутационных перенапряжений, включение, отключение преобразовательного трансформатора.
- 4.2 Разработку схем и выбор параметров средств защиты от КП на основе RC-цепей для эффективного ограничения КП.
- 4.3 Проведение сравнительного анализа КП без средств защиты от КП и со средствами защиты от КП с оценкой коэффициента эффективности ограничения перенапряжений
5. Сравнительный анализ КП в сетях электроснабжения предприятий по производству алюминия без средств защиты и со средствами защиты от КП.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ

3.1 Характеристика объекта исследования и данные экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений

Объектом исследования являлись коммутационные режимы преобразовательных трансформаторов в электрических сетях предприятий по производству алюминия, коммутируемые быстродействующими элегазовыми и вакуумными выключателями.

На рис. 3.1 приведена структурная схема электролиза алюминия предприятия АО «РУСАЛ».

Производственный комплекс включает три электролизных цеха, каждый из которых состоит из нескольких СК серий. Каждая серия обеспечивает питание двух корпусов, в состав которых входят четыре распределительных пункта (РП), обеспечивающих электропитание электролизных ванн и технологического оборудования.

Экспериментальные исследования режимов КП проводились в июне 2023 года на подстанциях РП-2 серии СК-6 (АО «РУСАЛ Саяногорск») и РП-4 серии СК-3 (АО «РУСАЛ Новокузнецк»). Все РП и подстанции идентичны и включают пять трансформаторов ТДЦПФУД-25000/10 У1, пять тиристорных преобразователей (В-ТПЖ-75-к-150 УХЛ1), пять шинных разъединителей (РВД-10А-80кА) и жесткую ошиновку.

На Саяногорском алюминиевом заводе преобразовательные трансформаторы коммутировались элегазовыми выключателями, на Новокузнецком алюминиевом заводе преобразовательные трансформаторы коммутировались вакуумными выключателями.

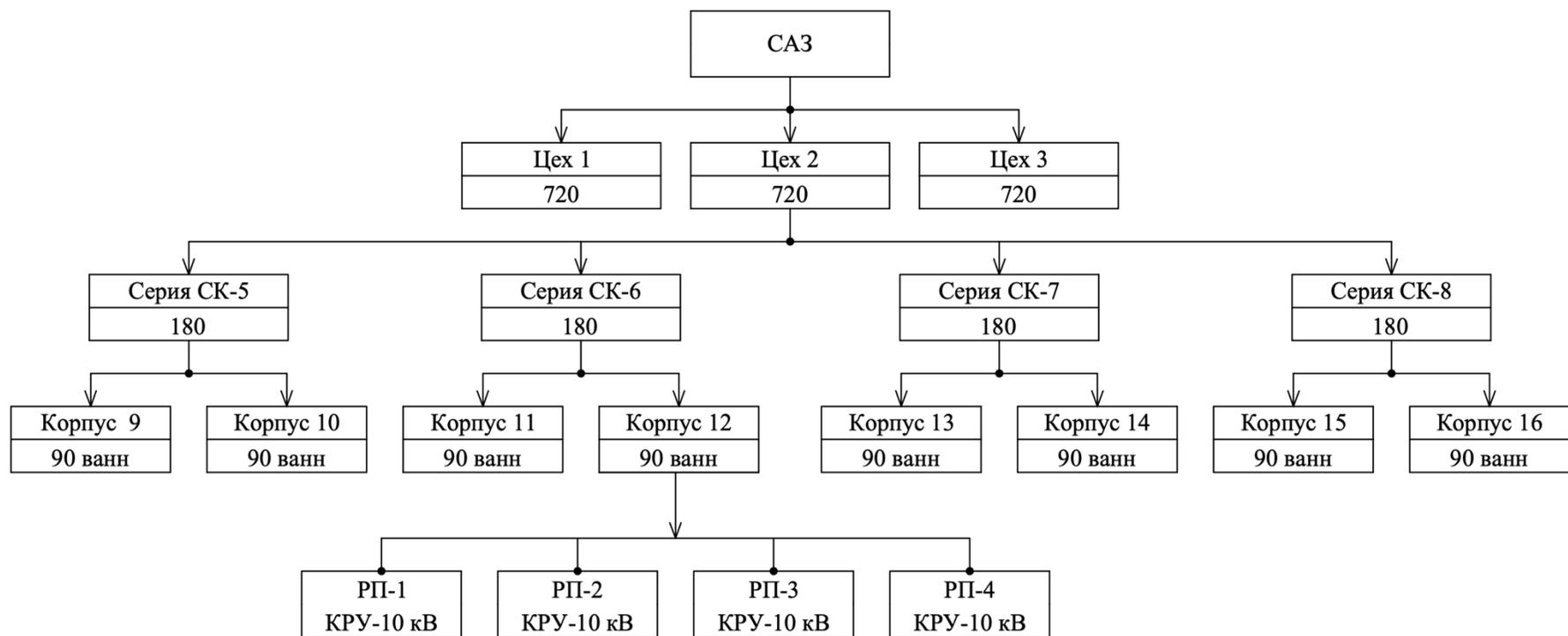


Рисунок 3.1 – Структурная схема электролиза алюминия предприятия АО «РУСАЛ»

Однолинейная схема электроснабжения электролизеров (ток электролиза 230 кА) приведена на рис. 3.2.

Фидера, питающие первичную обмотку ПРТР имеют в зависимости от требований процесса электролиза нагрузку от 35 до 700 А. Схема включает шкаф управления выпрямителем, шкаф автоматического ввода резерва (АВР), тиристорный блок выпрямления (БВТ). Преобразовательный трансформатор в совокупности с тиристорным блоком управления образует кремниевый выпрямительный агрегат (КВА). Как правило, все пять КВА обеспечивают суммарный ток электролиза 230 кА.

Исследование режимов коммутационных перенапряжений выполнялось на Саяногорском и Новокузнецком алюминиевых заводах при минимальном – 200 кА и максимальном – 400 кА токах электролиза.

Исследования режимов коммутационных перенапряжений выполнялись при токах нагрузки преобразовательных трансформаторов равных: $0,05 I_{\text{нагр}}$, $0,25 I_{\text{нагр}}$, $0,5 I_{\text{нагр}}$, $0,74 I_{\text{нагр}}$, $0,88 I_{\text{нагр}}$ и $1,0 I_{\text{нагр}}$. Это позволило оценить влияние тока нагрузки на коммутационные перенапряжения. Для каждого значения тока нагрузки выполнялось по 26 циклов коммутации трансформатора. Один цикл включал последовательное включение, отключение преобразовательного трансформатора. При каждом включении, отключении ПРТР регистрировался спектральный состав тока нагрузки.

При экспериментальном исследовании выполнено 1248 измерений, результаты которых приведены в табл. 3.1-3.8.

В табл. 3.1-3.8 приведены данные по перенапряжениям, коэффициентам загрузки выключателей ($K_{з.в}$) и преобразовательных трансформаторов ($K_{з.тр}$), суммарному коэффициенту гармонических составляющих тока нагрузки (K_1) при включении, отключении преобразовательных трансформаторов элегазовыми и вакуумными выключателями при токе электролиза 200 кА, 400 кА. Технические характеристики преобразовательного трансформатора, элегазового и вакуумных выключателей представлены в приложении 1.

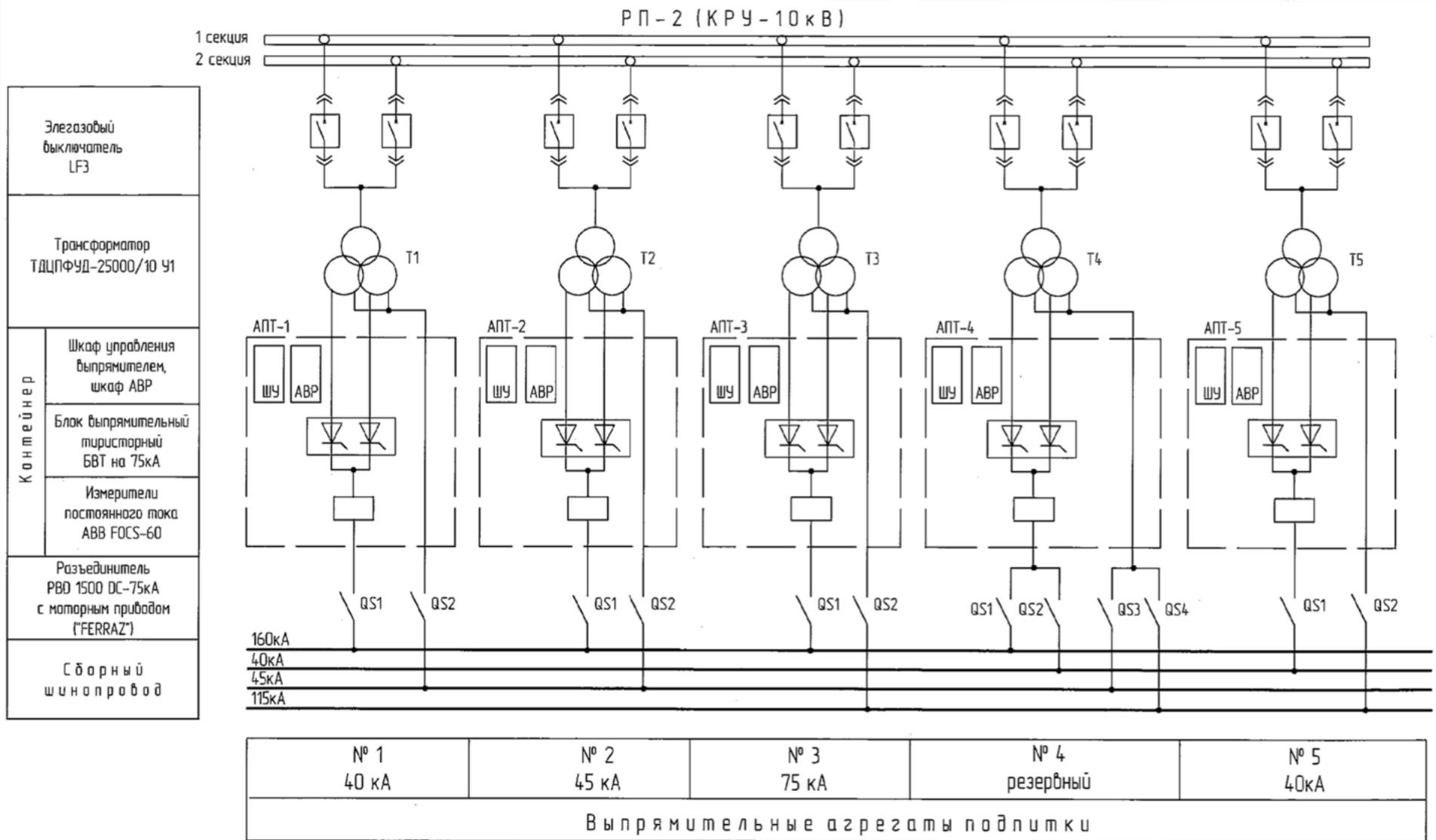


Рисунок 3.2 – Однолинейная схема электроснабжения электролизеров

Таблица 3.1 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при включении ПРТР элегазовым выключателем - ток электролиза 200 кА (АО «РУСАЛ Саяногорск»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (включение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	9500	12	7; 7; 3; 5; 5; 9; 6; 9; 5; 3; 9; 4; 5; 7; 9,5; 5; 7; 8; 9,5; 7; 9; 8; 5; 7; 8; 5;	0,0175	0,05	Приложение №2. Рисунок П2.1	Приложение №2. Рисунок П2.3
2	175	9000	30,5	7; 7; 5; 7; 9; 8; 9; 3; 9; 9; 5; 7; 9; 4; 9; 5; 7; 8; 9; 9; 3; 5; 9; 5; 7; 5;	0,0875	0,25		
3	350	29500	19,6	14; 13; 19; 16; 18; 26; 21; 28; 14; 29,5; 22; 14; 16; 19; 21; 29,5; 16; 19; 29,5; 15; 16; 19; 17; 29,5; 29,5; 29,5;	0,175	0,5		
4	525	30000	14,6	20; 15; 17; 22; 12; 30; 11; 10; 27; 9; 18; 22; 20; 29; 11; 18; 14; 26; 13; 17; 30; 23; 24; 18; 21; 26;	0,263	0,75		
5	620	12000	8,8	6; 7; 8; 4; 8; 4; 4; 9; 6; 8; 8; 9; 12; 3; 6; 4; 9; 3; 4; 2; 9; 2; 7; 5; 4; 8;	0,31	0,88		
6	700	10000	1,16	6; 6; 7; 8; 9; 7; 9; 5; 10; 9; 3; 4; 10; 7; 6; 9; 7; 9; 8; 9; 5; 5; 10; 3; 7; 7;	0,35	0,99		

Таблица 3.2 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при отключении ПРТР элегазовым выключателем - ток электролиза 200 кА (АО «РУСАЛ Саяногорск»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (отключение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	12500	12	12,5; 11; 9; 8; 10; 10; 11; 9; 11; 5; 6; 12,5; 11; 11; 7; 9; 5; 10; 7; 10; 7; 7; 6; 8; 6; 10;	0,0175	0,05	Приложение №2. Рисунок П2.2	Приложение №2. Рисунок П2.3
2	175	13000	30,5	9; 10; 12; 12; 9; 6; 5; 13; 6; 4; 12; 13; 10; 6; 11; 12; 5; 5; 10; 10; 8; 9; 10; 4; 12; 5;	0,0875	0,25		
3	350	15500	19,6	15,5; 14; 9; 11; 13; 8; 14; 11; 11; 15,5; 9; 10; 11; 11; 14; 13; 9; 13; 11; 13; 13; 12; 11; 8; 15,5; 10;	0,175	0,5		
4	525	25000	14,6	17; 19; 14; 14; 17; 12; 10; 25; 12; 8; 24; 25; 20; 11; 21; 23; 10; 10; 19; 20; 15; 17; 20; 8; 23; 9;	0,263	0,75		
5	620	17500	8,8	11; 14,5; 10; 14; 12; 12; 13; 14; 9; 11; 12; 10; 14,5; 9; 13; 14; 11; 17,5; 12; 8; 13; 12; 12; 14; 10; 11;	0,31	0,88		
6	700	13500	1,16	9; 10; 11; 8; 13,5; 11; 12; 9; 10; 11; 13,5; 12; 10; 13,5; 11; 11; 9; 8; 12; 12; 11; 8; 9; 12; 10; 13,5;	0,35	0,99		

Таблица 3.3 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при включении ПРТР вакуумным выключателем - ток электролиза 200 кА (АО «РУСАЛ Новокузнецк»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (включение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	12000	10,4	6; 8; 12; 12; 10; 11; 9; 8; 9; 12; 11; 12; 8; 8; 8; 12; 11; 6; 12; 7; 8; 8; 11; 8; 12; 11;	0,0175	0,05	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.1	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.3
2	175	15000	30	9; 13; 12; 15; 15; 12; 11; 13; 15; 9; 12; 11; 13; 12; 12; 11; 12; 9; 15; 11; 13; 12; 9; 13; 12; 9;	0,0875	0,25		
3	350	31000	16,3	31; 13; 16; 23; 19; 31; 24; 16; 19; 17; 28; 26; 13; 12; 31; 24; 27; 12; 23; 28; 13; 19; 22; 30; 24; 27;	0,175	0,5		
4	525	33000	14,6	25; 21; 33; 20; 21; 26; 27; 33; 24; 30; 22; 18; 16; 14; 27; 12; 28; 16; 24; 27; 16; 25; 18; 33; 30; 20;	0,263	0,75		
5	620	17000	9,06	17; 16; 13; 12; 14; 13; 16; 16; 12; 14; 16; 17; 12; 10; 11; 11; 16; 13; 11; 13; 12; 10; 13; 15; 17; 16;	0,31	0,88		
6	700	11000	1,15	8; 6; 11; 4; 4; 8; 9; 4; 11; 6; 8; 9; 3; 3; 6; 9; 4; 9; 4; 11; 3; 11; 4; 5; 7; 8;	0,35	0,99		

Таблица 3.4 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при отключении ПРТР вакуумным выключателем - ток электролиза 200 кА (АО «РУСАЛ Новокузнецк»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (отключение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, A$	Максимальное коммутационное напряжение, U_{max}, B	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	17000	10,4	9; 11; 17; 16; 13; 14; 14; 11; 12; 16; 14; 16; 11; 11; 10; 16; 14; 9; 17; 9; 11; 11; 16; 11; 17; 15;	0,0175	0,05	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.2	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.3
2	175	21000	30	13; 18; 10; 6; 9; 12; 13; 15; 7; 6; 13; 20; 19; 7; 10; 19; 7; 12; 13; 14; 16; 6; 20; 13; 17; 21;	0,0875	0,25		
3	350	36000	16,3	20; 19; 30; 36; 19; 16; 27; 27; 33; 33; 35; 11; 36; 30; 18; 23; 27; 34; 32; 13; 23; 19; 21; 33; 36; 14;	0,175	0,5		
4	525	42000	14,6	14; 23; 10; 31; 29; 42; 31; 28; 39; 29; 17; 23; 31; 25; 33; 42; 35; 41; 39; 28; 38; 17; 8; 24; 11; 40;	0,263	0,75		
5	620	21000	9,06	13; 12; 15; 16; 19; 14; 19; 10; 21; 20; 8; 9; 21; 14; 12; 19; 15; 19; 16; 21; 11; 10; 21; 8; 14; 15;	0,31	0,88		
6	700	18000	1,15	10; 12; 13; 9; 13; 13; 14; 10; 11; 13; 16; 14; 11; 12; 13; 13; 10; 18; 14; 14; 13; 18; 10; 14; 17; 11;	0,35	0,99		

Таблица 3.5 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при включении ПРТР элегазовым выключателем - ток электролиза 400 кА (АО «РУСАЛ Саяногорск»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (включение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	10000	12	8; 6; 4; 5; 7; 9; 6; 10; 8; 5; 7; 10; 8; 8; 10; 5; 10; 9; 9; 6; 7; 9; 7; 5; 8; 10;	0,0175	0,05	Приложение №2. Рисунок П2.1	Приложение №2. Рисунок П2.3
2	175	9000	30,5	8; 6; 9; 5; 9; 7; 8; 5; 9; 8; 5; 7; 9; 5; 8; 5; 5; 8; 9; 8; 5; 5; 8; 6; 7; 5;	0,0875	0,25		
3	350	30000	19,6	15; 12; 18; 18; 17; 30; 22; 27; 15; 29; 22; 15; 30; 15; 22; 28; 16; 18; 29; 15; 30; 18; 17; 29; 28; 29;	0,175	0,5		
4	525	31000	14,6	26; 14; 16; 21; 12; 31; 12; 19; 25; 19; 17; 23; 19; 28; 10; 17; 13; 25; 15; 16; 31; 22; 25; 18; 22; 31;	0,263	0,75		
5	620	12500	8,8	5; 7; 8; 6; 6; 4; 4; 8; 7; 8; 9; 10; 12,5; 5; 6; 4; 7; 8; 12,5; 12; 9; 12,5; 7; 6; 7; 7;	0,31	0,88		
6	700	9500	1,16	8; 4; 6; 9; 9,5; 7; 9,5; 6; 9; 9; 5; 5; 9,5; 5; 7; 8; 7; 9,5; 8; 9; 6; 5; 9,5; 5; 5; 6;	0,35	0,99		

Таблица 3.6 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при отключении ПРТР элегазовым выключателем - ток электролиза 400 кА (АО «РУСАЛ Саяногорск»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (отключение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	13000	12	11; 12; 10; 7; 13; 7; 10; 10; 13; 7; 6; 10; 10; 12; 6; 11; 6; 6; 9; 8; 13; 6; 5; 7; 5; 9;	0,0175	0,05	Приложение №2. Рисунок П2.2	Приложение №2. Рисунок П2.3
2	175	14000	30,5	8; 11; 14; 10; 7; 8; 6; 14; 7; 5; 10; 12; 12; 14; 10; 13; 8; 5; 7; 11; 9; 7; 14; 5; 7; 8;	0,0875	0,25		
3	350	17000	19,6	15; 10; 11; 17; 10; 8; 11; 17; 7; 17; 6; 11; 10; 12; 12; 11; 12; 17; 10; 14; 13; 12; 12; 9; 13; 11;	0,175	0,5		
4	525	26000	14,6	18; 18; 13; 15; 26; 10; 8; 20; 26; 9; 17; 24; 26; 10; 16; 24; 9; 16; 26; 18; 16; 21; 7; 24; 10; 9;	0,263	0,75		
5	620	16000	8,8	10; 15; 12; 16; 10; 14; 11; 16; 9; 9; 14; 8; 15; 10; 16; 11; 12; 15; 16; 8; 9; 11; 13; 13; 11; 11;	0,31	0,88		
6	700	14000	1,16	8; 11; 14; 9; 10; 10; 13; 12; 10; 10; 14; 13; 9; 13; 13; 10; 14; 8; 8; 9; 12; 9; 9; 10; 14; 10;	0,35	0,99		

Таблица 3.7 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при включении ПРТР вакуумным выключателем - ток электролиза 400 кА (АО «РУСАЛ Новокузнецк»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (включение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, А$	Максимальное коммутационное напряжение, $U_{max}, В$	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з.в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з.тр}$		
1	35	17000	10,4	7; 7; 13; 13; 10; 12; 8; 8; 8; 12; 12; 13; 8; 9; 8; 12; 10; 7; 13; 7; 7; 7; 11; 10; 17; 12;	0,0175	0,05	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.1	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.3
2	175	19000	30	9; 16; 12; 16; 16; 10; 11; 10; 15; 9; 13; 11; 13; 17; 14; 11; 10; 19; 16; 10; 13; 13; 9; 14; 12; 8;	0,0875	0,25		
3	350	35000	16,3	35; 17; 18; 21; 19; 32; 22; 17; 19; 20; 28; 28; 33; 10; 31; 14; 28; 10; 33; 30; 10; 10; 23; 20; 25; 24;	0,175	0,5		
4	525	37000	14,6	26; 20; 35; 26; 20; 37; 37; 30; 36; 36; 28; 16; 16; 16; 25; 18; 22; 16; 20; 28; 19; 20; 18; 35; 37; 37;	0,263	0,75		
5	620	18000	9,06	17; 18; 16; 10; 10; 17; 18; 10; 18; 15; 15; 16; 13; 12; 10; 12; 12; 12; 10; 12; 13; 10; 13; 16; 16; 16;	0,31	0,88		
6	700	12000	1,15	12; 5; 11; 5; 6; 8; 5; 5; 11; 5; 10; 10; 6; 5; 5; 7; 5; 8; 12; 12; 3; 10; 4; 4; 6; 6;	0,35	0,99		

Таблица 3.8 – Показатели режимов коммутационных перенапряжений при отключении ПРТР вакуумным выключателем - ток электролиза 400 кА (АО «РУСАЛ Новокузнецк»)

№ п/п	Измеряемые показатели			Расчетные показатели			Характерные осциллограммы перенапряжений (отключение ПРТР)	Характерные осциллограммы и гармонический состав тока нагрузки
	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, A$	Максимальное коммутационное напряжение, U_{max}, B	Суммарный коэф. гармонического состава тока нагрузки, $K_1, \%$	Коммутационные перенапряжения, $U, кВ$	Коэф. загрузки выключателя, $K_{з,в}$	Коэф. загрузки тр-ра, $K_{з,тр}$		
1	35	18000	10,4	12; 10; 15; 18; 12; 13; 18; 10; 13; 17; 13; 18; 10; 10; 12; 17; 11; 12; 15; 10; 16; 16; 17; 10; 12; 13;	0,0175	0,05	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.2	Приложение № 3. Рисунок ПЗ.3
2	175	21000	30	15; 16; 11; 10; 10; 10; 21; 9; 4; 9; 21; 15; 8; 10; 14; 12; 11; 12; 14; 15; 8; 21; 11; 15; 18; 16;	0,0875	0,25		
3	350	35000	16,3	26; 16; 35; 30; 12; 16; 28; 26; 35; 35; 30; 11; 30; 30; 28; 23; 17; 21; 32; 33; 23; 29; 11; 32; 35; 14;	0,175	0,5		
4	525	39000	14,6	14; 13; 20; 21; 39; 10; 31; 18; 19; 39; 27; 23; 32; 26; 38; 10; 25; 10; 39; 18; 28; 27; 10; 14; 11; 30;	0,263	0,75		
5	620	20000	9,06	18; 18; 10; 10; 18; 14; 18; 16; 20; 20; 18; 19; 11; 12; 20; 19; 15; 10; 16; 11; 20; 12; 20; 18; 10; 12;	0,31	0,88		
6	700	16000	1,15	16; 10; 15; 9; 15; 15; 10; 16; 13; 13; 16; 12; 12; 12; 15; 10; 10; 15; 13; 13; 15; 12; 12; 13; 13; 12;	0,35	0,99		

На основании данных табл. 3.1-3.8 определены статистические характеристики коммутационных перенапряжений в соответствии с положениями методики экспериментальных исследований (гл. 2).

3.2 Статистические характеристики коммутационных перенапряжений

На основании статистической обработки экспериментальных данных по коммутационным перенапряжениям, выполненной в соответствии с положениями методики экспериментальных исследований (гл. 2), сформированы статистические выборки (Приложение 5) и определены статистические характеристики кратностей коммутационных перенапряжений ($K_{п}$) при включении, отключении ПРТР элегазовыми и вакуумными выключателями при токах электролиза 200 и 400 кА, приведенные в табл. 3.9-3.16.

Таблица 3.9 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем (ток электролиза 200 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{п}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.max}$
1	35	26	0,64	0,043	0,21	0,293	0,95
2	175	26	0,68	0,042	0,23	0,292	0,9
3	350	26	2,04	0,370	0,58	0,209	2,95
4	525	26	1,85	0,411	0,67	0,332	3,0
5	620	26	0,67	0,058	0,28	0,414	1,2
6	700	26	0,71	0,044	0,21	0,294	1,0

Таблица 3.10 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем (ток электролиза 200 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{п}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.мах}$
1	35	26	0,94	0,048	0,22	0,247	1,25
2	175	26	0,91	0,095	0,28	0,341	1,3
3	350	26	1,17	0,047	0,24	0,184	1,55
4	525	26	1,61	0,269	0,48	0,334	2,5
5	620	26	1,18	0,039	0,26	0,165	1,75
6	700	26	1,07	0,019	0,18	0,133	1,35

Таблица 3.11 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем (ток электролиза 200 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{п}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.мах}$
1	35	26	0,97	0,04	0,19	0,209	1,2
2	175	26	1,21	0,026	0,18	0,138	1,5
3	350	26	2,17	0,399	0,64	0,288	3,1
4	525	26	2,34	0,337	0,58	0,246	3,3
5	620	26	1,39	0,052	0,22	0,166	1,7
6	700	26	0,62	0,057	0,24	0,412	1,1

Таблица 3.12 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем (ток электролиза 200 кА)

№ п/п	Ток Нагрузки ПРТР $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{п}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.мах}$
1	35	26	1,31	0,212	0,28	0,275	1,7
2	175	26	1,3	0,262	0,42	0,405	2,1
3	350	26	2,63	0,603	0,71	0,308	3,6

4	525	26	2,87	1,020	0,91	0,366	4,2
5	620	26	1,46	0,183	0,39	0,280	2,1
6	700	26	1,23	0,058	0,26	0,187	1,8

Таблица 3.13 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем (ток электролиза 400 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{\text{нагр}}, \text{A}$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{\text{п}}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{\text{п.мах}}$
1	35	26	0,73	0,029	0,19	0,225	1,0
2	175	26	0,71	0,023	0,15	0,212	0,9
3	350	26	2,14	0,392	0,67	0,304	3,0
4	525	26	2,03	0,381	0,62	0,31	3,1
5	620	26	0,78	0,059	0,24	0,391	1,25
6	700	26	0,71	0,033	0,18	0,253	0,95

Таблица 3.14 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем (ток электролиза 400 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{\text{нагр}}, \text{A}$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K_{\text{п}}}$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{\text{п.мах}}$
1	35	26	0,91	0,072	0,23	0,291	1,3
2	175	26	0,95	0,089	0,28	0,323	1,4
3	350	26	1,14	0,075	0,27	0,23	1,7
4	525	26	1,73	0,653	0,59	0,673	2,6
5	620	26	1,1	0,129	0,24	0,547	1,6
6	700	26	1,05	0,043	0,19	0,192	1,4

Таблица 3.15 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем (ток электролиза 400 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K}_п$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.мах}$
1	35	26	1,01	0,053	0,27	0,235	1,7
2	175	26	1,27	0,057	0,31	0,2	1,9
3	350	26	2,24	0,422	0,78	0,297	3,5
4	525	26	2,73	0,629	0,71	0,328	3,7
5	620	26	1,31	0,083	0,29	0,217	1,8
6	700	26	0,68	0,081	0,27	0,4	1,2

Таблица 3.16 – Статистические характеристики коммутационных перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем (ток электролиза 400 кА)

№ п/п	Тип нагрузки и $I_{нагр}, A$	Объём выборки, N	Среднее значение, $\overline{K}_п$	Дисперсия, D	Стандартное отклонение, σ	Коэффициент вариации, V	Максимальная кратность перенапряжения, $K_{п.мах}$
1	35	26	1,33	1,087	0,31	0,218	1,8
2	175	26	1,27	0,164	0,43	0,312	2,1
3	350	26	2,57	0,522	0,76	0,286	3,5
4	525	26	2,38	0,92	0,92	0,35	3,9
5	620	26	1,42	0,143	0,36	0,242	2,0
6	700	26	1,25	0,047	0,23	0,164	1,6

Анализ данных табл. 3.9 – 3.16 показывает, что максимальная кратность коммутационных перенапряжений ($K_{п.мах}$) при включении ПРТР элегазовым выключателем при токе электролиза 200 кА находится в диапазоне от 0,95 до 3,0 U_H , при отключении ПРТР $K_{п.мах}$ находится в диапазоне от 1,25 до 2,5 U_H (табл. 3.9-3.10).

При включении ПРТР вакуумным выключателем при токе электролиза 200 кА значение $K_{п.мах}$ находится в диапазоне от 1,1 до 3,3 U_H , при отключении ПРТР $K_{п.мах}$ находится в диапазоне от 1,7 до 4,2 U_H (табл. 3.11-3.12).

При включении ПРТР элегазовым выключателем при токе электролиза 400 кА значение $K_{п.маx}$ находится в диапазоне от 0,9 до 3,1 U_n , при отключении ПРТР $K_{п.маx}$ находится в диапазоне от 1,3 до 2,6 U_n (табл. 3.13-3.14).

При включении ПРТР вакуумным выключателем при токе электролиза 400 кА значение $K_{п.маx}$ находится в диапазоне от 1,2 до 3,7 U_n , при отключении ПРТР $K_{п.маx}$ находится в диапазоне от 1,6 до 3,9 U_n (табл. 3.15-3.16).

В работах [24, 31, 50, 62, 84, 85] обоснованы предельно допустимые значения кратности коммутационных перенапряжений $K_{п.маx}$, которые выдерживает изоляция обмоток электродвигателей и трансформаторов. Указанная кратность коммутационных перенапряжений составляет: для электродвигателей $K_{п.доп} = 1,8$, для трансформаторов $K_{п.доп} = 2,8$.

Полученные значения кратности коммутационных перенапряжений не противоречат требованиям ПУЭ относительно испытаний электродвигателей и трансформаторов повышенным напряжением. Фактическое испытательное напряжение для электродвигателей 10 кВ находится в диапазоне (1,73 – 2,0) U_n , и определяется в основном, типом электродвигателей. Для трансформаторов испытательное напряжение варьируется в диапазоне от (2,16 – 3,75) U_n и зависит от класса напряжения сети, а также типа изоляции (нормальная или облегченная).

В процессе коммутации преобразовательных трансформаторов элегазовыми или вакуумными выключателями условиях предприятиях по производству алюминия максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений составляют, соответственно, 3,1 U_n , 4,2 U_n при токе нагрузки 525 А, что соответствует коэффициенту загрузки преобразовательного трансформатора равному 0,75.

При этом максимальное значения $K_{п.маx} = 3,1$ имеет место при включении преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем, значение $K_{п.маx} = 4,2$ – при отключении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем.

В соответствии с положениями методики экспериментальных исследований в дальнейшем выполняется анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений.

3.3 Анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений на наличие «выбросов»

Анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений проведен с применением критерием Граббса. Применение данного критерия позволяет выявлять статистически ненадёжные экстремальные значения и при необходимости осуществлять «очищение» выборок от выбросов. Такой подход обеспечивает повышение качества исходных данных, что особенно важно при построении вероятностных моделей коммутационных перенапряжений. Проверка по критерию Граббса подтверждает статистическую обоснованность зафиксированных экстремальных значений, что гарантирует корректность дальнейших расчётов и достоверность формируемых выводов исследования.

Для статистической выборки определялось стандартизированное отклонение максимального значения вычислялось по выражению 2.1:

$$G_{max} = \frac{|K_{п.max} - \overline{K_{п}}|}{\sigma}, \quad (3.1)$$

где:

- G_{max} - стандартизированное отклонение максимального значения кратности коммутационного перенапряжения;
- $K_{п.max}$ - максимальное значение кратности коммутационных перенапряжений;
- $\overline{K_{п}}$ - среднее арифметическое значение кратности коммутационных перенапряжений в выборке;
- σ - среднеквадратическое (стандартное) отклонение, отражающее рассеяние значений относительно среднего.

Стандартизированное отклонение максимального значения вычислялось по выражению:

$$G_{min} = \frac{|K_{п.min} - \bar{K}_{п}|}{\sigma}, \quad (3.2)$$

где:

- G_{min} - стандартизированное отклонение минимального значения кратности коммутационного перенапряжения;
- $K_{п.min}$ - минимальное значение кратности коммутационных перенапряжений;
- $\bar{K}_{п}$ - среднее арифметическое значение кратности коммутационных перенапряжений в выборке;
- σ - среднеквадратическое (стандартное) отклонение, отражающее рассеяние значений относительно среднего.

Величины G_{max} и G_{min} отражают нормированную меру отклонения наибольшего и наименьшего наблюдения от математического ожидания кратности коммутационных перенапряжений.

Для проверки наличия статистических выбросов вычисленные значения G_{max} и G_{min} сравнивались с критическим значением критерия Граббса ($G_{кр}$), которое определяется как функция объёма выборки N и уровня доверительной вероятности $1 - \alpha$.

Критическое значение $G_{кр}$ рассчитывалось по выражению 2.3:

$$G_{кр} = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{t^2 \left(\frac{\alpha}{2n}, n-2\right)}{n-2+t^2 \left(\frac{\alpha}{2n}, n-2\right)}} \quad (3.3)$$

Для выборок объёмом $N = 26$ и уровня доверительной вероятности 0,95 критическое значение критерия Граббса $G_{кр}$ составляет 2,87.

Если выполняются условия $G_{max} < G_{кр}$ и $G_{min} < G_{кр}$, то в выборке отсутствуют выбросы.

Сравнение рассчитанных показателей критерия Граббса для выборок кратностей коммутационных перенапряжений приведены в табл. 3.17

Таблица 3.17 – Проверка на выбросы (первое приближение)

Ток электролиза 200 кА - Элегазовый выключатель					
Режим	Нагрузка (А)	G_{min}	G_{max}	$G_{кр}$	Вывод
Включение	35	1,69	1,64	2,87	Выбросов нет
Включение	175	1,58	1,4	2,87	Выбросов нет
Включение	350	1,67	1,67	2,87	Выбросов нет
Включение	525	1,49	1,57	2,87	Выбросов нет
Включение	620	1,92	2,57	2,87	Выбросов нет
Включение	700	1,59	1,57	2,87	Выбросов нет
Отключение	35	0,57	0,71	2,87	Выбросов нет
Отключение	175	0,71	0,85	2,87	Выбросов нет
Отключение	350	0,57	0,71	2,87	Выбросов нет
Отключение	525	0,71	0,85	2,87	Выбросов нет
Отключение	620	0,57	0,71	2,87	Выбросов нет
Отключение	700	0,57	0,71	2,87	Выбросов нет
Ток электролиза 200 кА - Вакуумный выключатель					
Режим	Нагрузка (А)	G_{min}	G_{max}	$G_{кр}$	Вывод
Включение	35	1,14	1,28	2,87	Выбросов нет
Включение	175	1,43	1,57	2,87	Выбросов нет
Включение	350	1,14	1,28	2,87	Выбросов нет
Включение	525	1,42	1,57	2,87	Выбросов нет
Включение	620	1,14	1,28	2,87	Выбросов нет
Включение	700	1,14	1,28	2,87	Выбросов нет
Отключение	35	1,07	1,61	2,87	Выбросов нет
Отключение	175	0,84	1,84	2,87	Выбросов нет
Отключение	350	1,15	2,07	2,87	Выбросов нет
Отключение	525	1,38	2,83	2,87	Выбросов нет
Отключение	620	0,84	1,69	2,87	Выбросов нет
Отключение	700	0,77	1,23	2,87	Выбросов нет
Ток электролиза 400 кА - Элегазовый выключатель					
Режим	Нагрузка (А)	G_{min}	G_{max}	$G_{кр}$	Вывод
Включение	35	0,85	1,23	2,87	Выбросов нет
Включение	175	0,62	1,07	2,87	Выбросов нет
Включение	350	1,15	2,07	2,87	Выбросов нет
Включение	525	1,53	2,31	2,87	Выбросов нет
Включение	620	0,69	1,54	2,87	Выбросов нет
Включение	700	0,62	1,15	2,87	Выбросов нет
Отключение	35	0,71	1,28	2,87	Выбросов нет
Отключение	175	0,57	1,43	2,87	Выбросов нет
Отключение	350	0,62	1,73	2,87	Выбросов нет
Отключение	525	0,85	2,62	2,87	Выбросов нет
Отключение	620	0,77	1,54	2,87	Выбросов нет
Отключение	700	0,69	1,46	2,87	Выбросов нет

Ток электролиза 400 кА - Вакуумный выключатель					
Режим	Нагрузка (А)	G_{\min}	G_{\max}	$G_{\text{кр}}$	Вывод
Включение	35	0,85	1,69	2,87	Выбросов нет
Включение	175	0,76	1,92	2,87	Выбросов нет
Включение	350	1,15	2,13	2,87	Выбросов нет
Включение	525	1,38	2,21	2,87	Выбросов нет
Включение	620	0,85	1,61	2,87	Выбросов нет
Включение	700	0,69	1,53	2,87	Выбросов нет
Отключение	35	0,96	1,23	2,87	Выбросов нет
Отключение	175	1,07	1,84	2,87	Выбросов нет
Отключение	350	1,15	2,07	2,87	Выбросов нет
Отключение	525	1,38	2,43	2,87	Выбросов нет
Отключение	620	0,85	1,69	2,87	Выбросов нет
Отключение	700	0,76	1,23	2,87	Выбросов нет

Данные табл. 3.17 подтверждают отсутствие статистически значимых выбросов во всех статистических выборках по первому приближению, так как значения G_{\max} и G_{\min} для всех выборок находятся ниже критического уровня $G_{\text{кр}} = 2,87$.

3.4 Анализ статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений на принадлежность к генеральной совокупности

Анализ статистических выборок на принадлежность к генеральной совокупности проводился для предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк» с применением непараметрического критерия Вандер-Вардена в соответствии с выражением 2.4:

$$X_{\text{эмп}} = \sum_{i=1}^{n=2} \psi \left(\frac{R_i}{n_1 + n_2 + 1} \right), \quad (3.4)$$

где ψ – квантиль стандартного нормального закона;

R_i – ранг i -го наблюдения каждой из выборок;

n_1 – первая выборка кратностей коммутационных перенапряжений, полученных при коммутации ПРТР на АО «РУСАЛ Саяногорск»;

n_2 – вторая выборка кратностей коммутационных перенапряжений, полученных при коммутации ПРТР на АО «РУСАЛ Новокузнецк».

Проверена гипотеза об отсутствии различий в выборках кратностей коммутационных перенапряжений применительно к предприятиям АО «РУСАЛ».

Результаты проверки гипотезы об отсутствии различий в выборках кратностей коммутационных перенапряжений представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Проверка гипотез об отсутствии различий в выборках значений кратностей коммутационных перенапряжений

№, п/п	Нагрузка преобразовательного тр-ра $I_{нагр}, A$	Сравниваемые выборки кратностей коммутационных перенапряжений для предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк»		Значения критерия Ван-дер-Вардена		Вывод по гипотезе
				$X_{эмп}$	$X_{кр}$	
Режим: включение. Ток электролиза 200 кА						
1	35	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	15	3,84	Не принимается
2	175	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	26,3	3,84	Не принимается
3	350	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	4,2	3,84	Не принимается
4	525	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	4,5	3,84	Не принимается
5	620	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	26,5	3,84	Не принимается
6	700	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	16	3,84	Не принимается
Режим: отключение. Ток электролиза 200 кА						
7	35	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	18,6	3,84	Не принимается
8	175	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	10,6	3,84	Не принимается
9	350	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	25,5	3,84	Не принимается
10	525	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	15	3,84	Не принимается
11	620	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	5,7	3,84	Не принимается
12	700	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	9,3	3,84	Не принимается
Режим: включение. Ток электролиза 400 кА						
13	35	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	9,7	3,84	Не принимается
14	175	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	25,8	3,84	Не принимается

Продолжение табл. 3.18

15	350	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	15	3,84	Принимается
16	525	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	21,3	3,84	Не принимается
17	620	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	23,3	3,84	Не принимается
18	700	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	10	3,84	Принимается
Режим: отключение. Ток электролиза 400 кА						
19	35	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	17,8	3,84	Не принимается
20	175	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	8,9	3,84	Не принимается
21	350	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	22,1	3,84	Не принимается
22	525	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	5,7	3,84	Не принимается
23	620	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	10,2	3,84	Не принимается
24	700	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	9	3,84	Не принимается
25	35	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Новокузнецк»	17,8	3,84	Не принимается

Данные таблицы 3.18 показывают, что расчетные значения критерия Ван-дер-Вардена ($X_{эмп}$) больше критических значений ($X_{кр}$). В этом случае с доверительной вероятностью 0,95 гипотеза о принадлежности статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений к генеральной совокупности отвергается.

3.5 Зависимости коммутационных перенапряжений от тока нагрузки

На основании статистической обработки экспериментальных данных, приведенных в табл. 3.9-3.16, построены эмпирические зависимости $K_{п.маx} = f(I_{нагр})$, $K_{п.маx} = f(K_{з.тр})$ и $K_{п.маx} = f(K_{з.в})$, которые представлены на рис. 3.3-3.4 для элегазовых и вакуумных выключателей.

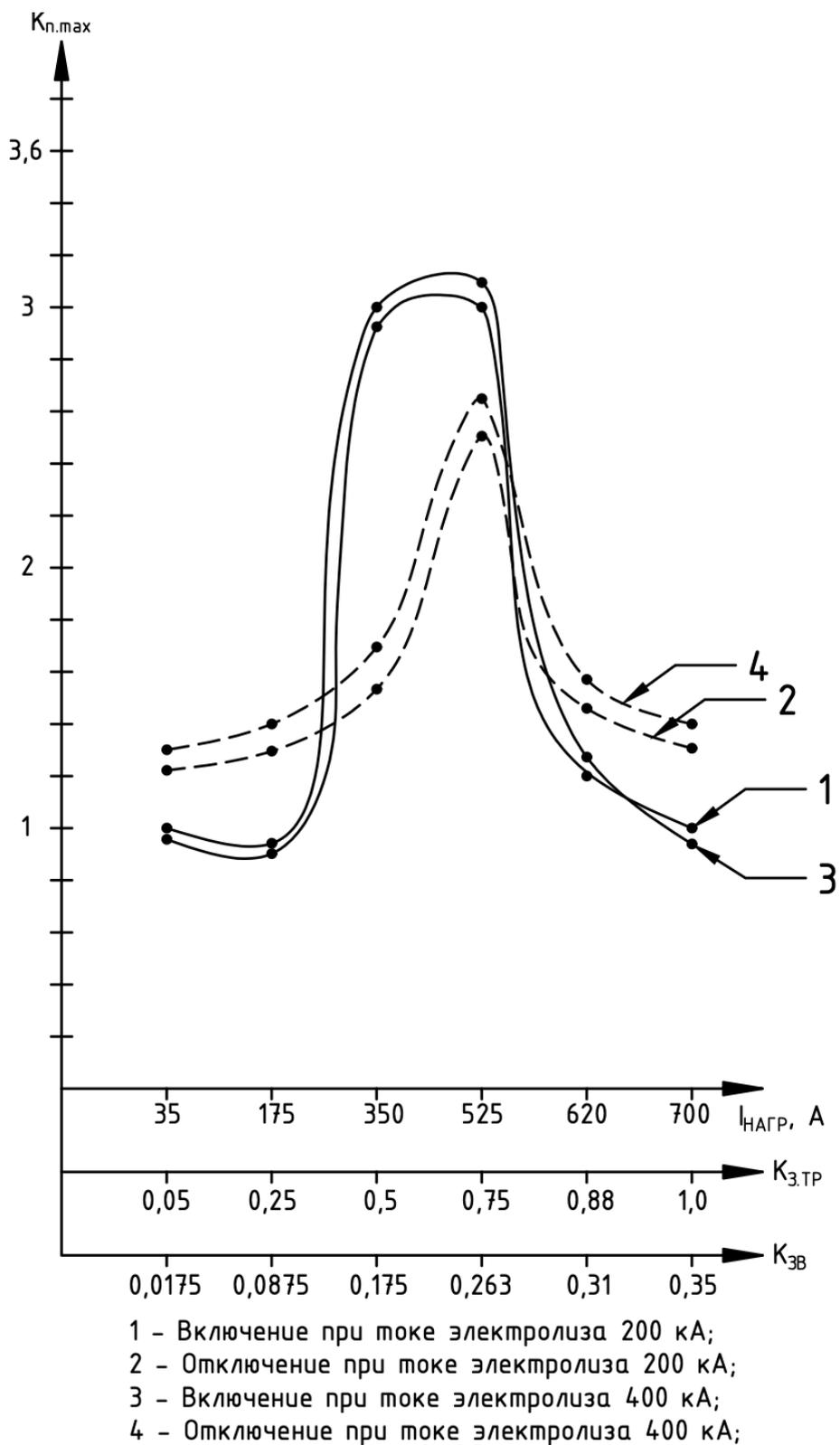


Рисунок 3.3 – Эмпирические зависимости максимальных кратностей коммутационных перенапряжений $K_{п.маx}$ от тока нагрузки ПРТР $I_{нагр}$, коэффициента загрузки трансформатора $K_{з.тр}$ и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$ при коммутации преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем

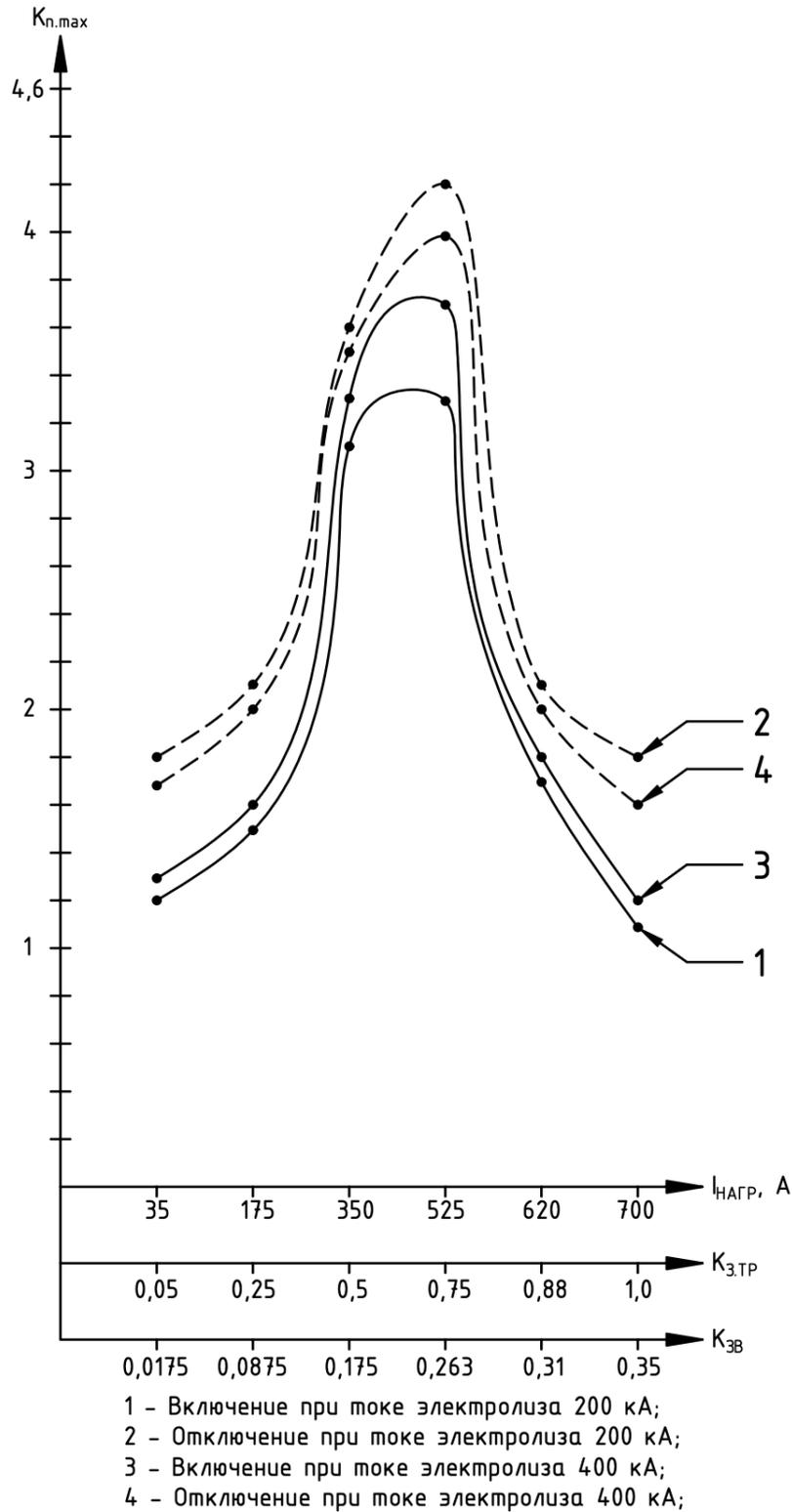


Рисунок 3.4 – Эмпирические зависимости максимальных кратностей коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от тока нагрузки ПРТР $I_{нагр}$, коэффициента загрузки трансформатора $K_{з.тр}$ и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$ при коммутации преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3.3-3.4 свидетельствует о том, что при увеличении тока нагрузки преобразовательного трансформатора с 35 А до 525 А (что соответствует изменению коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора от 0,05 до 0,75) наблюдается возрастание кратности коммутационных перенапряжений ($K_{п.маx}$) при включении, отключении ПРТР. При дальнейшем росте тока нагрузки до 700 А ($K_{з.тр}$ находится в диапазоне 0,75-1,0) наблюдается снижение $K_{п.маx}$.

Полученные эмпирические зависимости не исследованы ранее.

Исследования проводились для трансформаторов 35/6(10) кВ, 10/6 кВ, 10(6)/0,4 кВ, при этом номинальные токи выключателей не превышали максимальных значений токов нагрузки в 1,6 раза.

Первой особенностью преобразовательных трансформаторов является то, что их нагрузкой выступают выпрямительные агрегаты, в токе нагрузки которых всегда присутствуют гармонические составляющие.

Второй особенностью является то, что номинальные токи выключателей зачастую в три и более раза превышают максимальные токи нагрузки.

Согласно эмпирическим зависимостям, приведенных на рис. 3.3-3.4, с изменением коэффициента загрузки выключателей от 0,0175 до 0,263 кратность коммутационных перенапряжений возрастает до максимальных значений и противоречит общеизвестным закономерностям.

Дальнейшее увеличение тока нагрузки сопровождается резким снижением кратности коммутационных перенапряжений [117] и не противоречит общеизвестным закономерностям изменения величины перенапряжений при коммутации трансформаторов.

Характер зависимостей, приведенных на рис. 3.3-3.4 можно объяснить тем, что элегазовые и вакуумные выключатели обладают высокой диэлектрической прочностью [6, 11, 15]. В связи с этим, при токах нагрузки, величина которых менее 26% от номинального тока выключателя, угол коммутации при котором происходит обрыв электрической дуги в вакуумных или элегазовых камерах выключателей практически не меняется или меняется незначительно.

Это приводит к росту тока среза с увеличением тока нагрузки и как следствие к росту коммутационных перенапряжений. С дальнейшим увеличением тока нагрузки возрастает продолжительность горения дуги между контактами выключателя из-за более интенсивной ионизации и плотности паров металла в месте контактного пространства вакуумных или элегазовых камерах выключателя, что приводит к увеличению угла прерывания электрической дуги и, как следствие, снижению $K_{П}$ за счет снижения среза тока.

На рис.5 приведены эмпирические зависимости среза тока от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$

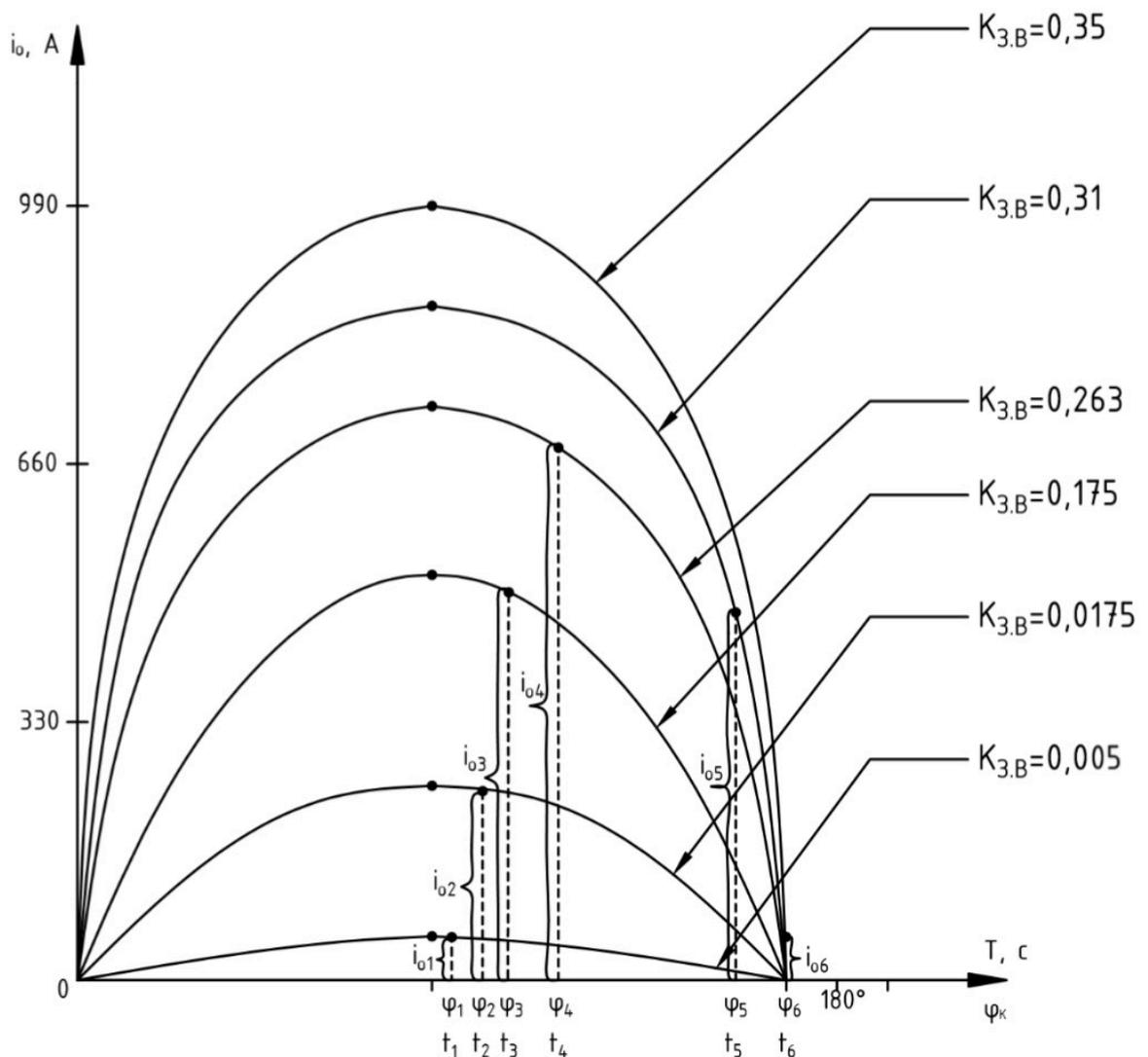


Рисунок 3.5 – Эмпирические зависимости среза тока от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$

При небольших коэффициентах загрузки выключателя от 0,0175 до 0,263 увеличение угла коммутации в выключателе возрастает гораздо медленнее ($\varphi_4 \geq \varphi_3 \geq \varphi_2 \geq \varphi_1$), если практически не меняется по сравнению с ростом тока среза, обусловленного ростом токов нагрузки. Это приводит к тому, что:

$$i_{0max} = i_{04} > i_{03} > i_{02} > i_{01}, \quad (3.8)$$

величина коммутационных перенапряжений возрастает при прочих равных условиях (L и C), так как

$$U(t) = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.9)$$

где, i_0 – срез тока, А;

L – индуктивность трансформатора, Гн;

C – емкость обмоток трансформатора по отношению к земле, Ф.

В результате:

$$U(t)_{max} = U(t)_4 > U(t)_3 > U(t)_2 > U(t)_1, \quad (3.10)$$

Дальнейшее увеличение тока нагрузки коэффициента загрузки выключателя, как было отмечено выше приводит к увеличению продолжительности горения дуги между контактами выключателя, то есть:

$$t_6 > t_5 > t_4 > t_3 > t_2 > t_1, \quad (3.11)$$

Это, в свою очередь, вызывает резкое увеличение угла прерывания электрической дуги между контактами выключателя (угла коммутации):

$$\varphi_6 > \varphi_5 > \varphi_4 > \varphi_3 > \varphi_2 > \varphi_1, \quad (3.12)$$

а так как мгновенное значение тока нагрузки стремится к естественному переходу через нулевые значения, увеличение угла коммутации будет сопровождаться резким снижением тока среза:

$$i_{06} < i_{05} < i_{04}, \quad (3.13)$$

и снижением величины коммутационных перенапряжений.

Увеличение токов нагрузки преобразовательных трансформаторов, не приводящих к повышению коэффициента загрузки элегазовых или вакуумных выключателей более 26%, будет сопровождаться ростом перенапряжений при их коммутации.

3.6 Влияние типа коммутации преобразовательного трансформатора на коммутационные перенапряжения

Согласно исследованиям [49, 87-89, 91, 102] практически все выключатели генерируют перенапряжения при коммутации трансформаторов.

Утверждается, что коммутационные перенапряжения, которые могут вызывать пробой изоляции обмоток трансформаторов возникают при их отключении [4, 5, 12, 14, 17, 18, 20, 23, 27, 29, 31, 46, 48].

Максимальные перенапряжения, вызывающие риск аварийного пробоя изоляции ПРТР, происходят при их отключении от сети в сетях 10 кВ вакуумными или элегазовыми выключателями вследствие возникновения среза тока в вакуумной или элегазовой камерах выключателей [11, 15, 17, 37, 54, 67, 70, 78, 85, 86].

Применительно к трансформаторам опасными считаются перенапряжения с кратностью более 2,8 [24, 27, 50, 62, 87].

В ходе экспериментальных исследований были зафиксированы коммутационные перенапряжения при включении преобразовательных трансформаторов, кратность которых превышает значение 2,8.

При включении элегазовых или вакуумных выключателей значения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов с кратностью более 2,8 наблюдаются, когда коэффициенты загрузки выключателей находятся в диапазоне 0,175 – 0,263, что не согласуется с выполненными исследованиями [27].

Использование элегазовых выключателей для коммутации преобразовательных трансформаторов приводит к более высоким перенапряжениям при их включении ($K_{п.мах} = 3,1$) по сравнению со значением ($K_{п.мах} = 2,6$) при их отключением от сети 10 кВ. Кратность коммутационных перенапряжений при включении практически на 20% выше кратности коммутационных перенапряжений при отключении.

Для вакуумных выключателей кратность перенапряжений при включении ($K_{п.маx} = 3,7$) ниже кратности перенапряжений при отключении ($K_{п.маx} = 4,2$) преобразовательных трансформаторов практически на 13,5%.

На рис. 3.6 и 3.7 приведены характерные осциллограммы, зафиксированные при включении преобразовательного трансформатора соответственно элегазовым и вакуумным выключателем при коэффициенте загрузки выключателя 0,263, что соответствует коэффициенту загрузки трансформатора равным 0,75.

Анализ осциллограмм показывает, что максимальные коммутационные перенапряжения при включении преобразовательного трансформатора обусловлены отскоком контактов в выключателе. Отскок контактов сопровождается кратковременным отключением трансформатора от сети, то есть при отскоке контактов возникает срез тока, аналогичный случаю отключения трансформатора от сети. Данное явление объясняет появление коммутационных перенапряжений при включении преобразовательных трансформаторов.

Осциллограммы также указывают на то, что с увеличением количества отскоков контактов приводит к более высоким коммутационным перенапряжениям. В вакуумном выключателе зафиксировано три отскока контактов, что приводит к возникновению коммутационных перенапряжений с кратностью 3,7, а в элегазовом выключателе – два отскока контактов, что обуславливает перенапряжение с кратностью 3,1.

Это объясняется, что с каждым последующим отскоком контактов энергия, запасенная в обмотках трансформатора (W_L), возрастает. В этом случае согласно выражениям [11, 15]:

$$U(t) = (2 W_L / C)^{-1/2} \quad (3.14)$$

где W_L – энергия, запасенная в обмотках трансформатора;

C – емкость обмоток трансформатора.

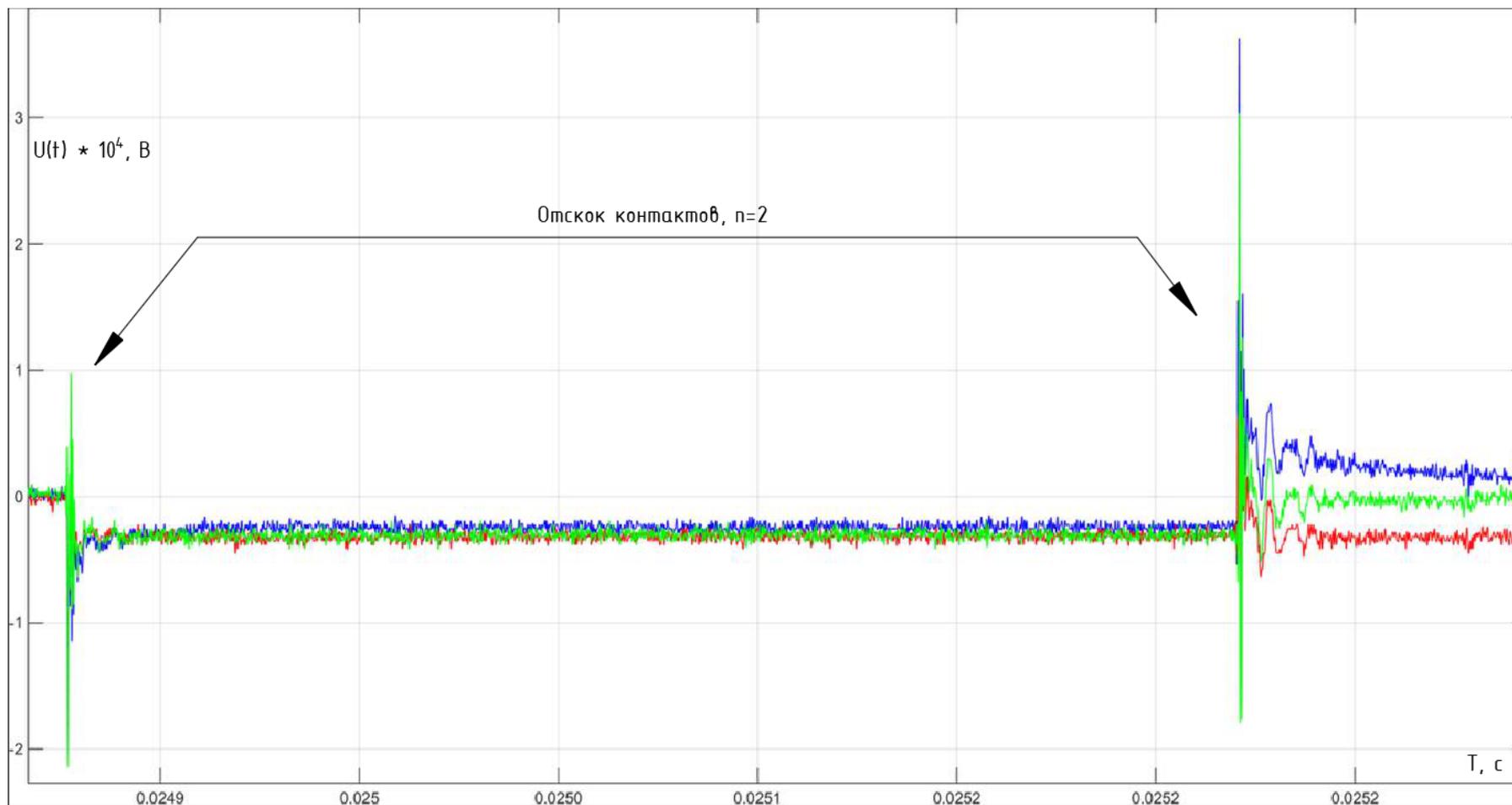


Рисунок 3.6 – Характерная осциллограмма при включении преобразовательного трансформатора с помощью элегазового выключателя

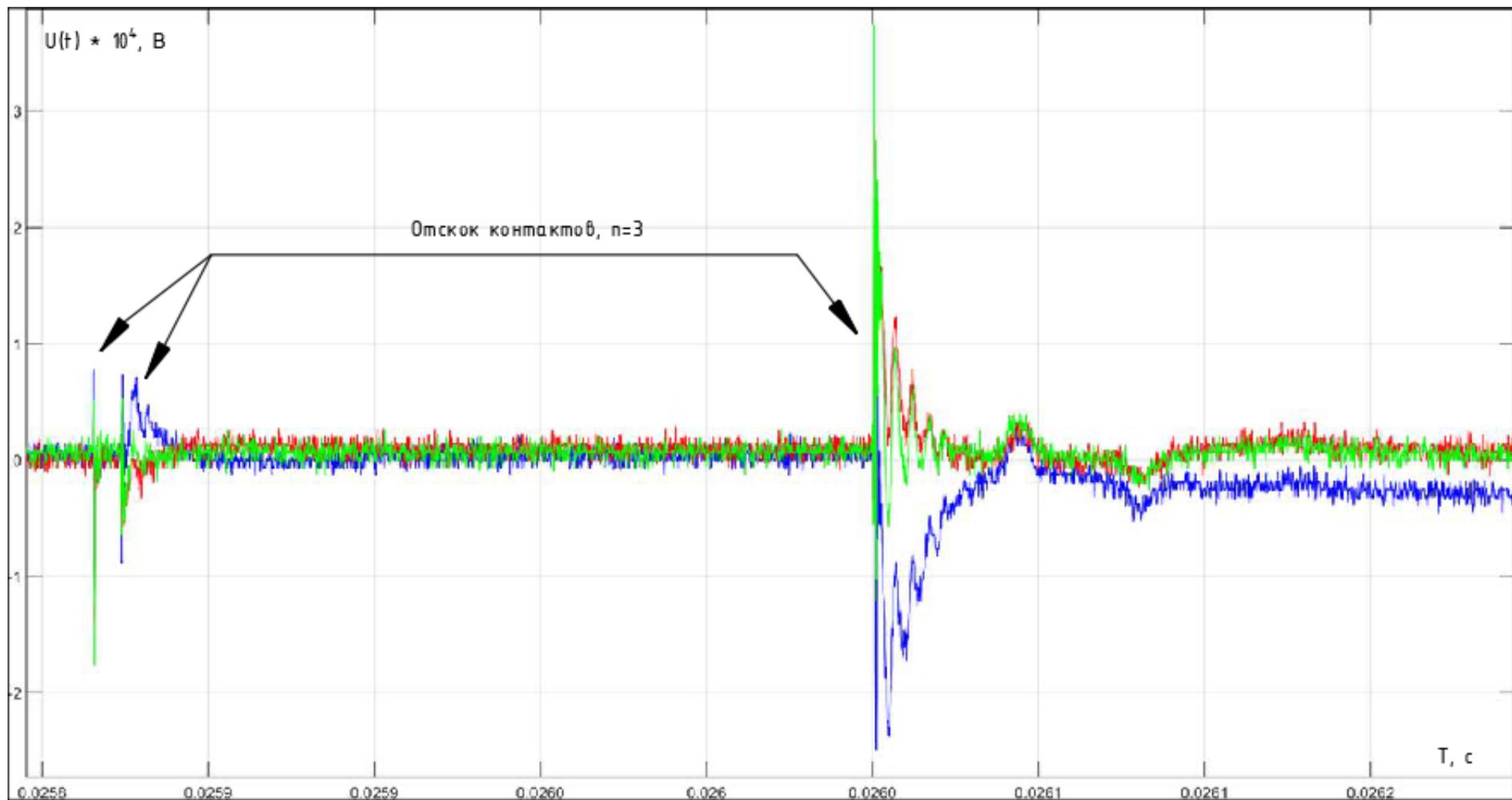


Рисунок 3.7 – Характерная осциллограмма при включении преобразовательного трансформатора с помощью вакуумного выключателя

Увеличение количества отскоков контактов приводит к росту тока среза за счет увеличения энергии, запасенной в обмотках трансформаторов.

Возникновение коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора обусловлено отскоком контактов, а величина данных перенапряжений зависит от количества отскока контактов: с увеличением их количества перенапряжение возрастает.

3.7 Влияние типа выключателей на перенапряжение при коммутации преобразовательного трансформатора

Анализ влияния типа выключателя на амплитуду перенапряжений при коммутации преобразовательного трансформатора позволяет обосновать выбор оптимального выключателя с позиции коммутационных перенапряжений.

В табл. 3.19 приведены результаты сравнительного анализа коэффициентов кратности коммутационных перенапряжений при использовании элегазовых и вакуумных выключателей для коммутации преобразовательного трансформатора при различных значениях тока нагрузки.

Оценка коммутационных перенапряжений осуществлялась посредством вычисления коэффициента превышения кратностей коммутационных перенапряжений:

$$\gamma = \frac{K_{п.маxВ}}{K_{п.маxЭ}}, \quad (3.15)$$

где $K_{п.маxЭ}$ – кратность коммутационных перенапряжений для элегазового выключателя;

$K_{п.маxВ}$ – кратность коммутационных перенапряжений для вакуумного выключателя.

Таблица 3.19 Результаты сравнительного анализа кратностей коммутационных перенапряжений при использовании элегазового и вакуумного выключателя

№	Параметр	Включение преобразовательного трансформатора						Отключение преобразовательного трансформатора					
		Ток нагрузки $I_{нагр}$, А						Ток нагрузки $I_{нагр}$, А					
		35	175	350	525	620	700	35	175	350	525	620	700
1	Элегазовый выключатель $K_{п.мах}$, $I_{эл-за} = 200$ кА	0,95	0,9	2,95	3,0	1,2	1,0	1,25	1,3	1,55	2,5	1,45	1,35
	Вакуумный выключатель $K_{п.мах}$, $I_{эл-за} = 200$ кА	1,2	1,5	3,1	3,3	1,7	1,1	1,7	2,0	3,6	4,2	2,1	1,8
	Коэффициент γ	1,26	1,67	1,05	1,1	1,42	1,1	1,36	1,53	2,32	1,68	1,45	1,33
2	Элегазовый выключатель $K_{п.мах}$, $I_{эл-за} = 400$ кА	1,0	0,9	3,0	3,1	1,25	0,95	1,3	1,4	1,7	2,6	1,6	1,4
	Вакуумный выключатель $K_{п.мах}$, $I_{эл-за} = 400$ кА	1,3	1,6	3,3	3,7	1,8	1,2	1,8	2,1	3,5	4,0	2,0	1,6
	Коэффициент γ	1,3	1,78	1,1	1,19	1,44	1,26	1,39	1,5	2,06	1,54	1,25	1,15
3	Среднее значение $\gamma_{ср}$	1,28	1,72	1,08	1,15	1,43	1,18	1,37	1,52	2,19	1,61	1,35	1,24

Отношение кратностей перенапряжений, формируемых элегазовыми и вакуумными высоковольтными коммутационными аппаратами, при различных токах ПРТР приведено на рис 3.8.

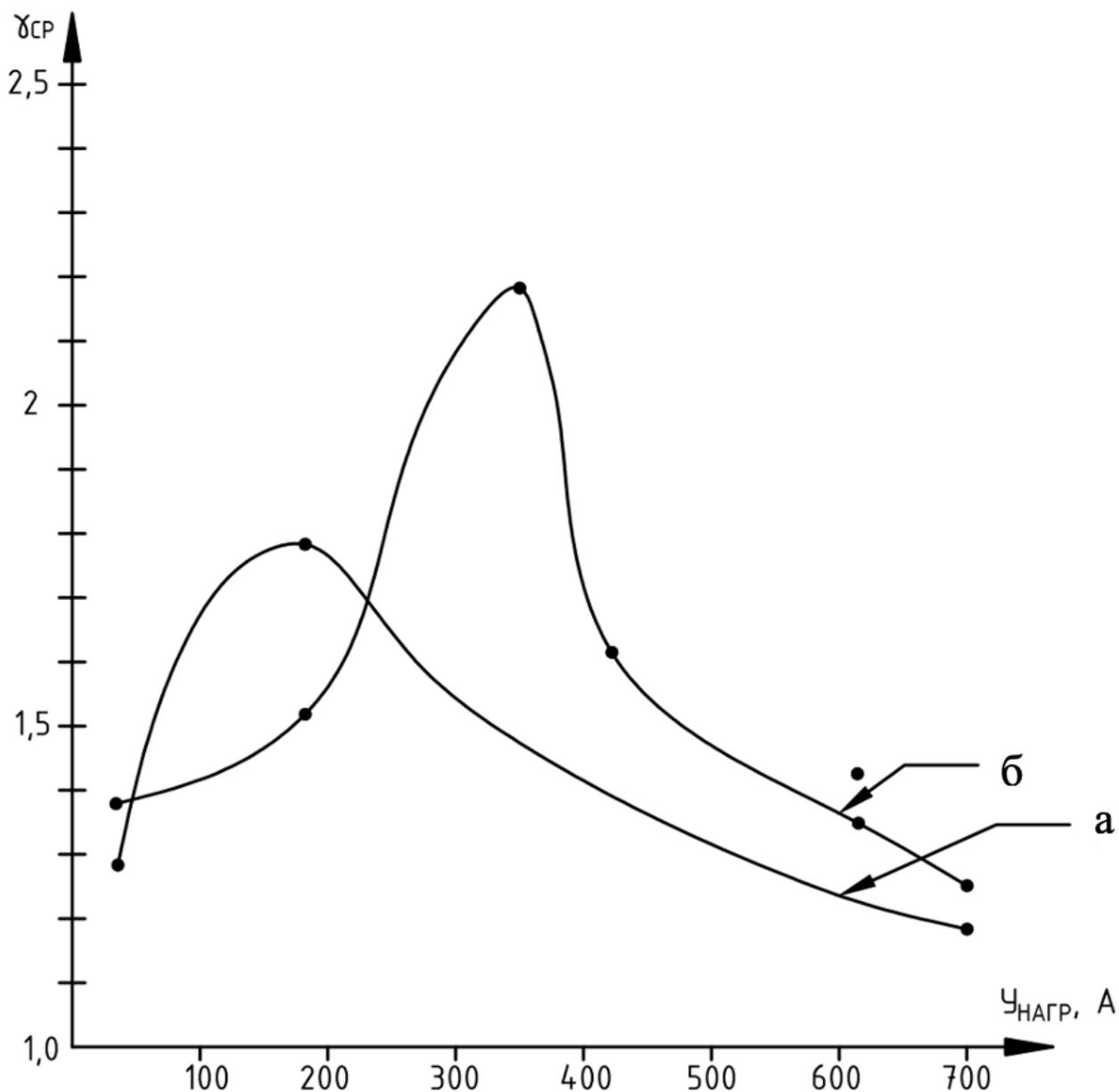


Рисунок 3.8 – Отношение кратностей перенапряжений, формируемых элегазовыми и вакуумными высоковольтными коммутационными аппаратами ($\gamma_{ср}$), при различных токах ПРТР: а – включение, б – выключение

Анализ полученных зависимостей $\gamma_{ср} = f(I_{нагр})$ показывает, что применение вакуумных выключателей при коммутации преобразовательных

трансформаторов приводит к формированию более высоких коммутационных перенапряжений по сравнению с элегазовым выключателем.

При включении, отключении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем коэффициент превышения коммутационных перенапряжений по сравнению с элегазовым выключателем соответственно может достигать: при включении 1,72, при отключении 2,19.

Таким образом, применение элегазовых выключателей для коммутации ПРТР является более рациональным, поскольку данные выключатели обеспечивают меньшие уровни коммутационных перенапряжений, по сравнению с вакуумными выключателями.

3.8 Влияние высших гармоник тока нагрузки на величину перенапряжений при коммутации преобразовательного трансформатора

На основании экспериментальных данных построены следующие эмпирические зависимости:

- эмпирические зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки (K_I) от коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора ($K_{з.тр.}$) – $K_I = f(K_{з.тр.})$;

- эмпирические зависимости коэффициента максимальных кратностей коммутационных перенапряжений ($K_{п.мах}$) от суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки (K_I) – $K_{п.мах} = f(K_I)$.

Указанные эмпирические зависимости приведены на рис. 3.9 и 3.10 соответственно.

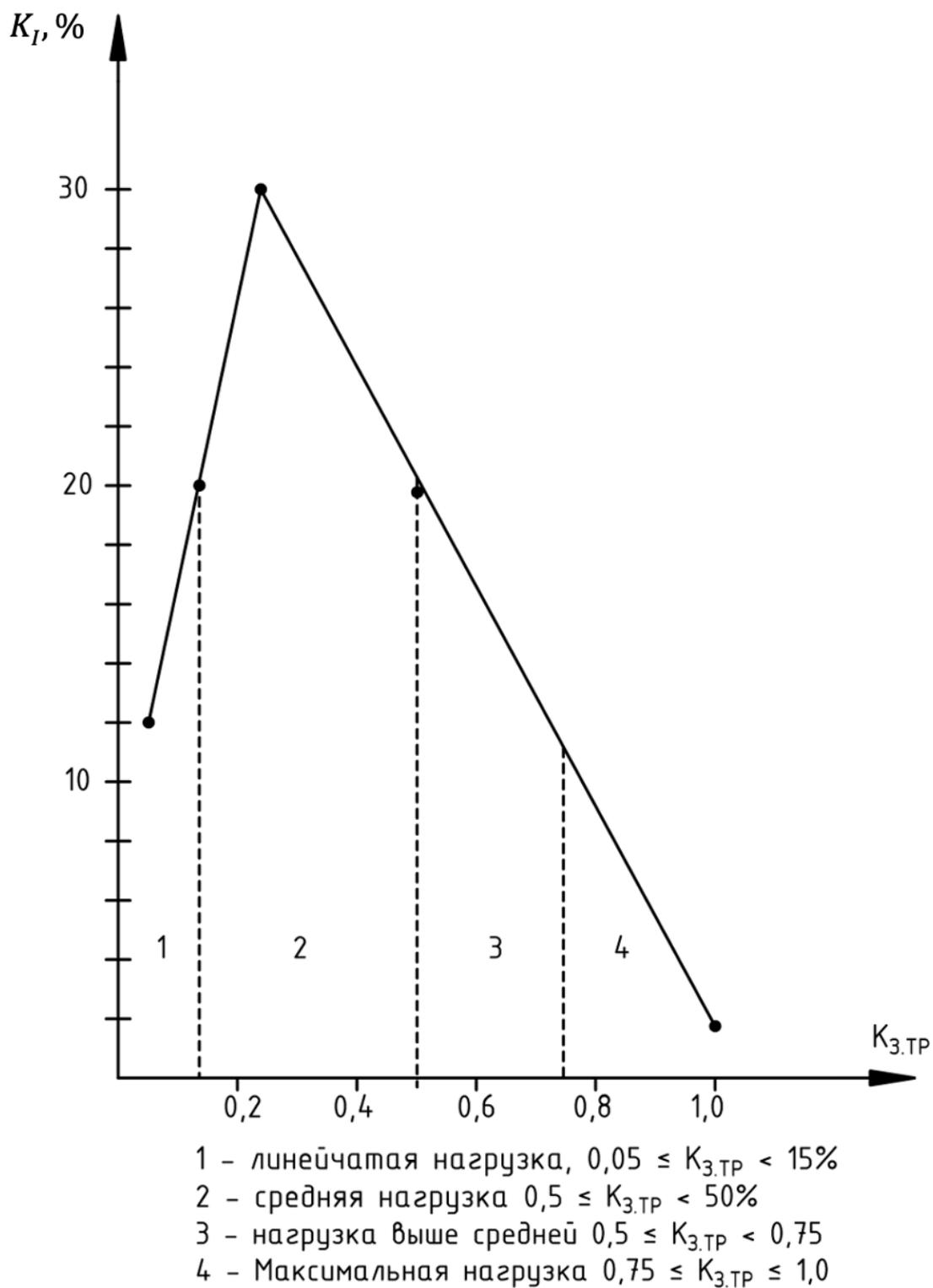


Рисунок 3.9 – Эмпирическая зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки (K_I) от коэффициента загрузки трансформатора $K_{3,TP}$

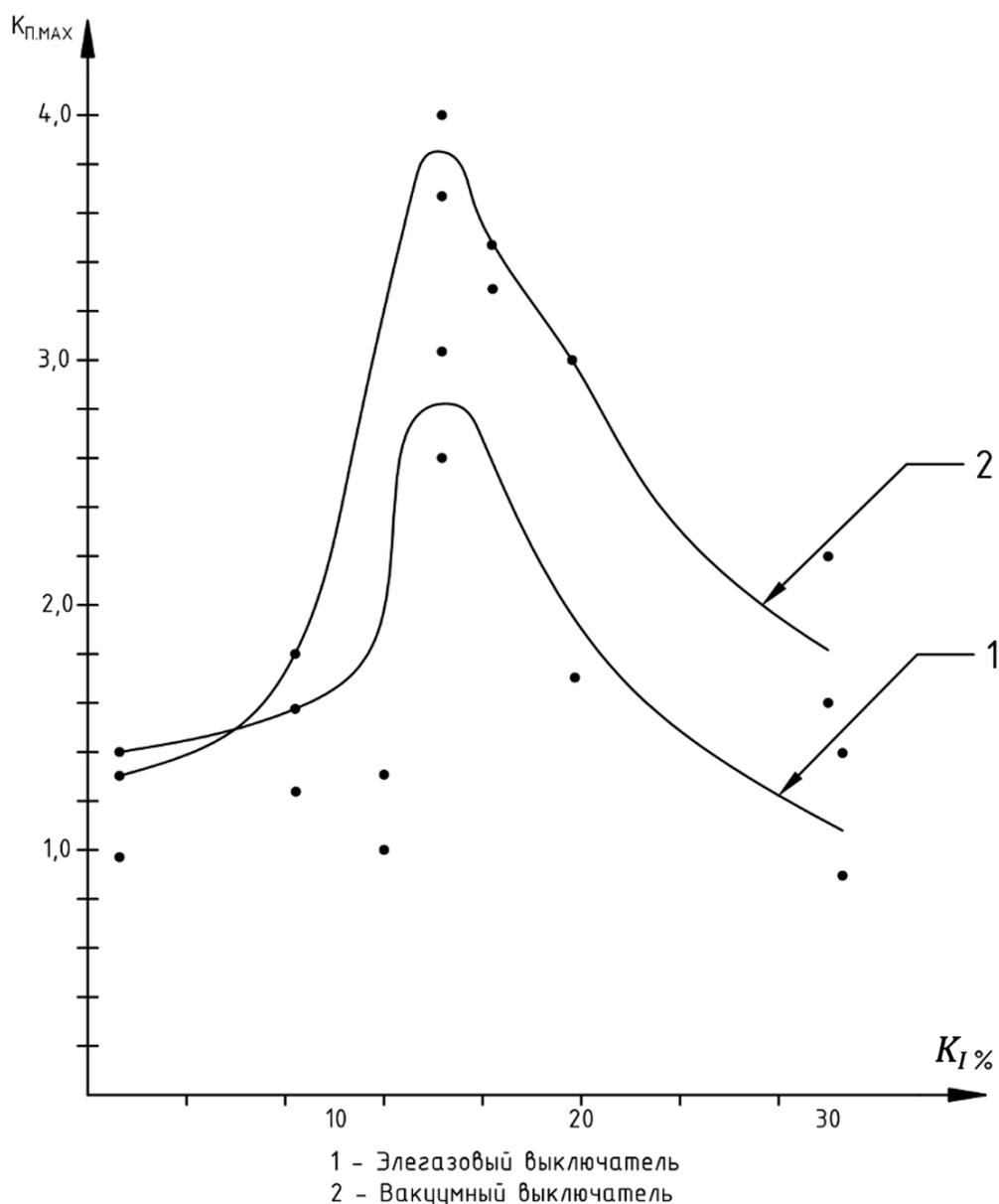


Рисунок 3.10 – Эмпирические зависимости максимальных значений кратностей коммутационных перенапряжений $K_{п.маx}$ от суммарного коэффициента гармонических составляющих токов нагрузки (K_I)

Согласно [94, 95], преобразовательный трансформатор и выпрямительный агрегат представляет собой единое технологическое устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямленный) ток. Мощность преобразовательного трансформатора практически эквивалентна мощности выпрямительного агрегата, вследствие чего значения коэффициента загрузки трансформатора соответствует значениям коэффициента загрузки выпрямительных агрегатов.

Для анализа влияния токов нагрузки на интенсивность генерации высших гармоник тока, эмпирическая зависимость $K_I = f(K_{з.тр.})$, приведенная на рис 3.9 разделена на 4 зоны.

Первая зона соответствует минимальной нагрузке выпрямительных агрегатов, при которой коэффициент загрузки преобразовательного трансформатора находится в диапазоне от 0,05 до 0,15. Подобная нагрузка выпрямительного агрегата сопровождается средней интенсивностью генерации высших гармоник, так как коэффициент K_I находится в пределах 12%-20%.

Увеличение нагрузки выпрямительного агрегата до средних значений, при которых коэффициент загрузки преобразовательного агрегата находится в диапазоне от 0,15 до 0,5 сопровождается интенсивной генерацией высших гармоник, так как значение коэффициента находится в пределах 20%-30%.

Дальнейшее увеличение нагрузки выше средней, когда коэффициент загрузки преобразовательного трансформатора изменяется от 0,5 до 0,75, интенсивность генерации высших гармоник снижается до среднего уровня, так как значение коэффициента находится в пределах 11%-20%.

При максимальной нагрузке выпрямительного агрегата, которая сопровождается изменением коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора от 0,75 до 1, наблюдается минимальная интенсивность генерации высших гармоник тока, так как значение коэффициента K_I не превышает 10%, а при коэффициенте загрузки преобразовательного трансформатора близком или равным генерации высших гармоник тока практически прекращается, так как $K_I \leq 1,6\%$.

Результаты исследований, приведенные на рис. 3.9 хорошо согласуются с результатами исследований влияния коэффициентов загрузки, тиристорных преобразователей на изменение синусоидальности кривой тока нагрузки, которая характеризуется коэффициентом K_I [75]. Следовательно, эмпирическая зависимость $K_I = f(K_{з.тр.})$ имеет закономерный характер и может быть использована для анализа влияния высших гармоник тока на величину

коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации преобразовательных трансформаторов.

В настоящее время выпрямительные агрегаты и преобразовательные трансформаторы, как правило, эксплуатируются с коэффициентом загрузки 0,62–0,75, что сопровождается средним уровнем генерации высших гармоник тока, так как коэффициент будет находиться в диапазоне 13% - 17%.

Согласно зависимостям, приведенных на рис. 3.10, наличие высших гармоник тока, вызывающих изменение синусоидальности кривой тока нагрузки на уровне 13% - 17%, приводит к возникновению максимальных коммутационных перенапряжений. При условии, что $13\% \leq K_I \leq 17\%$, кратность коммутационных перенапряжений для вакуумного выключателя будет находиться в диапазоне 2,6 – 3,1, что представляет риск аварийных пробоев изоляции ПРТР.

Для ограничения перенапряжений при коммутации ПРТР элегазовыми или вакуумными выключателями целесообразно снижать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока нагрузки КВА (рис. 3.10) – за счет увеличения тока нагрузки ПРТР или уменьшения амплитуды высших гармоник тока.

Повышение тока нагрузки, при котором коэффициент загрузки трансформатора не опускается ниже 85% приводит к тому, что значение коэффициента K_I не превышает 7% (рис. 3.9), тогда значение коэффициента кратности коммутационных перенапряжений снизится до 1,55 (рис. 3.10) и не будет превышать допустимое значение равное 2,8.

Однако техническое решение обладает ограниченной применимостью, поскольку значение тока электролиза, а следовательно, и тока нагрузки выпрямительного агрегата определяется технологическим процессом электролиза алюминия и может изменяться в два и более раза.

В связи с этим коэффициент загрузки преобразовательного трансформатора будет изменяться в два и более раза, в результате чего с высокой вероятностью будет находиться в диапазоне от 0,425 до 0,85, то есть охватывать

третью зону зависимости $K_I = f(K_{з.тр.})$, характеризующуюся возникновением максимальных коммутационных перенапряжений.

Наиболее эффективным методом снижения уровня генерации высших гармоник тока представляется использование устройств подавления или фильтрации высших гармоник тока нагрузки.

Для решения этой задачи требуется выявить преобладающие гармоники тока и, на основании математического моделирования, оценить их влияние на величину коммутационных перенапряжений.

3.9 Выводы главе 3

1. По экспериментальным данным сформированы статистические выборки коммутационных перенапряжений (U , кВ) при различных значениях: нагрузки ($I_{нагр}$) ПРТР и коэффициента загрузки ($K_{з.тр.}$); максимального коммутационного напряжения (U_{max}); коэффициента загрузки выключателя ($K_{з.в.}$); суммарного коэффициента гармонического состава тока нагрузки (K_I , %) – табл. 3.1-3.8. Вышеприведенные показатели характеризуются диапазонами: нагрузка ПРТР – (35-700) А; максимальное коммутационное напряжение (9,5-42) кВ ; коэффициент загрузки ПРТР – (0,05-0,99); коэффициент загрузки выключателей – (0,0175-0,35); суммарный коэффициент гармонического состава тока нагрузки – (1,15-30)%.
2. Проверка по критерию Граббса статистических выборок кратности перенапряжения показала отсутствие «выбросов» как при включении, так и отключении ПРТР вакуумными и элегазовыми выключателями.
3. Проверка гипотезы о принадлежности статистических выборок кратности коммутационных перенапряжений к генеральной совокупности отвергнута с доверительной вероятностью 0,95.
4. Получены (рис 3.3, 3.4) эмпирические зависимости максимальных кратностей коммутационных перенапряжений от тока нагрузки ПРТР $K_{п.маx} = f_1(I_{нагр})$, коэффициента загрузки ПРТР $K_{п.маx} = f_2(K_{з.тр.})$ и коэффициента загрузки выключателя $K_{п.маx} = f_3(K_{з.в.})$, позволяющие комплексно оценивать

влияние вышеуказанных показателей на коммутационные перенапряжения при включении, отключении ПРТР вакуумными или элегазовыми выключателями.

5. Получены (рис. 3.5) эмпирические зависимости среза тока от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя, позволяющие определять ток нагрузки ПРТР, при котором исключается риск аварийных пробоев изоляции ПРТР.
6. Установлено влияние типа выключателя на коммутационные перенапряжения (табл. 3.19), заключающееся в том, что вакуумные выключатели обуславливают более высокие перенапряжения по сравнению с элегазовыми: при включении в 1,72, при отключении в 2,19 раза.

4 ЗАВИСИМОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИИ

4.1 Общие сведения и методика исследований

Рассматривая такие факторы, как: емкость и индуктивность цепи отключения, величина среза тока, анализ работы полюсов контактной системы выключателя на неодновременность размыкания или замыкания, вероятностный характер нагрузки, тип коммутационного аппарата, можно сделать вывод, что эти факторы множественны и воздействуют по-разному [5, 6, 11, 17, 19, 24, 36].

Помимо вышеуказанных факторов, на коэффициент перенапряжения существенное влияние оказывают высшие гармоники. Для проверки влияния высших гармоник при отключении вакуумного выключателя, питающего трансформатор ТДЦПФУД-25000/10 выпрямительного агрегата, был применен математический метод описания их в переходном процессе и зависимости от токовой загрузки выключателя, выраженного в коэффициентах в зависимости от коэффициента несинусоидальности кривой тока. При отключении незагруженного током выключателя с коэффициентом 0,25-0,263 (рис. 3.3, 3.4) наблюдаются максимальные значения перенапряжений возникают при данном таком режиме ненагруженного током выключателя.

При моделировании возникновения процессов перенапряжения в трёхфазной системе было выявлено, что аналитическое рассмотрение в таком виде представляет сложную проектную задачу, поэтому была предложена схема замещения основной системы «выключатель - кабельная линия - трансформатор». Предложенная схема применима к высокочастотному импульсу и является важной для анализа исследования при однофазной схеме замещения с количеством сосредоточенных параметров и распределёнными параметрами в эквивалентной схеме.

В исследованиях [36,50,57,67] хорошо изучен коэффициент увеличения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги (n) между контактами

вакуумного выключателя. Он увеличивается пропорционально n . Поэтому в исследовании в однофазной схеме замещения выполняется математическое моделирование коэффициента перенапряжения при коммутациях без учёта повторных зажигания дуги при отключении тока между контактами вакуумного выключателя. Следовательно, зная коэффициент кратности коммутационных перенапряжений, представляется возможным определить коэффициент кратности коммутационных перенапряжений с учётом повторных зажигания дуги при коммутации тока вакуумного выключателя, по выражению:

$$K_{n.з.д.} = K \cdot \sqrt[3]{n}, \quad (4.1)$$

где K – коэффициент кратности КП без учета повторных зажигания дуги токовой нагрузки.

Для оценки влияния высших гармоник тока на величину коммутационных перенапряжений необходимо определить основные гармоники, оказывающие наибольшее влияние на искажение синусоидальности кривой тока нагрузки, то есть на величину суммарного коэффициента гармонических составляющих тока. В работе [87] показано, что для электродвигателей напряжением 10 кВ при анализе влияния высших гармоник тока на величину коммутационных перенапряжений необходимо и достаточно учитывать 5-ю и 7-ю гармоники тока.

4.2 Анализ гармонического состава токов нагрузки преобразовательного трансформатора

На основании проведенных экспериментальных исследований получены данные о гармоническом составе токов нагрузок. Характерные осциллограммы гармонического состава токов приведены в приложениях 1 и 2.

В табл. 4.1 приведены значения суммарного коэффициента гармонического состава тока (K_I) нагрузки ПРТР. Это позволяет определить гармоники оказывающее основное влияние на величину K_I .

Таблица 4.1 Гармонический состав токов нагрузки преобразовательного трансформатора

№	$K_{з.тр}$	$K_I, \%$	Тип выключателя	$K_{п.мах}$	Гармонические составляющие тока нагрузки, %										$I_{нагр},$ А	Ток высших гармоник, $I_{в.г},$ А	Суммарный коэффициент 5 и 11 гармоник тока $K_{5,11}, \%$	Ток 5 и 11 гармоник $I_{5,11},$ А	Доля тока $I_{5,11}$ в $I_{в.г}, \%$
					2	3	4	5	7	9	11	13	17	19					
1	1,0	1,16	вакуумный	1,6		1,15									700	11,2	-	-	0
		1,15	элегазовый	1,4		0,5			0,3		0,6					10,5	0,67	4,2	40,0
2	0,88	9,06	вакуумный	1,6		1,4		6,8	3,5	0,65	6,7	1,25	1		620	56,6	9,55	47,1	83,8
		8,8	элегазовый	2,0		0,8		8,4	0,5		4,4					54,6	9,49	49,6	90,8
3	0,75	18,4	вакуумный	4,0		2,2		13	6,4		11	1,4			525	96,6	14,5	89,4	92,6
		17,4	элегазовый	2,6		1,0		9	2,5		14,5	2,0				91,4	9,34	86,6	98,0
4	0,5	16,3	вакуумный	3,5	0,8	3,3	1,3	12,4	5,2	1	10,2	4,0	1,3		350	57,1	13,45	56,1	98,3
		19,6	элегазовый	1,7		1,0		16,5	4,0		10,5	0,9	2	1		68,6	16,98	67,6	98,5
5	0,25	30	вакуумный	2,1		4		27	6,2		10	3	2		175	52,5	28,77	48,5	92,3
		30,5	элегазовый	1,4		5		26	6,0		10					53,4	27,87	46,7	87,5
6	0,05	13,4	вакуумный	1,8		6		12							35	4,7	12,0	4,2	89,4
		12,0	элегазовый	1,3		7		7,6			5,8					4,2	7,62	2,7	63,3

Анализ табл. 4.1 показывает, что основными гармоническими составляющими тока нагрузки являются 5-я и 11-я гармоники. Это обусловлено тем, что их доля в общем токе высших гармоник ($I_{в.г}$), при которых возникают коммутационные перенапряжения, представляющие опасность для изоляции обмоток ПРТР, составляет от 83,8% до 98,5%.

4.3 Физические процессы, возникающие при отключении преобразовательного трансформатора от сети 10 кВ при наличии высших гармоник тока

Мгновенное значение перенапряжения, возникающее при отключении ПРТР, определяется по выражению:

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

где i_0 – срез тока, А;

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

Срез i_0 в начальный момент коммутации определяется мгновенным значением тока, протекающего между контактами выключателя. Этот ток содержит как основную гармоническую составляющую, так и высшие гармоники тока.

На рис. 4.1 показано влияние 5-й и 11-й гармоник на искажение синусоидальности тока нагрузки ПРТР.

По результатам экспериментальных исследований (п.п. 3.5), угол коммутации вакуумных или элегазовых выключателей изменяется в зависимости от коэффициента загрузки выключателя.

При незначительных токах нагрузки, когда коэффициент загрузки выключателей не превышает 0,263, угол коммутации (φ_k) находится в диапазоне 135° - 145°. При увеличении коэффициента загрузки выше 0,263 угол коммутации находится в диапазоне 160° - 170°.

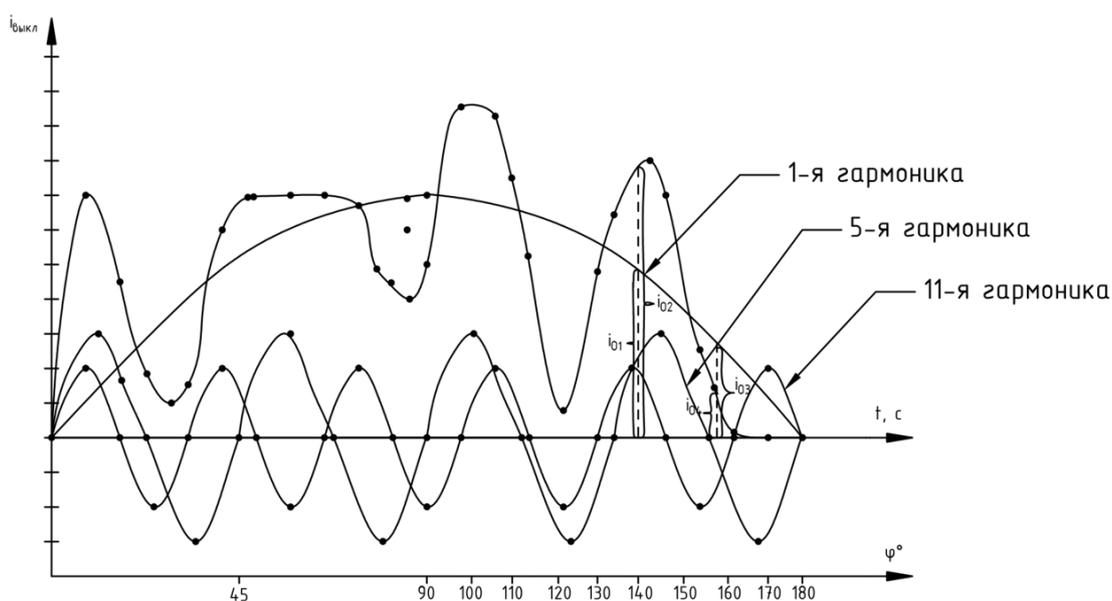


Рисунок 4.1 – Влияние 5-й и 11-й гармоник тока на синусоидальность тока нагрузки ПРТР

В интервале углов разрыва дуги между контактами $130^\circ - 150^\circ$ при учете 1-й, 5-й и 11-й гармоник наблюдается увеличение среза тока 1,86 раза, $i_{02}/i_{01} = 1,86$ (рис. 4.1). Указанный эффект обусловлен тем, что в данном диапазоне угла коммутации мгновенные значения 1-й, 5-й и 11-й гармоник в соответствующем полупериоде имеют одинаковую полярность, вследствие чего их вклад в срез тока суммируется. В результате суммарный срез тока (i_{02}) оказывается больше среза тока, формируемого одной гармоникой (i_{01}).

Из-за вышеуказанного роста тока коммутационные перенапряжения увеличиваются за счет этого роста, при угле коммутации φ_k , находящимся в диапазоне $135^\circ - 145^\circ$. Дальнейшее увеличение угла коммутации (от 145° до 165°) приводит к уменьшению величины среза тока и снижению коммутационных перенапряжений, поскольку полярность 11-й и 5-й гармоник в этом случае различны.

4.4 Моделирование режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов в сетях 10 кВ с учетом 5-й и 11-й гармоник

Моделирование режимов коммутационных перенапряжений в сетях 10 кВ с учетом 5-й и 11-й гармоник выполнено для следующих условий:

- перенапряжения характеризуются высокочастотными импульсами частотой свыше 45 кГц;
- амплитуда импульсов зависит от момента коммутации в полупериоде тока нагрузки ПРТР, определяемого углом коммутации (φ_k);
- электрическая дуга между контакта коммутационных аппаратов имеет индуктивный характер;
- напряжение сети в режиме коммутации считается практически постоянным в интервале коммутации;
- напряжение $U(t)$ соответствует его мгновенному значению начального момента коммутации;
- емкость между фазами сети, составляющая 2,5% от емкости фаз относительно земли, в моделировании не учитывается;
- емкость между витками обмоток преобразовательного трансформатора пренебрежимо мала.

Мгновенное значение перенапряжения на первичной обмотке преобразовательного трансформатора с учетом 5-й и 11-й гармонических составляющих находится по формуле:

$$u(t) = u_1(t) + u_5(t) + u_{11}(t), \quad (4.3)$$

где $u_1(t)$, $u_5(t)$, $u_{11}(t)$ – мгновенные перенапряжения соответственно, 1-й, 5-й и 11-й гармонических составляющих.

С учетом вышеприведенных условий схема замещения для моделирования режимов коммутации коммутационных перенапряжений в преобразовательных трансформаторах приведена на рис. 4.2.

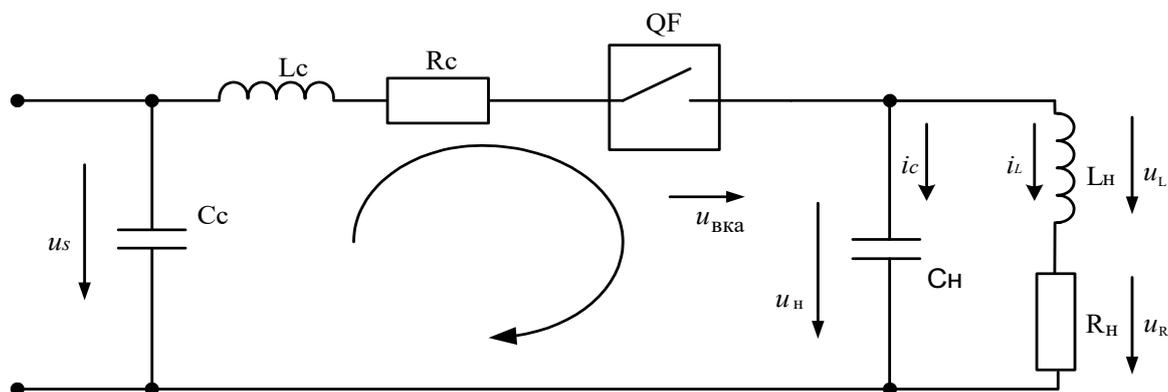


Рисунок 4.2 – Схема замещения для моделирования режимов коммутационных перенапряжений в преобразовательных трансформаторах

Схема включает: R_n – активное сопротивление преобразовательного трансформатора с учетом потерь в стали сердечника трансформатора; L_n – индуктивность дуги между контактами коммутационного аппарата; C_n – емкость фазной обмотки относительно корпуса трансформатора; L_c – индуктивность питающего кабеля; R_c – продольное активное сопротивление кабеля; C_c – емкость кабеля по отношению к земле.

Колебательный контур ($R_n L_n C_n$) преобразовательного трансформатора в схеме замещения согласно исследованиям [87] описывается системой уравнений мгновенных значений токов и напряжений:

$$\left. \begin{aligned} u_L + u_R - u_n &= 0 \\ u_R &= i_L \cdot R_n \\ u_L &= L_n \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) \\ i_L &= -i_c \\ i_c &= C_n \cdot \left(\frac{du_c}{dt} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (4.4)$$

Решение (4.4) относительно протекающего тока через индуктивность (L_n) приводит к следующему:

$$L_n \frac{di_L}{dt} + i_L R_n - u_n = 0. \quad (4.5)$$

В соответствии с (4.4) и (4.5) получаем:

$$i_L = -L_H C_H \frac{d^2 i_L}{dt^2} - R_H C_H \frac{di_L}{dt}. \quad (4.6)$$

Характеристическое уравнение (4.6) имеет вид:

$$p^2 L_H C_H + p R_H C_H + 1 = 0. \quad (4.7)$$

Представим характеристическое уравнение в следующей форме:

$$p^2 + p \cdot \frac{R_H}{L_H} + \frac{1}{L_H \cdot C_H} = 0. \quad (4.8)$$

Далее уравнение (4.8) можно привести к виду:

$$\left(p + \frac{R_H}{2 \cdot L_H} \right)^2 + \left(\frac{1}{L_H \cdot C_H} - \frac{R_H^2}{4 \cdot L_H^2} \right) = 0. \quad (4.9)$$

Характеристическое уравнение (4.9) имеет вид:

$$(p + a)^2 + \omega_0^2 = 0, \quad (4.10)$$

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

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

баний.

С учетом характера корней характеристического уравнения общее решение дифференциального уравнения второго порядка представляется в виде:

$$i_L = e^{\alpha t} \cdot [B_1 \sin(\omega_0 t) + B_2 \cos(\omega_0 t)], \quad (4.11)$$

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

$$(B_2)_{t=0} = i_L(0), \quad (4.12)$$

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

Постоянная интегрирования B_1 :

$$B_1 = \frac{u_H(0_-) - i_L(0_-) \cdot R_H - \alpha \cdot L_H \cdot i_L(0_-)}{\omega \cdot L_H}, \quad (4.13)$$

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:

$$i_L(t) = e^{\alpha t} \left[\left(\frac{u_H(0_-) - i_L(0_-) R_H - \alpha L_H i_L(0_-)}{\omega_B L_H} \right) \sin(\omega_B t) + i_L(0_-) \cos(\omega_B t) \right], \quad (4.14)$$

Сходным способом устанавливается напряжение на зажимах преобразовательного трансформатора:

$$u_H(t) = u_{H.пр}(t) + u_{H.св}(t). \quad (4.15)$$

При коммутации (в данном случае отключении) преобразовательного трансформатора от сети 10 кВ $u_{H.пр}(t) = 0$, тогда,

$$u_H(t) = u_{H.св}(t). \quad (4.16)$$

Для определения $u_{H.св}(t)$ уравнения системы (4.4) решаются относительно напряжения нагрузки u_H . В результате преобразований система приводится к виду:

$$u_{H.св}(t) = e^{\alpha t} (D_1 \cdot \sin(\omega_B t) + D_2 \cdot \cos(\omega_B t)). \quad (4.17)$$

Для определения постоянных D_1 и D_2 , соответствующих начальным условиям, получаем систему:

$$\left. \begin{aligned} u_H(t) &= u_{H.св}(t) \\ -\frac{du_{H.св}}{dt} \cdot C_H &= i_{C.св} \\ i_{C.св} &= -i_L \end{aligned} \right\}. \quad (4.18)$$

При $t=0$ система 4.18 принимает вид, из которого определяются постоянные интегрирования:

$$D_2 = u_H(0_-), \quad (4.19)$$

$$D_1 = \frac{\left\{ -\frac{i_{cp}}{C_H} - \alpha \cdot D_2 \right\}}{\omega_B}. \quad (4.20)$$

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

$$u_{н.св}(t) = e^{\alpha t} \left[\left(-\frac{i_{cp}(0_-) - \alpha C_H u_H(0_-)}{\omega_B C_H} \right) \sin(\omega_B t) + u_H(0_-) \cos(\omega_B t) \right], \quad (4.21)$$

На основании выражений (4.21) и (4.14), определяются изменения напряжения на первичной обмотке преобразовательных трансформаторов для 1-й, 5-й и 11-й гармонических составляющих тока нагрузки преобразовательных трансформаторов.

Мгновенные значения возникающих перенапряжений определяются по формуле (4.3).

При анализе режимов коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении высоковольтными вакуумными и элегазовыми коммутационными аппаратами от сети 10 кВ с учетом высших гармонических составляющих тока, принимаются, согласно исследованиям [7, 104], допущения, что индуктивность и емкость колебательного контура являются постоянными и независимыми от частоты тока сети.

Следует отметить, что активное сопротивление обмоток электродвигателей и трансформаторов может увеличиваться в 10-15 раз вследствие воздействия высокой частоты коммутационного импульса [67].

В табл. 4.2 приведены расчетные и измеренные данные по параметрам трансформатора ТДЦПТУД-25000/10-У1

Таблица 4.2 – Расчетные и измеренные данные по параметрам трансформатора ТДЦПТУД-25000/10-У1

Метод определения параметра	Параметры обмотки трансформатора		
	Индуктивность, L, Гн	Емкость, C, Ф	Активное сопротивление, R, Ом
Расчет	$1,9 \cdot 10^{-3}$	-	0,05
Измерение	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,475 \cdot 10^{-8}$	0,055

При моделировании коммутационных перенапряжений были приняты следующие параметры $L = 1,95 \cdot 10^{-3}$ Гн; $C = 6,475 \cdot 10^{-8}$ Ф; $R = 0,0525$ Ом.

Результаты моделирования приведены в подразделах 4.5 и 4.6.

4.5 Результаты математического моделирования перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора без средств защиты от перенапряжений

Результаты моделирования коммутационных перенапряжений без средств ограничения КП сети 10 кВ при отключении ПРТР вакуумным выключателем с током нагрузки 525 А ПРТР при различных углах коммутации (φ_k) с учетом 1-й, 5-й и 11-й гармоник тока приведены в табл. 4.3

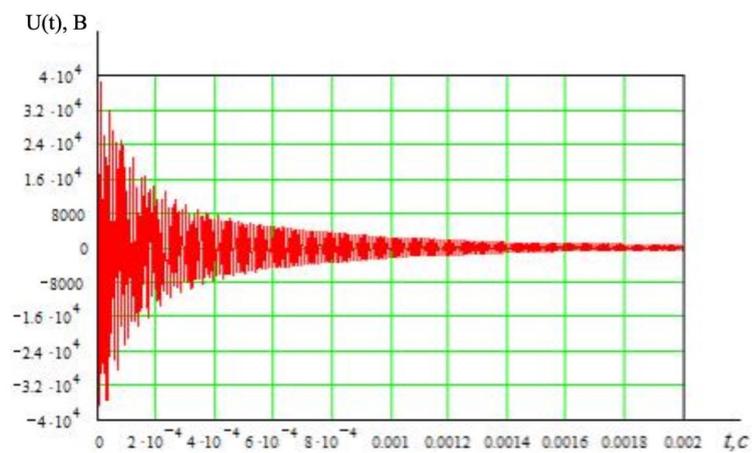
Таблица 4.3 Результаты математического моделирования напряжения при отключении преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем при токе нагрузки 525 А

№	Угол коммутации по основной гармонике,	Мгновенное значение напряжения 1, 5 и 11 гармоник тока			Результирующее мгновенное напряжение U(t), В	Кп при наличии высших гармоник	Кп при отсутствии высших гармоник
		$U_1(t)$, В	$U_5(t)$, В	$U_{11}(t)$, В			
1	125°	38498	-4469	-4179	29853	2,98	3,85
2	130°	36002	-2774	0	33228	3,32	3,6

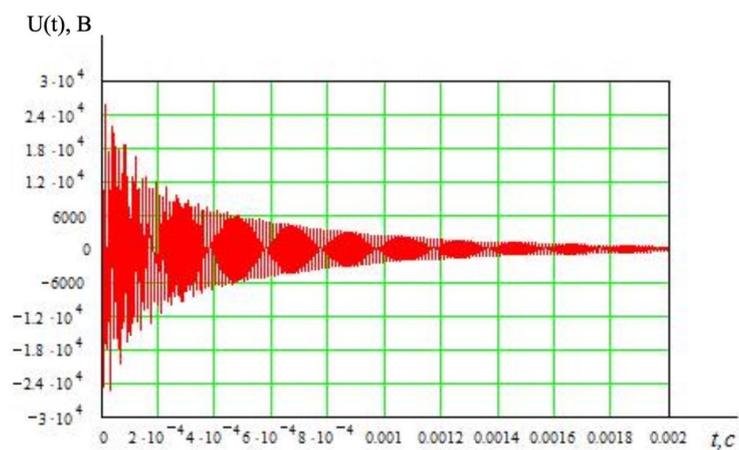
Продолжение табл. 4.3

3	135°	30232	3787	4179	38195	3,82	3,02
4	140°	30209	5445	4603	40252	4,03	3,02
5	145°	26957	6111	0	33068	3,31	2,69
6	150°	23499	2387	-3653	22233	2,23	2,35
7	155°	19862	3846	-5102	18606	1,86	1,99
8	160°	16074	-3846	-2345	9883	0,99	1,6
9	165°	10164	-5977	5102	9289	0,93	1,0
10	170°	8161	-4469	5166	8858	0,86	0,82
11	175°	4096	-850	3653	6899	0,69	0,41
12	180°	0	0	0	0	0	0

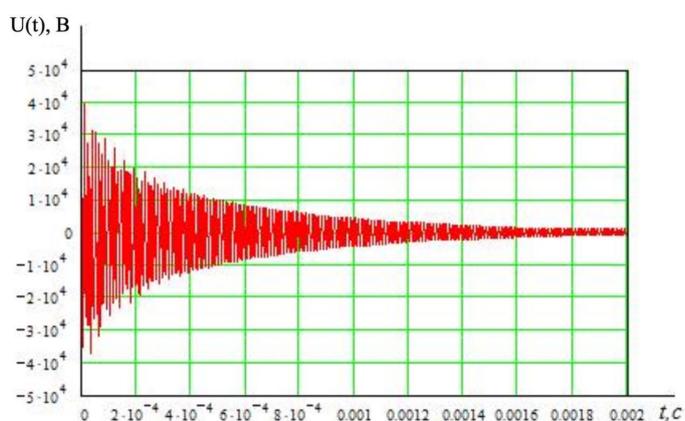
В качестве примера приведены кратности, возникающие на вводе 10 кВ преобразовательного трансформатора, при его отключении от сети 10 кВ вакуумным выключателем при углах коммутации 135° и 145° и токе нагрузки 525 А (рис 4.3).



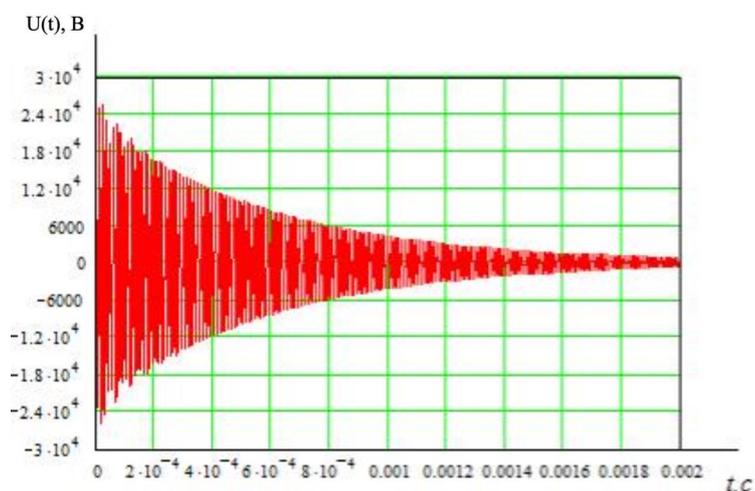
а) $\varphi_k=135^\circ$, i_5 и i_{11} – гармоники присутствуют



б) $\varphi_k=135^\circ$, i_5 и i_{11} – гармоники отсутствуют



в) $\varphi_k=140^\circ$, i_5 и i_{11} – гармоники присутствуют



г) $\varphi_k=140^\circ$, i_5 и i_{11} – гармоники отсутствуют

Рисунок 4.3 – Коммутационные перенапряжения при отключении преобразовательного трансформатора с током нагрузки 525 А при углах коммутации (φ_k) с учетом 5-й, 11-й высокочастотных гармонических составляющих тока

Данные табл. 4.3, полученные на основании математического моделирования, позволили получить эмпирические зависимости коммутационных перенапряжений от угла коммутации (рис.4.).

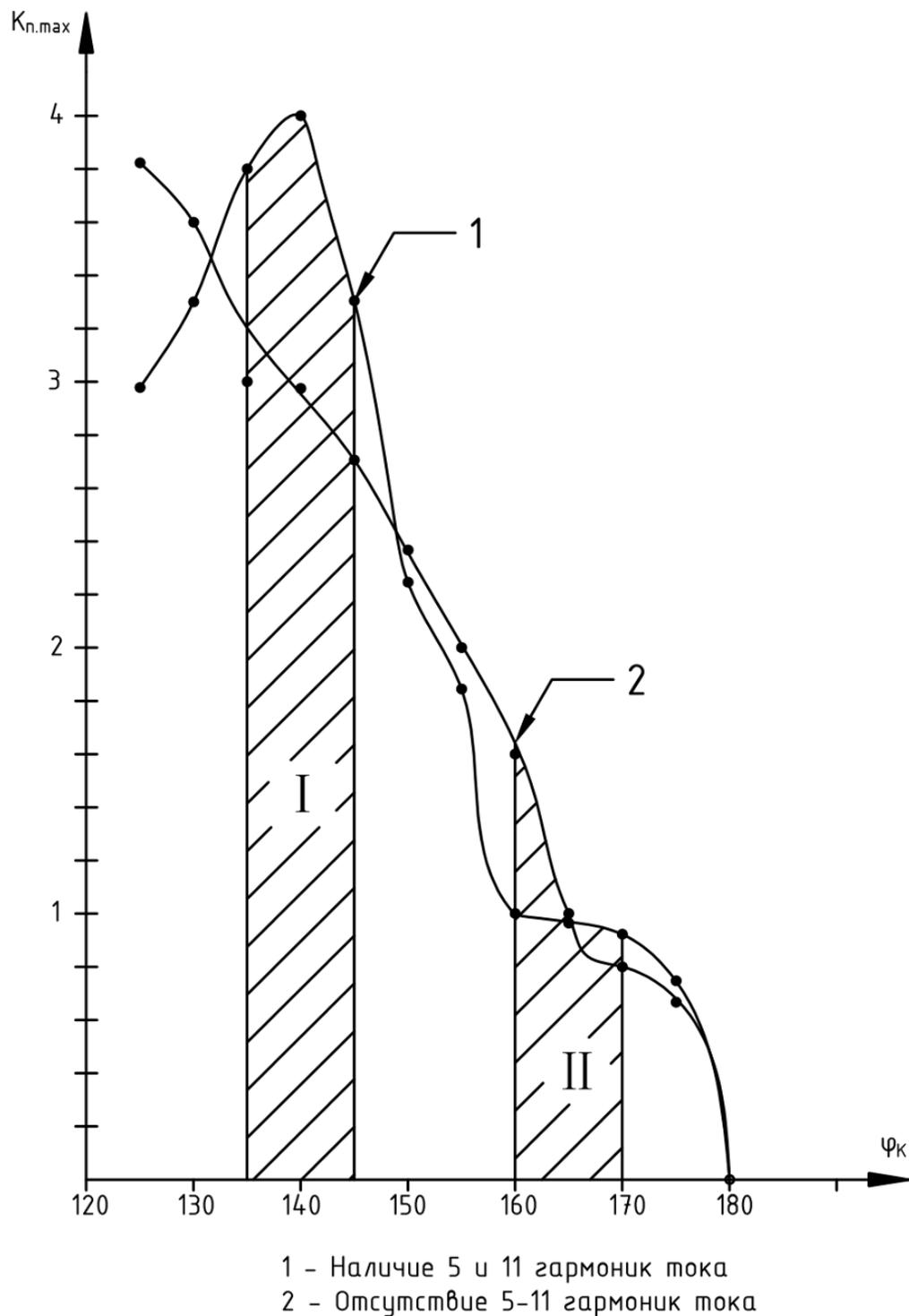


Рисунок 4.4 – Эмпирические зависимости кратностей коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от угла коммутации φ_k с учетом наличия и отсутствия 5-й и 11-й гармоник при токе нагрузки ПРТР 525 А

Анализ данных табл. 4.3 и характер изменения зависимости $K_{п.мах} = f(\varphi_k)$ показывает, что при токе нагрузки 525 А (что соответствует коэффициенту загрузки выключателя равным 0,263 и коэффициенту загрузки ПРТР равному 0,75) максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений возникают при углах коммутации 135° и 145° - $K_{п.мах} = 3,82 - 4,0$.

Полученные по результатам математического моделирования максимальные значения кратности перенапряжений совпадают со значениями полученных при экспериментальных исследованиях.

Это подтверждает, что при коэффициенте загрузки вакуумного или элегазового выключателя, не превышающем 0,263, угол коммутации, при котором происходит прерывание дуги между контактами выключателей и, как следствие, формируется максимальное значение кратности КП, находится в диапазоне $135^\circ - 145^\circ$.

В этом случае подавление 5-й и 11-й гармоник тока позволяет снизить максимальную кратность коммутационных перенапряжений с 4,0 до 3,0, то есть уменьшить значение коммутационных перенапряжений на 33%.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4.4, показывает, что снижение кратности коммутационных перенапряжений до значений, не представляющих опасности для изоляции обмоток преобразовательных трансформаторов ($K_{п.мах} < 2,8$), может быть достигнуто за счет увеличения угла коммутации до значений $\varphi_k \geq 150^\circ \pm \pi$. Это позволяет снизить $K_{п}$ до значений не более $2,4 U_n$.

Перенапряжения, полученные в результате моделирования режима коммутации для различных параметров режима с учетом 5-й и 11-й гармонических составляющих, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 Перенапряжения, полученные в результате моделирования режима коммутации для различных параметров режима с учетом 5-й и 11-й гармонических составляющих

№		Угол коммутации, φ											
		125 °	130 °	135 °	140 °	145 °	150 °	155 °	160 °	165 °	170 °	175 °	180 °
$I_{нар} = 35 \text{ А}, K_{п.мах} = 1,8, K_{з.в.} = 0,0175$													
1	$U_1(t)$, кВ	17,35	16,2	14,95	15,6	12,13	10,56	8,94	7,23	4,57	3,67	1,84	0
2	$U_5(t)$, кВ	-2,01	-1,25	1,7	2,45	2,75	1,07	1,73	-1,73	-2,69	-2,01	-0,38	0
3	$U_{11}(t)$, кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	$U(t)$, кВ	15,34	14,95	16,65	18,05	14,88	11,65	10,67	5,5	1,88	1,66	1,46	0
5	$K_{п}$	1,53	1,5	1,67	1,8	1,49	1,17	1,07	0,55	0,19	0,17	0,15	0
$I_{нар} = 175 \text{ А}, K_{п.мах} = 2,1, K_{з.в.} = 0,0875$													
1	$U_1(t)$, кВ	20,26	18,95	15,9	14,8	14,19	12,37	10,45	8,46	5,35	4,3	2,16	0
2	$U_5(t)$, кВ	-2,35	-1,46	1,99	2,87	4,22	4,26	3,02	-2,02	-3,15	-2,35	-0,45	0
3	$U_{11}(t)$, кВ	-2,2	0	1,2	2,42	2,93	-1,92	-2,68	-1,23	2,69	2,72	1,92	0
4	$U(t)$, кВ	15,81	17,49	19,8	20,09	21,34	14,71	10,78	5,21	4,89	4,67	3,63	0
5	$K_{п}$	1,58	1,75	1,98	2,09	2,03	1,47	1,08	0,52	0,49	0,47	0,36	0
$I_{нар} = 350 \text{ А}, K_{п.мах} = 3,5, K_{з.в.} = 0,175$													
1	$U_1(t)$, кВ	33,68	31,5	29,07	26,43	23,58	20,56	17,38	14,06	8,89	7,14	3,58	0
2	$U_5(t)$, кВ	-3,91	-2,43	3,31	4,06	5,35	4,09	3,36	-3,72	-5,23	-3,91	-0,74	0
3	$U_{11}(t)$, кВ	-3,66	0	2,48	3,21	1,98	-1,87	-2,46	-1,05	4,46	4,52	3,2	0
4	$U(t)$, кВ	26,11	29,07	34,86	33,7	30,91	22,87	18,28	9,29	8,21	7,75	6,04	0
5	$K_{п}$	2,61	2,91	3,49	3,37	3,09	2,29	1,83	0,93	0,82	0,78	0,6	0

Продолжение табл. 4.4

I _{нагр} = 525 А, K _{п.маx} = 4,0, K _{з.в.} = 0,263													
1	U _{1(t)} , кВ	38,6	36	30,23	30,21	26,96	23,5	19,86	16,07	10,16	8,16	4,1	0
2	U _{5(t)} , кВ	-4,47	-2,77	3,79	5,45	6,11	2,39	3,85	-3,85	-5,98	-4,47	-0,85	0
3	U _{11(t)} , кВ	-4,18	0	4,18	4,6	0	-3,65	-5,1	-2,35	5,1	5,17	3,65	0
4	U(t), кВ	29,85	33,23	38,12	40,3	33,07	22,23	18,61	9,88	9,29	8,86	6,9	0
5	K _п	2,99	3,32	3,82	4,03	3,31	2,23	1,86	0,99	0,93	0,89	0,69	0
I _{нагр} = 620 А, K _{п.маx} = 2,0, K _{з.в.} = 0,31													
1	U _{1(t)} , кВ	64,1	57,6	49,97	48,34	43,96	37,26	31,78	19,7	18,24	13,06	6,56	0
2	U _{5(t)} , кВ	-2,24	-1,39	2,09	2,73	3,05	1,2	1,93	-1,93	-2,1	-2,23	-0,43	0
3	U _{11(t)} , кВ	-4,82	0	4,82	5,29	1,53	-4,2	-5,92	3,31	3,62	5,95	4,2	0
4	U(t), кВ	57,04	56,21	56,81	56,36	48,54	34,26	27,79	21,08	19,74	16,79	14,33	0
5	K _п	5,7	5,62	5,69	5,36	4,85	3,34	2,78	2,11	1,97	1,68	1,03	0
I _{нагр} = 700 А, K _{п.маx} = 1,6, K _{з.в.} = 0,35													
1	U _{1(t)} , кВ	54,8	49,2	42,7	41,3	37,6	31,8	27,2	22	15,6	11,2	5,61	0
2	U _{5(t)} , кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	U _{11(t)} , кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	U(t), кВ	54,8	49,2	42,7	41,3	37,6	31,8	27,2	22	15,6	11,2	5,61	0
5	K _п	5,48	4,92	4,27	4,13	3,76	3,18	2,72	2,2	1,56	1,12	0,56	0

На основании данных, приведенных в табл. 4.4, построены эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений от угла коммутации и коэффициента загрузки выключателя, которые приведены на рис. 4.5.

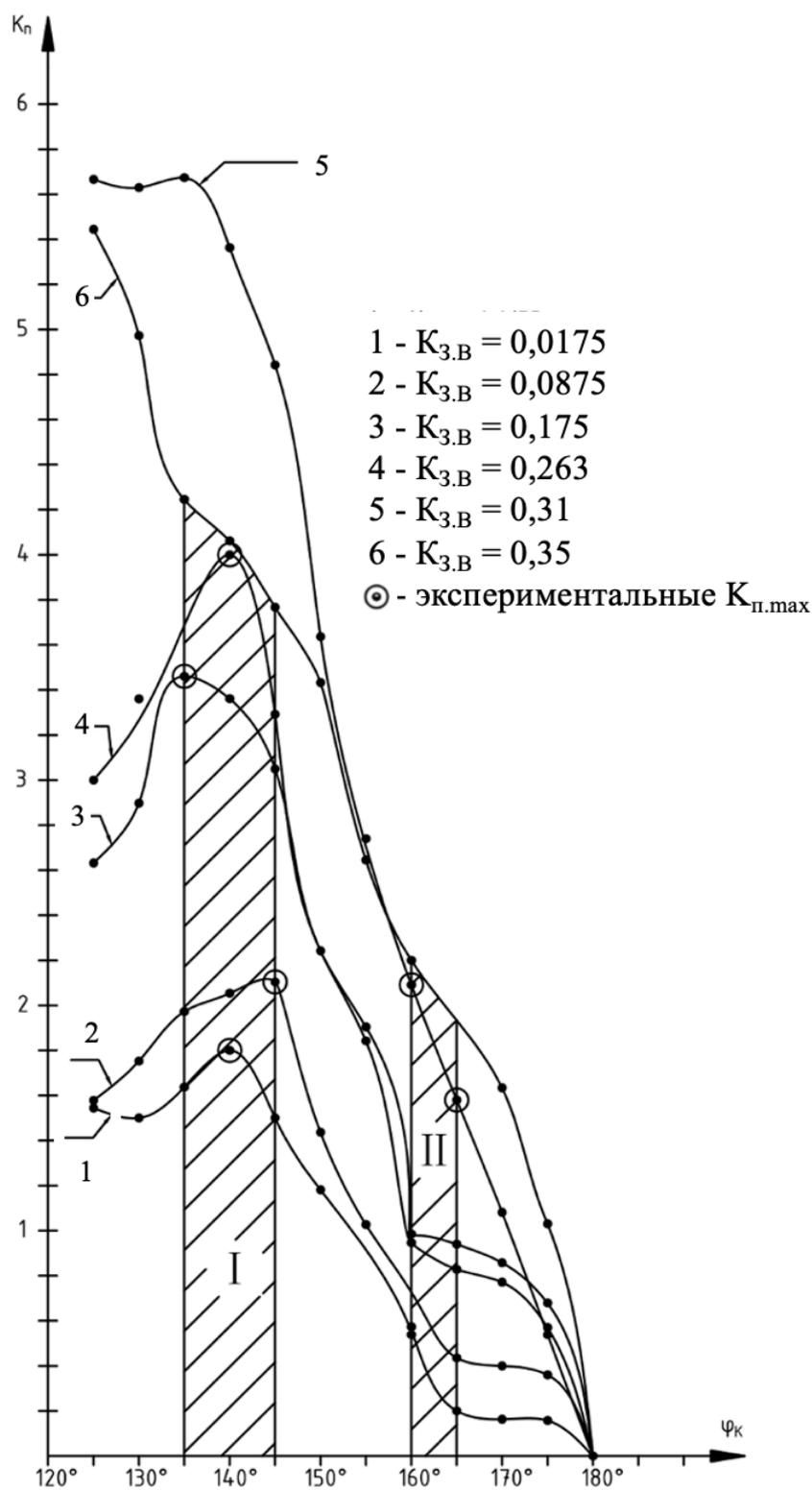


Рисунок 4.5 – Эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки вакуумного выключателя $K_{3.в.}$: $K_{п} = f(\varphi_k, K_{3.в.})$

Выделенные обведенные на рис 4.5 точки в которых максимальные кратности коммутационных перенапряжений, полученные при математическом моделировании, совпадают со значениями, полученными при экспериментальных исследований (п.3.5, рис.3.4).

На рис 4.5 определены две зоны углов коммутации при различных коэффициентах загрузки выключателя, в которых возникают максимальные перенапряжения.

Первая зона охватывает диапазон углов коммутации от 135° до 145° при коэффициентах загрузки выключателя до 0,263, что соответствует току нагрузки и коэффициенту загрузки преобразовательного трансформатора, не превышающим соответственно: 525 А и 0,75.

Вторая зона охватывает диапазон углов коммутации от 160° до 170° при коэффициентах загрузки выключателя свыше 0,263 ($K_{з.в} = 0,31$ и $K_{з.в} = 0,35$), что соответствует токам нагрузки преобразовательного трансформатора от 620 А до 700 А.

Анализ результатов математического моделирования коммутационных перенапряжений для вышеуказанных параметров, приведенных в табл. 4.4, показывает следующее:

- в первой зоне наличие 5-й и 11-й гармоник тока приводит к увеличению кратности коммутационных перенапряжений в 1,21 - 1,33 раза;
- во второй зоне наличие 5-й и 11-й гармоник тока приводит к снижению кратности коммутационных перенапряжений в 1,07 - 1,08 раза.

Математическое моделирование показало, что максимальные коммутационные перенапряжения возникают при углах коммутации от 135° до 145° и зависят от коэффициента загрузки выключателя при условии $K_{з.в} \leq 0,263$.

Максимальные значения кратностей коммутационных перенапряжений 1,8; 2,13; 3,49 и 4,03 соответствуют коэффициентам загрузки, равным, соответственно, 0,0175; 0,0875; 0,175 и 0,263.

Полученные максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений при математическом моделировании хорошо согласуется с

экспериментальными данными. Сравнительный анализ сходимости результатов моделирования и экспериментального исследования приведен в табл. 4.5

Таблица 4.5 Сравнительный анализ сходимости результатов математического моделирования и экспериментального исследования

№	Результаты исследования и их сходимость	Максимальные кратности коммутационных перенапряжений при коэффициенте загрузки выключателей при коэффициенте загрузки выключателей			
		$K_{з.в} = 0,0175$	$K_{з.в} = 0,0875$	$K_{з.в} = 0,175$	$K_{з.в} = 0,263$
1	Моделирование, $K_{п.мах.м}$	1,8	2,13	3,49	4,03
2	Экспериментальные, $K_{п.мах.э}$	1,8	2,1	3,5	4,0
3	Сходимость, $\Delta = \frac{K_{п.мах.э} - K_{п.мах.м}}{K_{п.мах.э}} * 100\%$	0,0	1,43	0,029	0,75

Сравнительный анализ результатов сходимости результатов математического моделирования и экспериментального исследования подтверждает адекватность математического моделирования.

Это показывает, что подавление 5-й и 11-й гармоник тока приводит к снижению кратности коммутационных перенапряжений при значениях коэффициента загрузки выключателя, равных 0,0175; 0,0875; 0,175 и 0,263 соответственно: с 1,8 до 1,56; с 2,13 до 1,42; с 3,49 до 2,91; с 4,04 до 3,02.

Для коэффициентов загрузки выключателя 0,0175 и 0,0875 коммутационные перенапряжения не создают риска аварийного пробоя изоляции обмоток преобразовательного трансформатора как при наличии 5-й и 11-й гармоник тока, так и при их отсутствии, поскольку максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений не превышает допустимое значение 2,8.

Для коэффициентов загрузки выключателя 0,175 и 0,263 коммутационные перенапряжения представляют опасность аварийного пробоя изоляции

обмоток преобразовательного трансформатора вне зависимости от наличия высших гармоник. В связи с этим требуется обосновать технические решения по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений.

Как отмечалось ранее, наиболее рациональным методом эффективного ограничения коммутационных перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов, не требующим значительных финансовых затрат, является увеличение коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора до значения не менее 0,88, что соответствует коэффициенту загрузки выключателя, равному не менее 0,31.

В данном случае, как показало математическое моделирование, коммутационные перенапряжения не создают угрозы для изоляции обмоток преобразовательного трансформатора независимо от наличия высших гармоник тока. Это обусловлено тем, что с увеличением тока нагрузки возрастает угол коммутации выключателя, который переходит из первой зоны во вторую. Во второй зоне кратность коммутационных перенапряжений при наличии высших гармоник тока может достигать 2,2, а при их отсутствии – снижаться до 1,97, что не превышает допустимое значение, равное 2,8.

Эксплуатационная практика преобразовательных трансформаторов показывает, что рациональным коэффициентом загрузки преобразовательных трансформаторов является значение 0,7 - 0,75. Это обеспечивает устойчивость технологического процесса в нормальных и ремонтных режимах работы преобразовательных трансформаторов. Поэтому, выполнить анализ технических мер по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений при коэффициентах загрузки, не превышающих 0,75.

В первой главе показано, что наиболее эффективным техническим решением является применение устройств по ограничению КП на основе РС-цепей.

В связи с этим целесообразно выполнить математическое моделирование коммутационных перенапряжений ПРТР со средствами защиты.

4.6 Результаты математического моделирования перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора со средствами защиты от перенапряжений

При математическом моделировании в качестве средств защиты ПРТР от коммутационных перенапряжений исследованы RC-гасители и гасители-компенсаторы, с RC-цепями с параметрами: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$ и $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$ при отключении ПРТР вакуумным выключателем от сети 10 кВ.

Результаты моделирования КП при различных углах коммутации (φ_k), нагрузки ПРТР ($I_{\text{нагр}}$), максимальных кратностей коммутационных перенапряжений ($K_{\text{п.мах}}$) и коэффициентах загрузки выключателей ($K_{\text{з.в}}$) с учетом 5-й и 11-й гармоник приведены в табл. 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6 Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при различных углах коммутации (φ_k), нагрузки ПРТР ($I_{\text{нагр}}$), максимальных кратностей коммутационных перенапряжений ($K_{\text{п.мах}}$) и коэффициентах загрузки выключателей ($K_{\text{з.в}}$) с учетом 5-й и 11-й гармоник – RC-цепи с $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$

№		Угол коммутации, φ											
		125 °	130 °	135 °	140 °	145 °	150 °	155 °	160 °	165 °	170 °	175 °	180 °
$I_{\text{нагр}} = 35 \text{ А}$, $K_{\text{п.мах}} = 1,8$, $K_{\text{з.в.}} = 0,0175$													
1	$U_1(t)$, кВ	12,72	12,46	11,5	12	9,33	8,14	6,88	5,56	3,51	2,82	1,42	0
2	$U_5(t)$, кВ	-1,48	-0,96	1,31	1,88	2,12	0,82	1,33	-1,33	-2,07	-1,55	-0,29	0
3	$U_{11}(t)$, кВ	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	0
4	$U(t)$, кВ	11,28	11,5	12,81	13,88	11,45	8,96	8,21	4,23	1,44	1,27	1,13	0
5	КП	1,13	1,15	1,28	1,39	1,15	0,9	0,82	0,42	0,14	0,13	0,11	0
$I_{\text{нагр}} = 175 \text{ А}$, $K_{\text{п.мах}} = 2,1$, $K_{\text{з.в.}} = 0,0875$													
1	$U_1(t)$, кВ	14,9	14,36	12,95	11,21	10,75	9,37	7,92	6,41	4,06	3,26	1,64	0
2	$U_5(t)$, кВ	-1,73	-1,1	1,51	2,17	3,2	3,23	2,29	-1,53	-2,38	-1,78	-0,34	0
3	$U_{11}(t)$, кВ	-1,62	0	0,91	1,83	2,22	-1,45	-2,03	0,93	2,04	2	1,45	0

Продолжение табл. 4.6

I _{нагр} = 175 А, K _{п.маx} = 2,1, K _{з.в.} = 0,0875													
4	U(t), кВ	11,63	13,26	15	15,21	16,17	11,14	8,17	3,95	3,72	3,48	2,75	0
5	KП	1,16	1,33	1,5	1,52	1,62	1,11	0,82	0,4	0,37	0,35	0,28	0
I _{нагр} = 350 А, K _{п.маx} = 3,5, K _{з.в.} = 0,175													
1	U ₁ (t), кВ	24,76	23,5	21,69	19,66	17,6	15,12	12,97	10,49	6,63	5,33	2,67	0
2	U ₅ (t), кВ	-2,88	-1,75	2,47	3,03	3,99	3,01	2,51	-2,78	-3,9	-2,92	-0,55	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-2,69	0	1,85	2,4	1,48	-1,31	-1,84	-0,76	3,28	3,37	2,39	0
4	U(t), кВ	19,2	21,75	26,04	25,09	23,12	16,88	13,64	6,95	6,01	5,78	4,51	0
5	KП	1,92	2,18	2,6	2,51	2,31	1,68	1,36	0,7	0,6	0,58	0,45	0
I _{нагр} = 525 А, K _{п.маx} = 4,0, K _{з.в.} = 0,263													
1	U ₁ (t), кВ	28,3	26,47	22,23	22,21	19,82	17,28	14,6	11,82	7,45	6	3,01	0
2	U ₅ (t), кВ	-3,29	-2,04	2,76	4,01	4,49	1,76	2,83	-2,83	-4,39	-3,29	-0,63	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-3,07	0	3,07	3,38	0	-2,68	-3,7	-1,73	3,75	3,8	2,69	0
4	U(t), кВ	21,9	24,43	28,08	29,6	24,32	16,35	13,68	7,26	6,82	6,51	5,06	0
5	KП	2,19	2,44	2,81	2,96	2,43	1,64	1,37	0,73	0,68	0,65	0,51	0
I _{нагр} = 620 А, K _{п.маx} = 2,0, K _{з.в.} = 0,31													
1	U ₁ (t), кВ	47,1	41,74	36,21	35,03	31,86	27	23,03	14,28	13,22	9,46	4,75	0
2	U ₅ (t), кВ	-1,64	-1,01	1,51	1,98	2,21	0,87	1,4	-1,4	-1,54	-1,62	-0,31	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-3,54	0	3,49	3,83	1,11	-3,04	-4,29	2,69	2,62	4,31	3,04	0
4	U(t), кВ	41,9	40,73	41,17	40,84	35,17	24,82	20,4	15,57	14,3	12,15	7,48	0
5	KП	4,19	4,07	4,12	4,08	3,52	2,48	2,04	1,56	1,43	1,22	0,75	0

I _{нагр} = 700 А, K _{п.маx} = 1,6, K _{з.в.} = 0,35													
1	U ₁ (t), кВ	40,3	35,21	30,5	29,5	26,86	22,71	19,43	15,7	11,14	8,12	3,58	0
2	U ₅ (t), кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
4	U(t), кВ	40,3	35,21	30,5	29,5	26,86	22,71	19,43	15,7	11,14	8,12	3,58	0
5	K _п	4,03	3,52	3,05	2,95	2,69	2,27	1,94	1,57	1,11	0,81	0,36	0

Таблица 4.7 Результаты математического моделирования коммутационных перенапряжений при различных углах коммутации (φ_k), нагрузки ПРТР (I_{нагр}), максимальных кратностей коммутационных перенапряжений (K_{п.маx}) и коэффициентах загрузки выключателей (K_{з.в.}) с учетом 5-й и 11-й гармоник – RC-цепи с R = 30 Ом, C = 0,75 мкФ

№		Угол коммутации, φ											
		125 °	130 °	135 °	140 °	145 °	150 °	155 °	160 °	165 °	170 °	175 °	180 °
I _{нагр} = 35 А, K _{п.маx} = 1,8, K _{з.в.} = 0,0175													
1	U ₁ (t), кВ	17,88	7,36	6,8	7,1	5,51	4,8	4,06	3,29	2,08	1,67	0,84	0
2	U ₅ (t), кВ	-0,91	-0,57	0,77	1,11	1,25	0,49	0,79	-0,79	-1,22	-0,91	-0,17	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	U(t), кВ	6,97	6,8	7,57	8,2	6,76	5,3	4,85	2,5	0,85	0,76	0,66	0
5	K _п	0,7	0,68	0,76	0,82	0,68	0,53	0,49	0,35	0,09	0,08	0,07	0
I _{нагр} = 175 А, K _{п.маx} = 2,1, K _{з.в.} = 0,0875													
1	U ₁ (t), кВ	8,1	7,58	6,36	5,92	5,67	4,95	4,18	3,38	2,14	1,72	0,86	0
2	U ₅ (t), кВ	-0,94	-0,58	0,8	1,15	1,69	1,7	1,21	0,81	1,26	-0,94	-0,18	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-0,88	0	0,48	0,97	1,17	0,77	1,07	-0,49	1,08	1,09	0,77	0

Продолжение табл. 4.7

I _{нагр} = 175 А, K _{п.мах} = 2,1, K _{з.в.} = 0,0875													
4	U(t), кВ	6,3	7	7,92	8,04	8,54	5,8	4,31	2,08	1,96	1,87	1,45	0
5	K _п	0,63	0,7	0,79	0,8	0,85	0,59	0,43	0,21	0,2	0,19	0,15	0
I _{нагр} = 350 А, K _{п.мах} = 3,5, K _{з.в.} = 0,175													
1	U ₁ (t), кВ	12,03	11,25	10,38	9,44	8,42	7,34	6,21	5,02	3,18	2,55	1,28	0
2	U ₅ (t), кВ	-1,4	0,87	1,18	1,45	1,91	1,46	1,2	-1,33	-1,87	-1,4	-0,26	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-1,31	0	0,89	1,15	0,71	-0,64	-0,88	-0,38	1,59	1,61	1,14	0
4	U(t), кВ	9,33	10,38	12,45	12,04	11,06	8,16	6,53	-3,32	2,93	2,76	2,16	0
5	K _п	0,93	1,04	1,25	1,2	1,11	0,82	0,65	0,33	0,29	0,28	0,22	0
I _{нагр} = 525 А, K _{п.мах} = 4,0, K _{з.в.} = 0,263													
1	U ₁ (t), кВ	12,42	11,61	9,75	9,75	8,7	7,58	6,41	5,18	3,28	2,63	1,32	0
2	U ₅ (t), кВ	-1,4	-0,89	1,22	1,76	1,97	0,77	1,15	-1,24	-1,93	-1,44	-0,27	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-1,35	0	1,35	1,48	0	-1,18	1,65	-0,76	1,65	1,67	1,18	0
4	U(t), кВ	9,63	10,72	12,32	13	10,67	7,17	6	3,18	3	2,26	2,23	0
5	K _п	0,96	1,07	1,23	1,3	1,07	0,72	0,6	0,32	0,3	0,22	0,23	0
I _{нагр} = 620 А, K _{п.мах} = 2,0, K _{з.в.} = 0,31													
1	U ₁ (t), кВ	18,8	16,9	14,7	14,22	12,93	10,96	9,35	5,79	5,36	3,84	1,93	0
2	U ₅ (t), кВ	-0,66	-0,41	0,61	0,8	0,89	0,35	0,56	-0,57	-0,62	-0,65	-0,13	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-1,42	0	1,42	1,56	0,45	-1,24	-1,74	1,09	1,51	1,75	1,23	0
4	U(t), кВ	16,76	16,53	16,71	15,76	14,28	10,08	8,17	6,2	5,8	4,94	3,04	0
5	K _п	1,63	1,65	1,67	1,58	1,43	1,01	0,82	0,62	0,58	0,49	0,3	0

Продолжение табл. 4.7

I _{нагр} = 700 А, K _{п.макс} = 1,6, K _{з.в.} = 0,35													
1	U ₁ (t), кВ	14,42	12,9	11,2	10,9	9,89	8,37	8,15	5,79	4,11	2,95	1,48	0
2	U ₃ (t), кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3	U ₁₁ (t), кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
4	U(t), кВ	14,42	12,9	11,2	10,9	9,89	8,37	8,15	5,79	4,11	2,95	1,48	0
5	K _п	1,44	1,29	1,12	1,09	0,99	0,84	0,72	0,58	0,41	0,3	0,15	0

Анализ данных табл. 4.6, 4.7 показывает, что:

- применение RC-цепей с параметрами $R = 30$ Ом, $C = 0,25$ мкФ (табл. 4.6) при коэффициенте загрузки выключателя 0,263, что эквивалентно току нагрузки 525 А, и углах коммутации $135^\circ - 140^\circ$, максимальная кратность коммутационных перенапряжений находится в диапазоне 2,81-2,96, что превышает предельно допустимое значение, равное 2,8;

- применение RC-цепей с параметрами $R = 30$ Ом; $C = 0,75$ мкФ (табл. 4.7) показало, что во всех рассмотренных вариантах математического моделирования режимов коммутации преобразовательного трансформатора максимальная кратность коммутационных перенапряжений достигает значения 1,68 (рис 4.6 б), что свидетельствует о высокой эффективности использования RC-цепи с вышеуказанными параметрами.

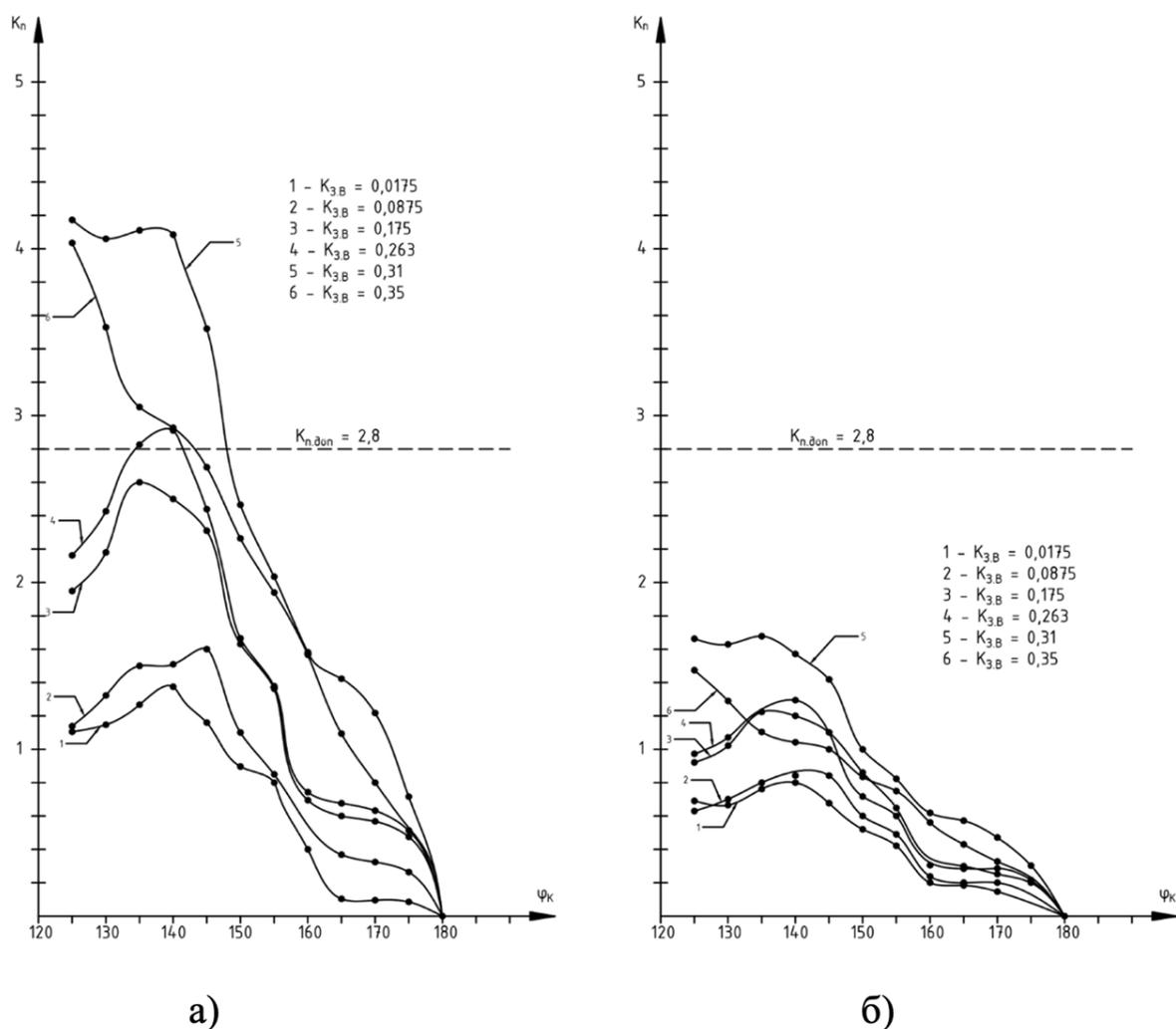


Рисунок 4.6 – Эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$: а) без применения RC-цепей, б) с применением RC-цепей с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$; $C = 0,75 \text{ мкФ}$

Оценка эффективного ограничения коммутационных перенапряжений с применением RC-цепей выполнена на основе физического моделирования, результаты которого приведены в главе 5.

В главе 5 также приведены результаты опытной эксплуатации устройства на базе RC-цепей с наиболее эффективной схемой их соединения.

4.7 Выводы по главе 4

1. Определен гармонический состав токов нагрузки преобразовательных трансформаторов, показывающий, что основными гармониками тока нагрузки является 5-я и 11-я гармоники. Доля 5-й и 11-й гармоник в

суммарном токе высших гармоник составляет от 40 до 98,5% при коэффициенте загрузки преобразовательных трансформаторов от 1,0 до 0,05 и суммарного коэффициента гармонических составляющих от 1,15 до 30,5%.

2. Установлено увеличение/уменьшение среза тока в зависимости от угла коммутации и полярностей 1-й, 5-й и 11-й гармоник в 1,86 раза.
3. В результате математического моделирования получены эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов от угла коммутации в схемах электроснабжения без средств защиты от перенапряжений, показывающие, что снижение кратности коммутационных перенапряжений до значений, не представляющих опасности для изоляции обмоток преобразовательных трансформаторов ($K_{п.маx} < 2,8$), может быть достигнуто за счет увеличения угла коммутации до значений $\varphi_k \geq 150^\circ \pm \pi$. Это позволяет снизить кратность коммутационных перенапряжений до значений, не превышающих 2,4.
4. В результате математического моделирования получены эмпирические зависимости коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов от угла коммутации в схемах электроснабжения со средствами защиты от перенапряжений, показывающие, что применение RC-цепей с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$; $C = 0,75 \text{ мкФ}$ показало, что во всех рассмотренных вариантах математического моделирования режимов коммутации преобразовательных трансформаторов максимальная кратность коммутационных перенапряжений достигает значения 1,68. Кратность коммутационных перенапряжений, равная 1,68 обеспечивает исключение рисков аварийного пробоя изоляции преобразовательных трансформаторов, что повышает энергоэффективность функционирования сетей 10 кВ предприятий по производству алюминия.

5 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ РС-ЦЕПЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЯ НОВОКУЗНЕЦКОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА

5.1 Общие сведения и установка для физического моделирования

Моделирование коммутационных перенапряжений на полунатурной физической установке, реализующей схему «выключатель – кабельная линия – трансформатор».

Полунатурная физическая установка включала (рис.5.1-5.5): вакуумный контактор типа ВСА – 6А; участок кабельной линии (КГ 5х6); силовой трансформатор ТМ 250–0,38/0,22; делитель напряжения РДН–1000; регистраторы коммутационных перенапряжений Tektronix TDS 2024В, LeCroy WaveRunner 64МХi.

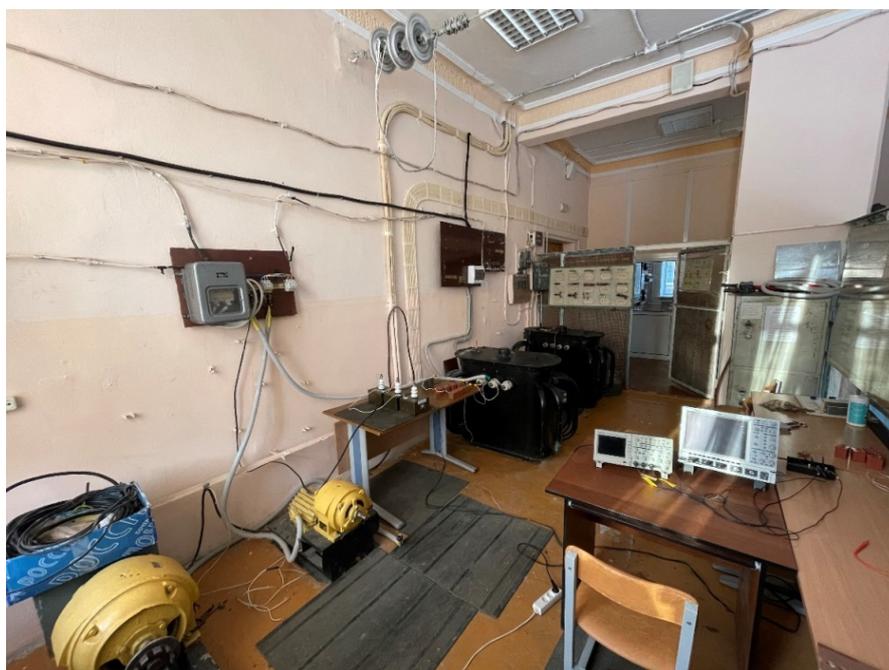


Рисунок 5.1 – Физическая модель схем РС-цепей



Рисунок 5.2 – Внешний вид активного делителя типа РДН–1000



Рисунок 5.3 – Внешний вид вакуумного контактора типа VCA – 6A



Рисунок 5.4 – Регистратор коммутационных перенапряжений

1 – LeCroy WaveRunner 64MXi

2 – в Tektronix TDS 2024B



Рисунок 5.5 – Внешний вид трансформатора ТМ 250–0,38/0,22

Исследование коммутационных перенапряжений проводилось при включении, отключении для следующих режимов коммутации силового трансформатора:

1. без средств защиты от коммутационных перенапряжений;
2. со средствами защиты от коммутационных перенапряжений с использованием RC-цепей.

Моделирование RC-цепей проводилось в соответствии со схемами, приведенными на рис. 5.6.

В настоящее время в ООО «НПП «РУТАС» в промышленных масштабах выпускаются RC-гасители типа RC-0,5-0,25/-УХЛ1 и гасители-компенсаторы типа ГК-10,5-0,75-УХЛ1 [115, 116].

Схема соединения резисторов и конденсаторов, приведенная на рис. 5.6 г. предложена автором настоящей диссертационной работы.

В RC-гасителе RC-цепи собраны по схеме «звезда» с изолированной нейтральной точкой (рис. 5.6 а). Параметры RC-цепи составляют: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$.

В гасителе-компенсаторе конденсаторы собраны по схеме «треугольник», емкость одного конденсатора составляет 0,75 мкФ (рис. 5.6 в).

При выполнении исследований по эффективности RC-цепей и конденсаторов были использованы следующие параметры RC-цепей: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$ и $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$, а значение емкости конденсаторов, собранных по схеме «треугольник», принимались равными 0,25 мкФ и 0,75 мкФ.

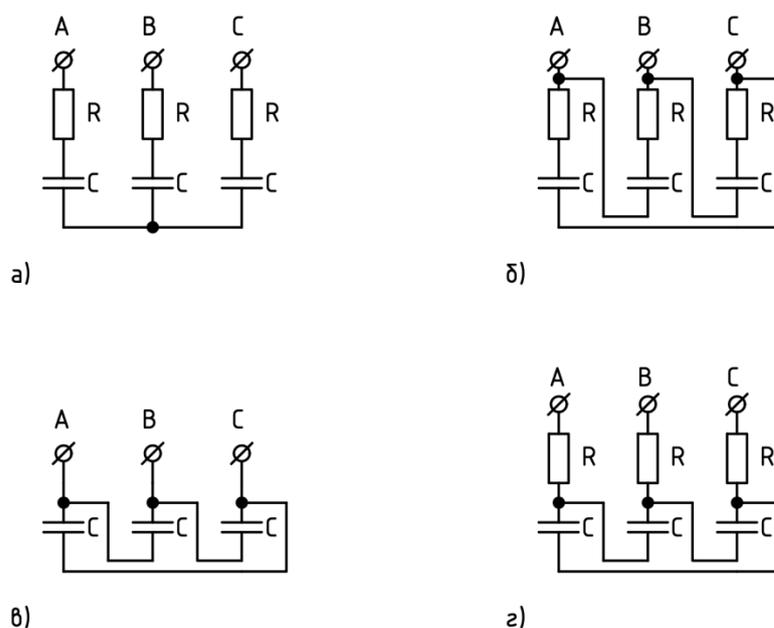


Рисунок 5.6 – Схемы соединения RC-цепей, собранных по схемам: а) звезда с изолированной нейтральной точкой; б) по схеме треугольник, в) конденсаторы по схеме треугольник, г) треугольник конденсаторов с последовательным включением резисторов в фазы А,В,С

Эффективность схемы, приведенных на рис 5.6, проводилось с оценкой коэффициента эффективности в соответствии с выражением:

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{п.}max1}}{K_{\text{п.}max2}} \quad (5.1)$$

где $K_{\text{п.}max1}$ – максимальная кратность коммутационных перенапряжений без средств ограничений

$K_{\text{п.}max2}$ – максимальная кратность коммутационных перенапряжений со средствами ограничений

5.2 Результаты физического моделирования перенапряжений

Результаты физического моделирования коммутационных перенапряжений приведены в табл. 5.1. Осциллограммы коммутационных перенапряжений, полученные на полунатурной физической установке, приведены в приложении 4.

Сравнение коэффициентов эффективности схем по ограничению коммутационных перенапряжений показывает, что устройство, приведенное на рис. 5.6 (г), имеет коэффициент эффективности, превышающий аналогичные показатели устройств со схемами, на рис. 5.6 (а), 5.6 (б) и 5.6 (в), соответственно в 2,03, 1,79, 1,43 раза.

В связи с этим схема устройства на рис. 5.6 (г), в которой конденсаторы ёмкостью 0,75 мкФ собраны по схеме «треугольник», а резисторы номиналом 30 Ом подключены последовательно с треугольником конденсаторов, демонстрирует наибольшую эффективность по ограничению коммутационных перенапряжений.

Таблица 5.1 Результаты физического моделирования коммутационных перенапряжений

№	Вид коммутации	Перенапряжения без средств их ограничения, $K_{п1}$	Перенапряжения со средствами их ограничения										
			RC-цепи по схеме звезда, $R = 30 \text{ Ом}, C = 0,25 \text{ мкФ}$ (рис. 5.6, а)		RC-цепи по схеме треугольник, $R = 30 \text{ Ом}, C = 0,25 \text{ мкФ}$ (рис. 5.6, б)		RC-цепи по схеме треугольник, $R = 30 \text{ Ом}, C = 0,75 \text{ мкФ}$ (рис. 5.6, а)		Конденсаторы по схеме треугольник, $R = 30 \text{ Ом}, C = 0,75 \text{ мкФ}$ (рис. 5.6, в)		R и C собраны по схеме на рис. 5.6 г, $R = 30 \text{ Ом}, C = 0,75 \text{ мкФ}$ (рис. 5.6, г)		
			$K_{п2}$	$K_{эф}$	$K_{п2}$	$K_{эф}$	$K_{п2}$	$K_{эф}$	$K_{п2}$	$K_{эф}$	$K_{п2}$	$K_{эф}$	
1	Включение	Менее 1	Менее 1	3,41	Менее 1	3,41	Менее 1	3,41	Менее 1	3,41	Менее 1	3,41	
2	Включение	3,41	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
3	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
4	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
5	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
6	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
7	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
8	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
9	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1
10	Включение	Менее 1	Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1		Менее 1

Продолжение табл. 5.1

11	Отключение	5,9	6,6	1,97	3,6		2,23	2,75	4,6	2,83	2,2	3,94
12	Отключение	3,7	4,5		4,1		2,5		1,9			
13	Отключение	6,0	5,0		3,5		3,8		3,4			
14	Отключение	9,6	6,0		5,5		4,7		2,3			
15	Отключение	8,2	4,7		5,9	2,2	3,2		1,7			
16	Отключение	6,9	5,4		2,5		1,7		3,4			
17	Отключение	13	5,4		3,4		2,5		2,2			
18	Отключение	11,1	6,0		5,3		4,0		4,8			
19	Отключение	11,7	4,5		5,9		2,3		3,2			
20	Отключение	8,6	5,6		4,3		3,3		2,0			
21	Осциллограммы с К _{п.мах}	Рис.ПЗ.1, Рис.ПЗ.2	Рис.ПЗ.3, Рис.ПЗ.4		Рис.ПЗ.5, Рис.ПЗ.6		Рис.ПЗ.7, Рис.ПЗ.8		Рис.ПЗ.9, Рис.ПЗ.10		Рис.ПЗ.11, Рис.ПЗ.12	

На предприятии ООО «НПП «РУТАС», специализирующемся на производстве RC-гасителей и гасителей-компенсаторов, была принята и внедрена предложенная схема соединения конденсаторов ёмкостью 0,75 мкФ по схеме «треугольник» с последовательным включением резисторов номиналом 30 Ом в каждую фазу треугольника. Устройство, реализованное на основе данной схемы, получило обозначение ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1.

5.3 Результаты опытной эксплуатации устройств типа ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1

Согласно результатам экспериментальных исследований и математического моделирования, максимальные коммутационные перенапряжения возникают при коэффициентах загрузки элегазовых и вакуумных выключателей больших или равных 0,263 с максимальным током 2000А. Это соответствует току нагрузки и коэффициенту загрузки преобразовательного трансформатора, равным соответственно 525 А и 0,75.

Для оценки эффективности устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1, предназначенного для ограничения коммутационных перенапряжений, были проведены измерения перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов ТДЦПФУД – 25000/10–У1 с током нагрузки 525 А. Коммутация осуществлялась с использованием элегазового выключателя типа LF-2 и вакуумного выключателя ВВ-СВЕЛ-10-40/2000 на Новокузнецком алюминиевом заводе.

В ходе выполнения измерений преобразовательные трансформаторы ТДЦПФУД–25000/10–У1 эксплуатировались совместно с устройствами ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1, которые были подключены к вводу 10 кВ трансформаторов.

Внешний вид устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1 приведен на рис. 5.7.



Рисунок 5.7 – Внешний вид устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1

Технические характеристики устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1 приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 Технические характеристики ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	6,3/10,5
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12,5
Уровень ограничения коммутационных перенапряжений, кВ	$(1,22 - 1,68) U_n$
Номинальная емкость конденсатора, мкФ	0,75
Номинальная частота тока, Гц	50
Сопротивление резистора, Ом	30

Мощность резистора, Вт	500
Габариты ВхШхГ, мм	750x750x550
Масса, кг	Не более 80 кг
Срок эксплуатации, лет	16
Степень защиты шкафа	IP-54/IP-65

В табл. 5.3 приведены результаты измерений перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов элегазовым и вакуумным выключателями. К вводам трансформаторов были подключены устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1, при токе нагрузки 525 А

На рис. 5.8 и 5.9 соответственно приведены осциллограммы максимальных перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов элегазовым и вакуумным выключателями при токе нагрузки 525 А.

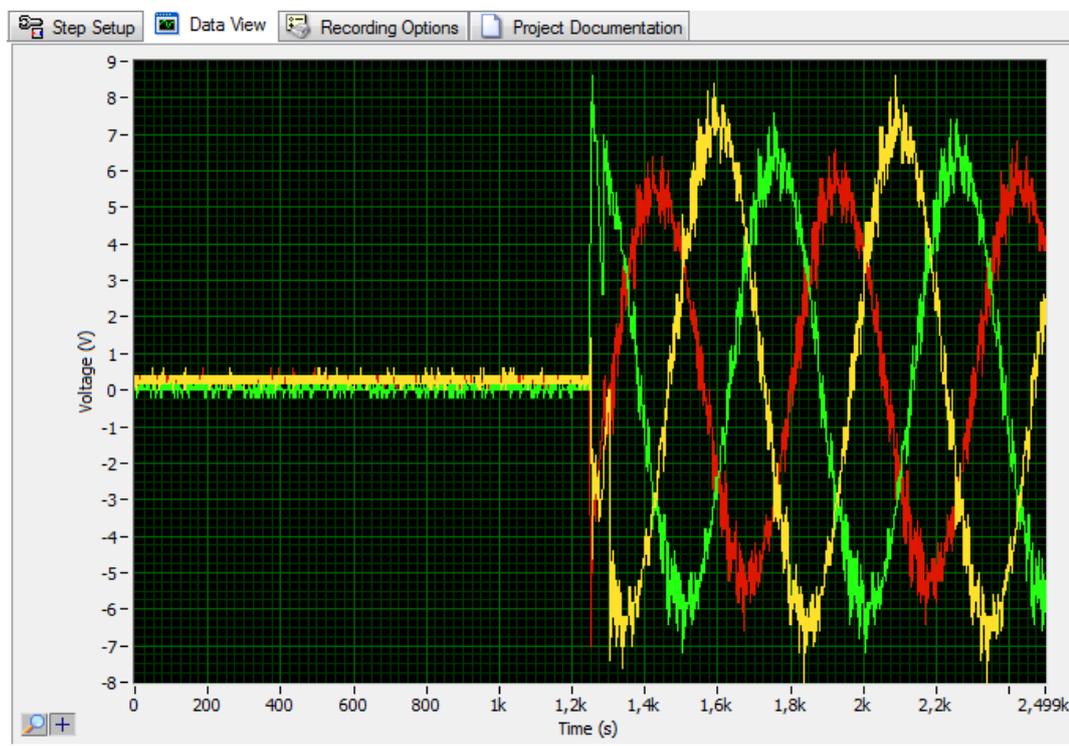
Таблица 5.3 Кратность коммутационных перенапряжений при совместной эксплуатации преобразовательных трансформаторов с устройствами ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1

№	Вид коммутации	Кп при использовании элегазового выключателя	Кп при использовании вакуумного выключателя
1	Включение	Менее 1	1,02
2	Включение	Менее 1	Менее 1
3	Включение	Менее 1	Менее 1
4	Включение	Менее 1	Менее 1
5	Включение	Менее 1	1,05
6	Включение	Менее 1	Менее 1
7	Включение	Менее 1	Менее 1
8	Включение	Менее 1	Менее 1
9	Включение	Менее 1	1,0
10	Включение	Менее 1	Менее 1

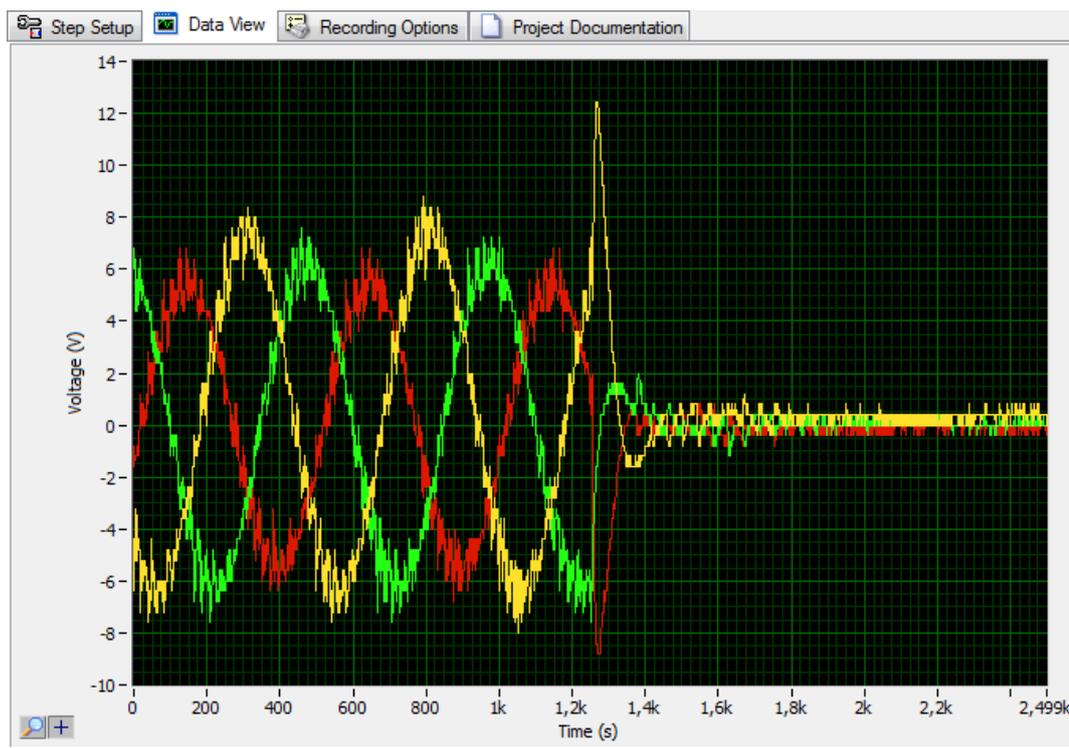
11	Отключение	1,1	1,21
12	Отключение	1,05	1,09
13	Отключение	1,15	1,3
14	Отключение	1,25	1,18
15	Отключение	1,2	1,35
16	Отключение	1,23	1,12
17	Отключение	1,1	1,33
18	Отключение	1,08	1,08
19	Отключение	1,25	1,26
20	Отключение	1,12	1,35

Анализ данных, приведенных в табл. 5.3, показывает, что в реальных условиях эксплуатации устройств ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1 для защиты преобразовательного трансформатора от перенапряжений при коммутации элегазовым или вакуумным выключателями максимальная кратность коммутационных перенапряжений не превышала соответственно 1,25 и 1,35.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами математического моделирования и подтверждают рациональность предложенной схемы устройства. В частности, кратность перенапряжений при отключении преобразовательного трансформатора с током нагрузки 525 А вакуумным выключателем в математической модели составила 1,5, а в условиях опытной эксплуатации – 1,35, что соответствует отклонению результатов не более 11%.



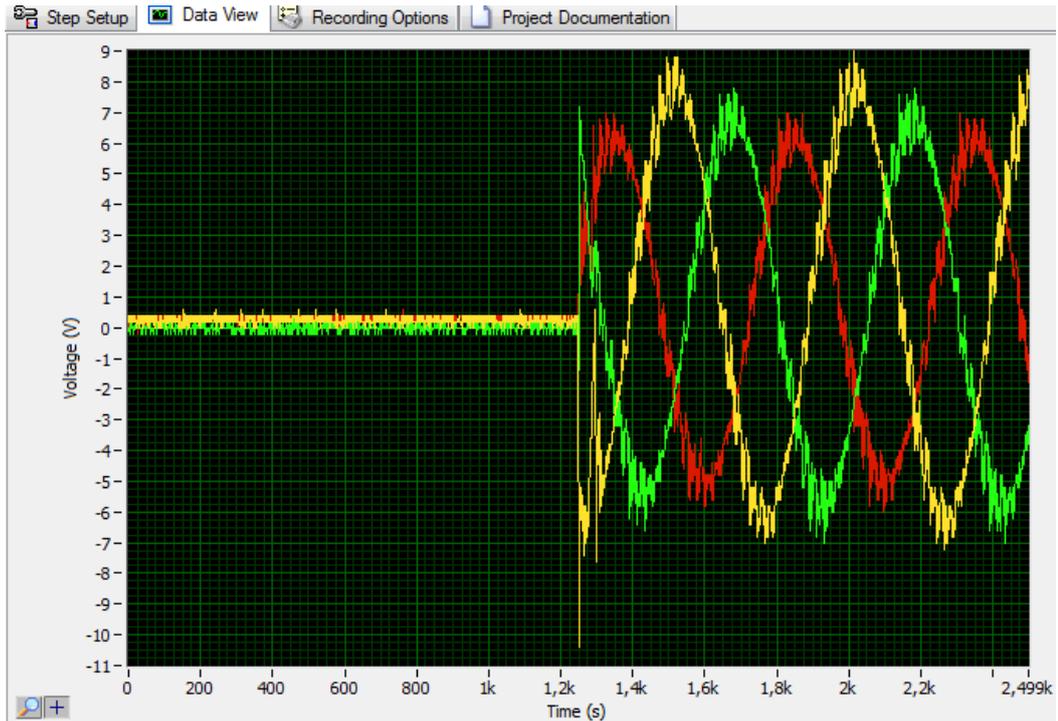
а) Включение, $K_{п} < 1$



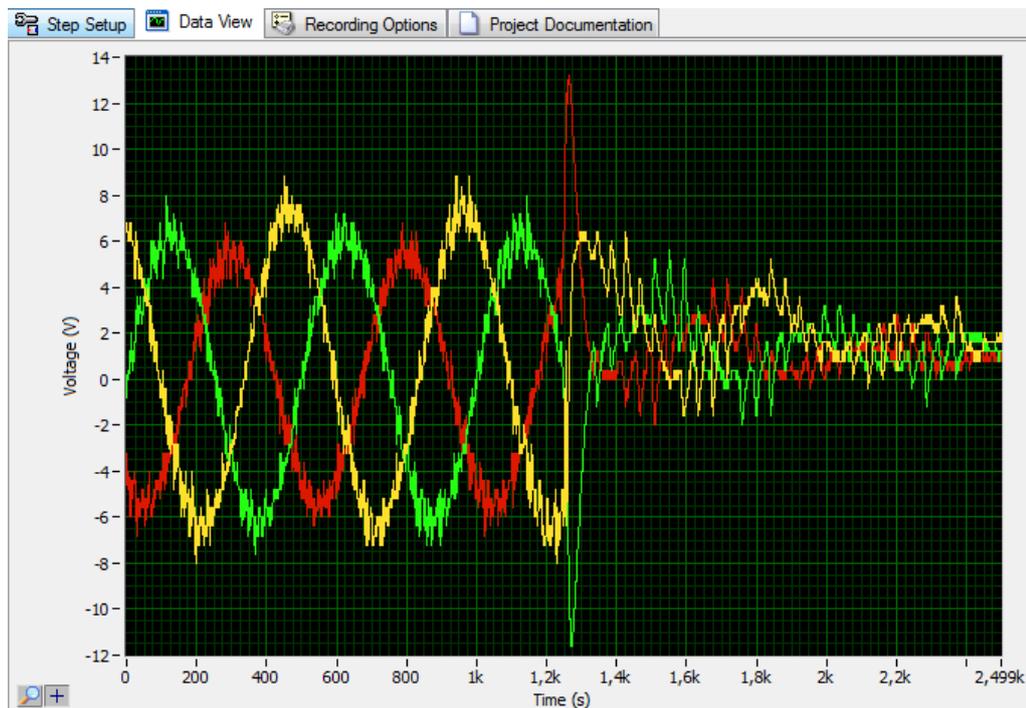
б) Отключение, $K_{п} = 1,25$

Рисунок 5.8 – Осциллограммы максимальных перенапряжений при коммутации преобразовательного трансформатора элегазовым выключателем. В качестве устройства защиты от коммутационных перенапряжений используется

ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1



а) включение, $K_{п}=1,05$



б) Отключение, $K_{п}=1,35$

Рисунок 5.9 – Осциллограммы максимальных перенапряжений при коммутации преобразовательного трансформатора вакуумным выключателем. В качестве устройства защиты от коммутационных перенапряжений используется

ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1

Коммутационные перенапряжения, ограниченные устройством ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1, не представляют опасности для изоляции преобразовательного трансформатора, поскольку их кратность перенапряжений не превышает допустимого значения, равного 2,8. Это подтверждает высокую эффективность разработанного устройства.

5.4 Выводы по главе 5

На основании результатов физического моделирования и опытной эксплуатации предложенного устройства для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений сформулированы следующие выводы:

1. Физическое моделирование схем устройств по ограничению коммутационных перенапряжений показало, что схема с соединением конденсаторов в треугольник с включением активных сопротивлений в три фазы (рис. 5.6, г) имеет наибольший коэффициент эффективности, превышающий коэффициенты эффективности схем, приведенных на рис. 5.6, а; 5.6, б; 5.6, в, соответственно, в 2,03, 1,79, 1,43 раза. Указанная на рис. 5.6, г схема имеет параметры элементов: активных сопротивлений – 30 Ом, конденсаторов – 0,75 мкФ.
2. Разработанное устройство по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов – гаситель-компенсатор. ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1 внедрено и успешно функционирует на Новокузнецком предприятии по производству алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности функционирования систем электропитания 10 кВ предприятий по производству алюминия на основе ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Основные научные выводы и решения, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Анализе динамики причин аварийности в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия;
2. Разработке методических принципов исследования режимов коммутационных перенапряжений в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия;
3. Экспериментальных измерениях, обработке и анализе экспериментальных данных;
4. Физическом полунатурном моделировании режимов коммутационных перенапряжений;
5. Установлении эмпирических зависимостей кратности перенапряжений от параметров коммутационных режимов;
6. Научно-техническом обосновании и разработке схемных решений устройств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений.

Внедрение основных результатов работы привело к следующим практическим эффектам:

- получена оценка показателей режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов электролизного производства;
- разработано схемное решение по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов;

- разработано и внедрено устройство по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1;

- исключение рисков аварийного пробоя изоляции преобразовательных трансформаторов;

- повышение эффективного функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Основные положения диссертационного исследования изложены в следующих работах:

1. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>
2. Тихонов А.В. Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе исследования номинальных режимов преобразовательных трансформаторов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 489–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.
3. Кузьмин С.В., Тихонов А. В., Тихонов К. В. О влиянии диагностики внутренних дефектов преобразовательных трансформаторов на повышение надежности // Энергетик. – 2026. – № 2. DOI: 10.71527/EP.EN.2026.02.003

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с элиминацией 5-й и 11-й гармоник в токе нагрузки преобразовательных трансформаторов, обеспечивающей лучшие условия эксплуатации изоляции для увеличения срока ее службы.

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. Кузьмин С. В. Анализ аварийности в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири и основные направления по снижению аварийности [Текст] / С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова, Р.С. Кузьмин, И.С. Зыков // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 22 – 24.
17. Кузьмин С.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6 - 10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова, 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. Кузьмин С.В. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий [Текст] / С.В. Кузьмин, В.А. Меньшиков, Е.В. Гаврилова, М.В. Коровина // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - №3. – С. 6 – 9.
20. Кузьмин Р.С. Исследование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6-10 кВ горнометаллургических предприятий в режиме однофазного замыкания на землю [Текст] / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, Е.В. Гаврилова, Р.А. Майнагашев // Сборник материалов I международной научно-практической конференции «Интехмет-2008» // Санкт-Петербург. – 2008. – С. 66 – 67.
21. Кузьмин С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий [Текст] / С.В. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, С.В. Немков, Е.В. Гаврилова // 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. Кузьмин С.В. Электромагнитная совместимость средств защиты от коммутационных перенапряжений с защищаемыми объектами [Текст] / С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова, 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 РС-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

- соискание 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 горнометаллургических 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 помощью

- 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. Смирнов,

- 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. Гаврилова Е.В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ / Е.В. Гаврилова // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Красноярск СФУ 2011 г.
88. Емельянов Н.И. Экспериментальное исследование и моделирование коммутационных перенапряжений и средств защиты присоединений с трансформаторами 6–35 кВ / Н.И. Емельянов, М.В. Ильиных, М.Л. Кириченко // *Релейная защита и автоматизация*. 2021, №3 С.58-69.
89. Овсянников А.Г. Опыт измерений коммутационных перенапряжений в условиях эксплуатации / А.Г. Овсянников, Р.А. Войтович, Ю.А. Лавров, С.С. Шевченко // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2022. – № 2 (71). – С. 98–107.
90. Адалев А.С. Расчет РС-цепей, коммутационных перенапряжений и потерь энергии в тиристорных преобразователях / А.С. Адалев, В.В. Глушаков, Р.А. Карзунов М.В. Пронин, Н. И. Федоров // И. Федоров // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2022. Т. 15, № 7. С. 57-65.

91. Кузьмин Р. С. Влияние компенсации реактивной мощности на величину перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов / Р.С. Кузьмин, А.А. Завалов, Р.А. Майнагашев, В.А. Меньшиков, И.С. Кузьмин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т332 №3 С.197-209.
92. Назиров Х.Б. Результаты оценки токов и напряжения высших гармоник на основе моделирования системы электроснабжения предприятия / Назиров Х.Б., Абдулкеримов С.А. // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. №3 (72). – С. 48-53
93. Куликовский В. С., Кручек, О. А., Герасимов, А. И., Ковалева, О. А., Кузьмин, С. В. (2021). Электроснабжение и электрооборудование горных предприятий.
94. Абрамович Б.Н. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для питания электролизеров алюминия / Абрамович Б.Н., Веприков А.А., Сычев Ю.А., Хомяков К.А. // Цветные металлы. 2016. №10 С.49–53.
95. Галевский Г.В. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация/ Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, М.Я. Минцис, Г. А. Сиразудинов. - 4-е изд., стер. - Москва : Флинта, 2017. - 529 с.
96. Бажин В.Ю. Электрометаллургия алюминия: Учебное пособие / В.Ю. Бажин; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб: 2012. 56 с.
97. Бажин, В.Ю. Концепция энергоэффективного производства алюминия «электролиз 600+» // В.Ю. Бажин, А.Д. Смольников, П.А. Петров // Международный научно-исследовательский журнал. - 2016. № 5 (47) 3. - 37-40.
98. Макаров А.М. Влияние количественных и качественных характеристик технологического тока на процесс электролиза алюминия / А.М. Макаров // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук – 2006.

99. Медведева М.Л. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6 –10 кВ в горной отрасли. / Медведева М.Л., Кузьмин С.В., Кузьмин И.С., Шманев В.Д. // Надежность и безопасность энергетики. 2017. – Т. 10, №2. – С. 120 – 125.
100. Кузьмин С.В. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-10 кв и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, Е.В. Умецкая, И.С. Кузьмин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал 2020. №3 С.113-124.
101. Кузьмин Р.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях: научное издание / Р.С. Кузьмин, И.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, С.В. Кузьмин, В.С. Куликовский // Известия высших учебных заведений. Горный журнал 2020. №5 С.116-132.
102. Кузьмин Р.С. Коммутационные перенапряжения в режиме однофазного замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков. И.С. Кузьмин // Материалы международной конференции, Г. Владивосток, 2020. С.37-41.
103. Ляхомский А.В. Анализ динамики аварийности и повышение эффективности защиты от однофазных замыканий на землю в сетях и электрооборудовании 6-10 кв карьеров и разрезов / А.В. Ляхомский, С.В. Кузьмин, С.В. Петухов, А.П. Кудряшов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. № S64. – С. 134-144.
104. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек // Энергия, 1978 г. 832 С.
105. Руководство по эксплуатации РС-гасителя типа РС-10,5-0,75-УХЛ1, г. Красноярск ООО ГК «Рутас», 2020 г.
106. Руководство по эксплуатации прибора ПКК-57-М: АКПП-2008 г.

107. Руководство по эксплуатации прибора «Магнитометр универсальный Техномаг», г. Энгельс, ООО "НПП «Техприбор»-2020 г.
108. Руководство по эксплуатации прибора «ВЕ-метр», г. Москва, ООО «НТМ-Защита»-2020 г.
109. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ. 01.07.2014.
110. Беккер Р.Г. Методика сбора и обработки информации о надежности шахтного электрооборудования // Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1975 – 95 С.
111. Костинский С. С. Анализ и сравнение силовых сухих и масляных трансформаторов мощностью от 250 до 1600 кВ·А по критерию предельных относительных потерь активной мощности, обусловленных высшими гармониками / С. С. Костинский, Х. Х. Тохаев // Известия высших учебных заведений. Электротехника – 2015 - №4 – С. 55-58.
112. Федоров В. Л. Однофазный трансформатор как источник токов высших гармоник // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Том 5, № 3
113. Степанов А.А. Повышение энергоэффективности тяговых подстанций постоянного тока на основе многофазных-трансформаторно-выпрямительных агрегатов // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, НГТУ-2019-19 С.
114. Бобков В.А. Силовая преобразовательная техника широко используется в мощных электротехнологических установках постоянного тока / Бобков А. В, Бобков В. А., Копырин В. С. // Силовая Электроника – 2004. №1 С. 60-72.
115. Руководство по эксплуатации РС-гасителя типа РС-10,5-0,25/30-УХЛ1, г. Красноярск ООО «НПП «Рутас», 2010 г. – 32 С.

116. Руководство по эксплуатации гасителя-компенсатора типа ГК-10,5-0,75-УХЛ1, ООО «НПП «Рутас», г. Красноярск – 2010 – 28 С.
117. Тихонов А.В. Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе анализа номинальных режимов преобразовательных трансформаторов. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):489-503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH
118. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>
119. Кузьмин С.В., Тихонов А. В., Тихонов К. В. О влиянии диагностики внутренних дефектов преобразовательных трансформаторов на повышение надежности // *Энергетик*. – 2026. – № 2. DOI: 10.71527/EP.EN.2026.02.003
120. 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.
121. Interruption of small inductive currents: Chapter 5: Switching of transformers [Текст] / Part2. *Electra*. – 1991. - №134. – p.29 – 34.
122. 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.
123. Working group paper: Interruption of small inductive currents (chapter 1, 2) [Текст] // *Electra*. – 1980. - №72. – pp.73 – 103.
124. 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. - №

Приложение 1

Технические характеристики преобразовательного трансформатора, элегазового и вакуумного выключателей

Таблица П1.1 – Технические характеристики преобразовательного трансформатора типа ТДЦПФУД – 25000/10–У1

Параметр	Значение	
Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ·А	6116×2	
Номинальная частота, Гц	50	
Вид переключения ответвлений	ПБВ	
Номинальное линейное напряжение обмотки, В	СО	10500
	ВО	140
Номинальный линейный ток обмотки, А	СО	707
	ВО	2706×4×2
Испытательное напряжение обмотки одноминутное промышленной частоты, кВ	СО	35
	ВО	3,0
Схема и группа соединения обмоток	Z/УД/Унр Унр Унр Унр 0.25–6.25–11.25–5.25	
Напряжение короткого замыкания сквозное, %	7,74	
Напряжение короткого замыкания коммутации одной активной части, %	4,3	
Масса полная с системой охлаждения, кг	61870	
Масса масла, кг	17430	
Масса активной части ФПТ, кг	2950	
Масса одной активной части с реакторами, кг	12309/12261	
Масса транспортная с маслом, кг	50900	

Таблица П1.2 – Параметры трансформатора при регулировании напряжения

Поло- жение ПУ	Первичная обмотка – сетевая обмотка		Вторичная обмотка – вентильная обмотка		Преобразователь – выпря- мительное устройство		
	Макси- мальная мощ- ность, кВА	Линей- ное напря- жение, кВ	Фазное напряжение, В		Фазный перемен- ный ток, А	Выпрям- ленное напряже- ние, В	Постоянный ток, А
			Δ	Υ			
1	6116×2	10500	140	140.16	2705×4×2	150	75000
2	5355×2		116.7	116.6		125	
3	4283×2		93.3	93.3		110	
4	3216×2		70	70.1		75	

Таблица П1.3 – Элегазовый выключатель серии LF2 – технические характери-
стики

Наименование параметра выключателя	Значение пара- метра
1	2
1.Номинальное рабочее напряжение, кВ	10,5
2.Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12,0
3. Номинальный ток, А	2000
4.Отключающая способность, кА	40
5. Ток термической стойкости, кА	40
6. Ток электродинамической стойкости, кА	128
17.Допустимые параметры тока включения: – пиковое значение, кА – начальное действующее значение периодической со- ставляющей, кА	40
8.Допустимое время термического воздействия тока КЗ	3
9.Нормированное процентное содержание аperiodиче- ской составляющей, %	LF2 – 30% при 40 кА /12кВ

10.Бестоковая пауза при АПВ, с, не менее	0,3
11.Коммутационный ресурс: – при номинальном токе, циклов «ВО»; – выключатель с I ₀ ном. 25 кА, операций «0»; – выключатель с I ₀ ном. 35 кА, операций «0»; – выключатель с I ₀ ном. 40кА, операций «0»; – выключатель с I ₀ ном. 50кА, операций «0»	10000 40 30 22 17 (для 6 кВ)
12.Механический ресурс	10000
13.Собственное время отключения, мс, не более	48
14.Собственное время включения, мс, не более	65
15.Полное время отключения, мс, не более	70
16.Электрическое сопротивление главной цепи полюса, мкОм, не более - на выкатной тележке	30
17.Переходное сопротивление между заземляющим зажимом и каждой доступной прикосновению нетоковедущей частью выключателя, которая может оказаться под напряжением, Ом, не более	0,1
18.Высоковольтное испытательное напряжение промышленной частоты, кВ	42
19.Испытательное напряжение полного грозового импульса, кВ	75
20.Межполюсное расстояние, мм	165
21.Масса, кг, не более – стационарное исполнение; – на выкатной тележке	148 128 148
22.Вес/объем элегаза	460г/30л
23.Нормированный % утечки элегаза в год	<0,1%

19.Испытательное напряжение полного грозового импульса, кВ	75
20.Межполюсное расстояние, мм	165
21.Масса, кг, не более	148
– стационарное исполнение;	128
– на выкатной тележке	148
22.Вес/объём элегаза	460г/30л
23.Нормированный % утечки элегаза в год	<0,1%
24.Номинальное избыточное давление элегаза при температуре окружающего воздуха 200 С, МПа (кгс/см ²)	0,15 (1,5)
25.Номинальное избыточное давление элегаза, при котором срабатывает реле контроля давления, МПа (кгс/см ²)	0,1 (1,0)
26.Количество коммутирующих контактов для внешних вспомогательных цепей:	
– замыкающих;	5
– размыкающих	6

Таблица П1.4 – Вакуумный выключатель ВВ-СВЕЛ-10-40/2000

Наименование параметра выключателя	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12
Номинальный ток, А	630, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000

Номинальный ток отключения, кА	
– ток электродинамической стойкости, кА	51, 63, 81, 102
– ток термической стойкости, кА	20, 25, 31,5, 40
– время протекания тока короткого замыкания, с	3
Номинальное напряжение питания цепей управления и элементов вспомогательных цепей, В	~110, ~220, =110, =220
Номинальное напряжение цепей управления тележкой аппаратной моторизованной, В	220
Номинальное напряжение минимального расцепителя напряжения, В	~110, ~220
Номинальный ток цепей управления, А, не более:	
– электромагнитов включения/отключения	1
– максимальных расцепителей тока	3; 5
Диапазон рабочих напряжений цепей управления (переменный/постоянный ток), % от U_n :	
– электромагнита включения	70–115 / 85–105
– электромагнита отключения	65–120 / 70–110
– электродвигателя взвода силовой пружины	85–110
Испытательные напряжения изоляции главной цепи, кВ:	
– одноминутное, частотой 50 Гц	42
– грозовой импульс 1,2/50 мкс	75
Собственное время отключения, мс, не более	20-50
Собственное время включения, мс, не более	30-70
Разновременность замыкания/размыкания контактов при включении/отключении, мс, не более	2

Приложение 2

Саяногорский алюминиевый завод

Осциллограммы коммутационных перенапряжений, токов нагрузки и гармонический состав токов нагрузки, Коммутация преобразовательного трансформатора ТДЦПФУД – 25000/10–У1 элегазовым выключателем LF-2

Ток электролиза 200 кА.



Рисунок П2.1 Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{H тр.}}$, $U(t)_{\text{max}} = 30000 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 3,0$

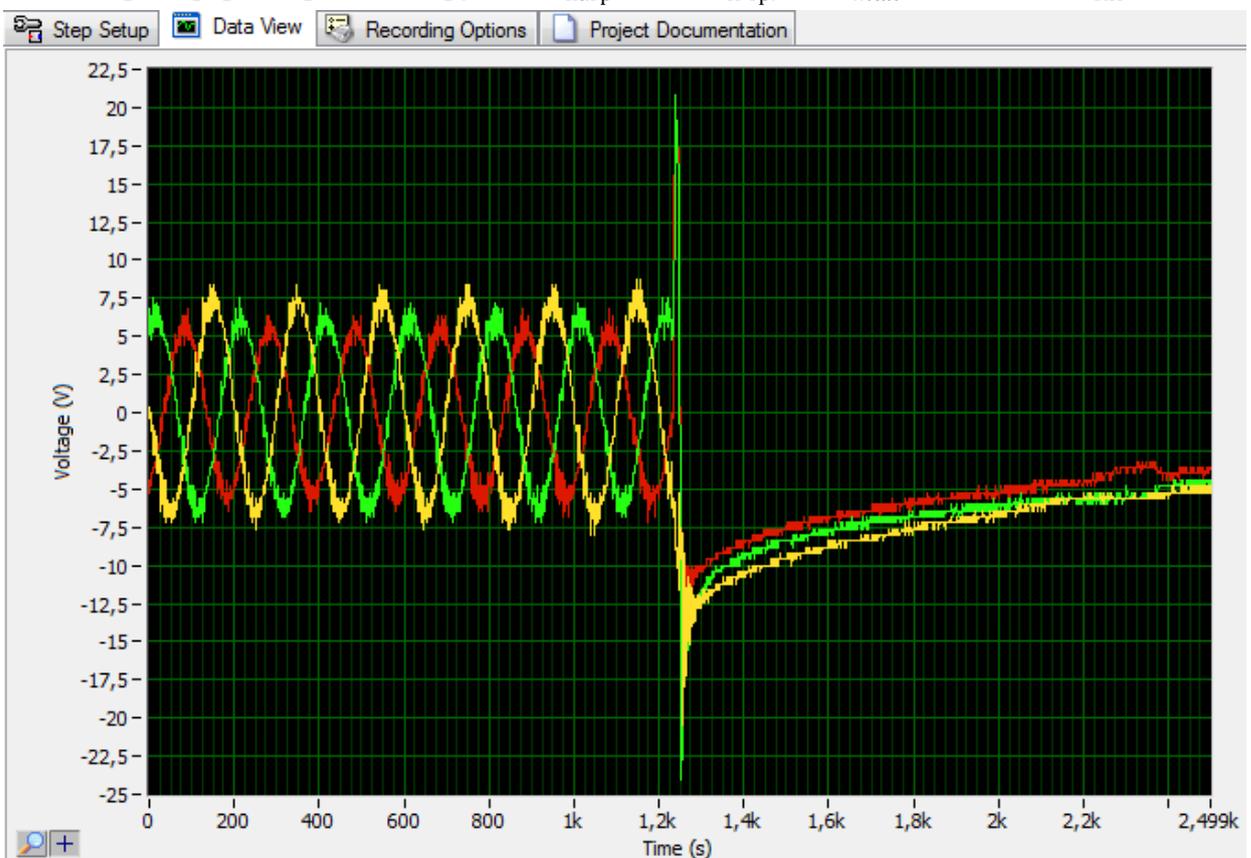


Рисунок П2.2 Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{H тр.}}$, $U(t)_{\text{max}} = 25000 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 2,5$



Рисунок П2.3 Осциллограммы и гармонический состав токов нагрузки 525 А преобразовательного трансформатора: фаза А 3-1%, 7-2,5%, 11-14,5%, 13-1,2%, фаза В 3-1%, 7-2,5%, 11-12%, 13-2%, фаза С 7-2,4%, 11-9%, 13-1,8%, $K_y=14,6\%$

Приложение 3

Новокузнецкий алюминиевый завод

Осциллограммы коммутационных перенапряжений, токов нагрузки и гармонический состав токов нагрузки, Коммутация преобразовательного трансформатора ТДЦПФУД – 25000/10–У1 вакуумным выключателем ВВ-СВЕЛ-10-40/2000

Ток электролиза 200 кА.

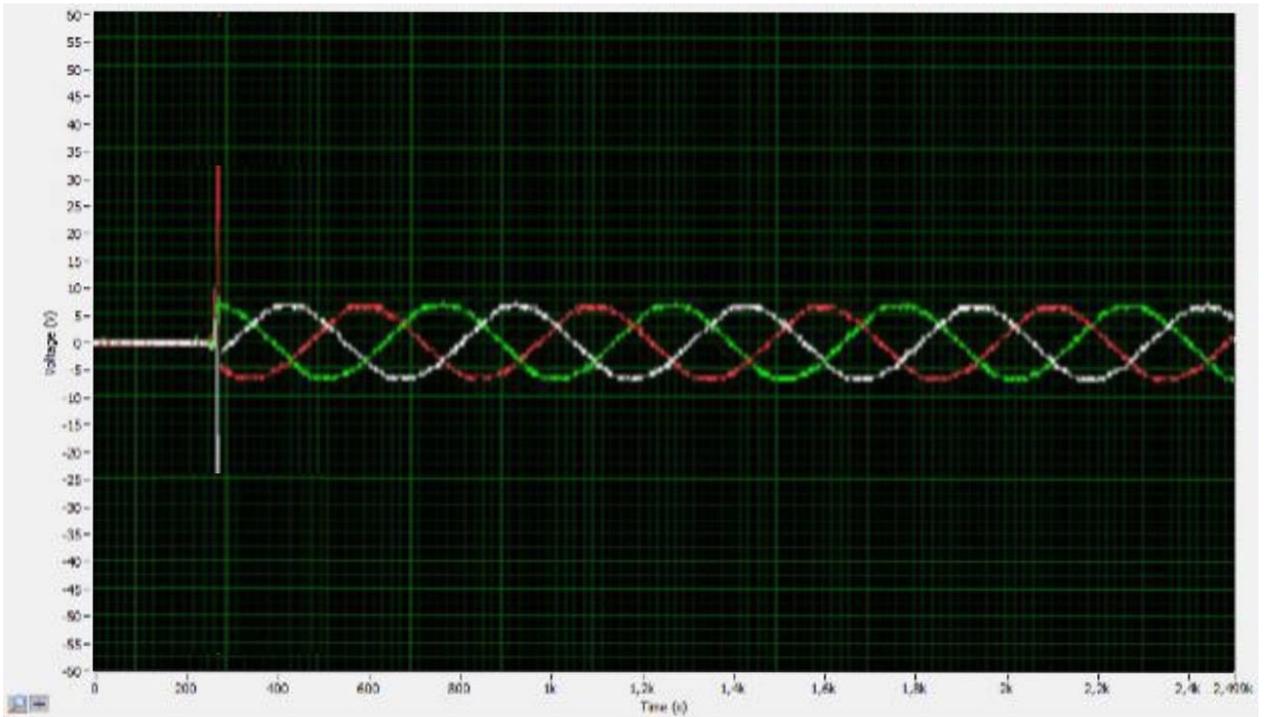


Рисунок ПЗ.1 Характерная осциллограмма при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой: $I_{нагр.} = 0,75 I_{н.тр.}$, $U(t)_{max} = 33\ 000\ В$, $K_{п} = 3,3$

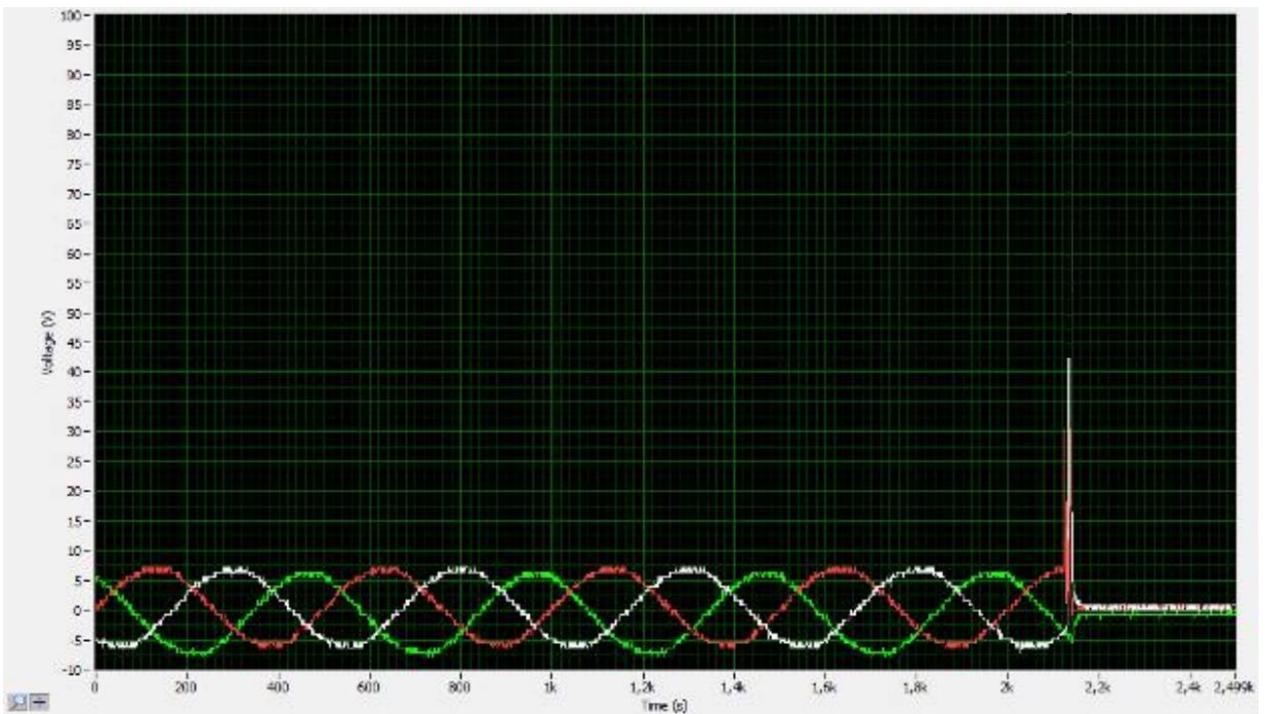


Рисунок ПЗ.2 Характерная осциллограмма при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой: $I_{нагр.} = 0,75 I_{н.тр.}$, $U(t)_{max} = 42\ 000\ В$, $K_{п} = 4,2$

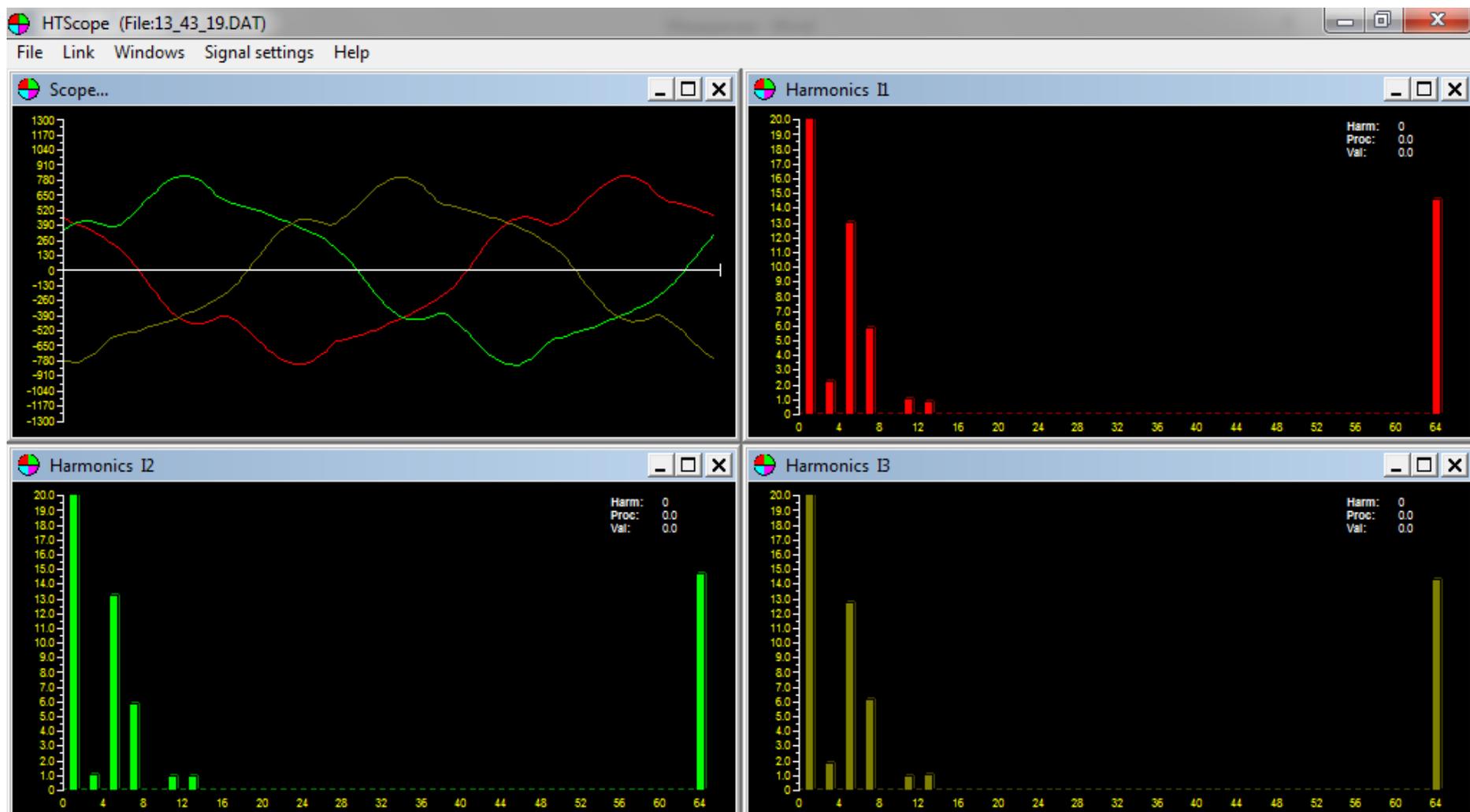


Рисунок П3.3 Осциллограммы и гармонический состав токов нагрузки 525 А преобразовательного трансформатора: фаза А 3-2,2%, 5-13%, 7-6%, 11-1,1%, 13-0,9%, фаза В 3-1%, 5-13,5%, 7-6%, 11-1%, 13-1%, фаза С 3-2%, 5-13%, 7-6,4%, 11-1%, 13-1,1%, $K_y=14,6\%$

Приложение 4

Осциллограммы коммутационных перенапряжений с максимальной кратностью, полученные при физическом моделировании

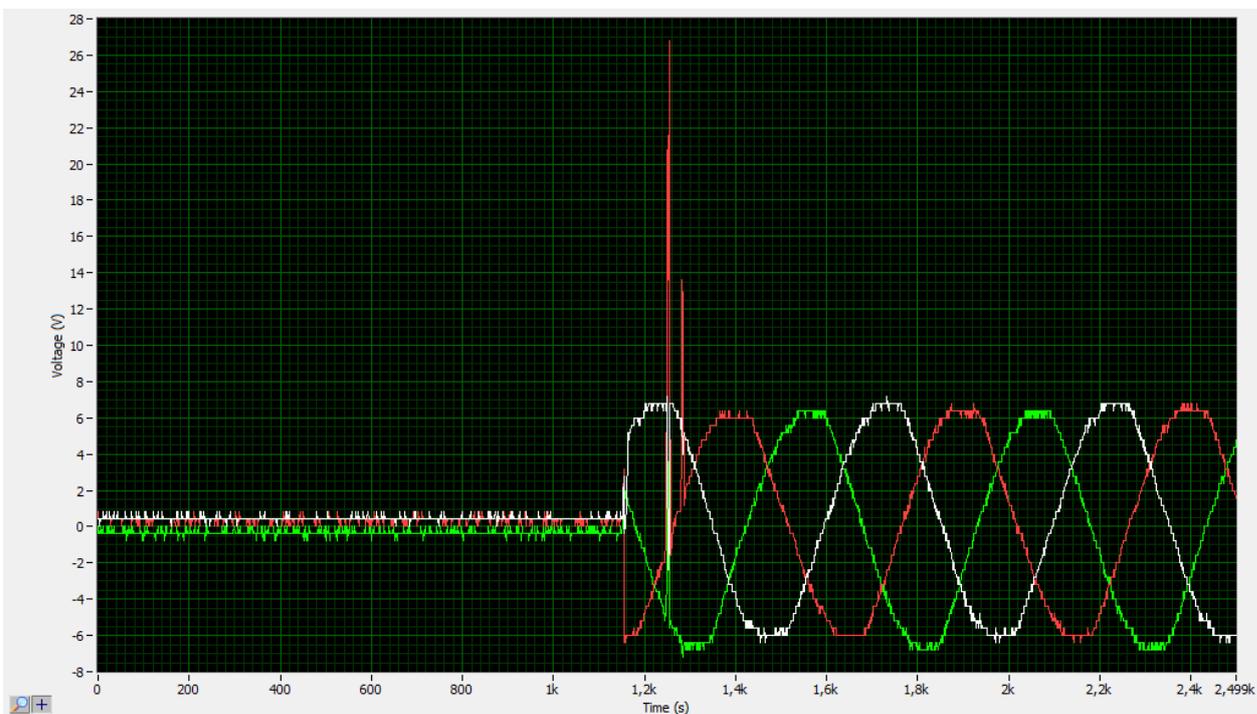


Рисунок П4.1 Включение $K_{п} = 3,41$, средства ограничения перенапряжений отсутствуют

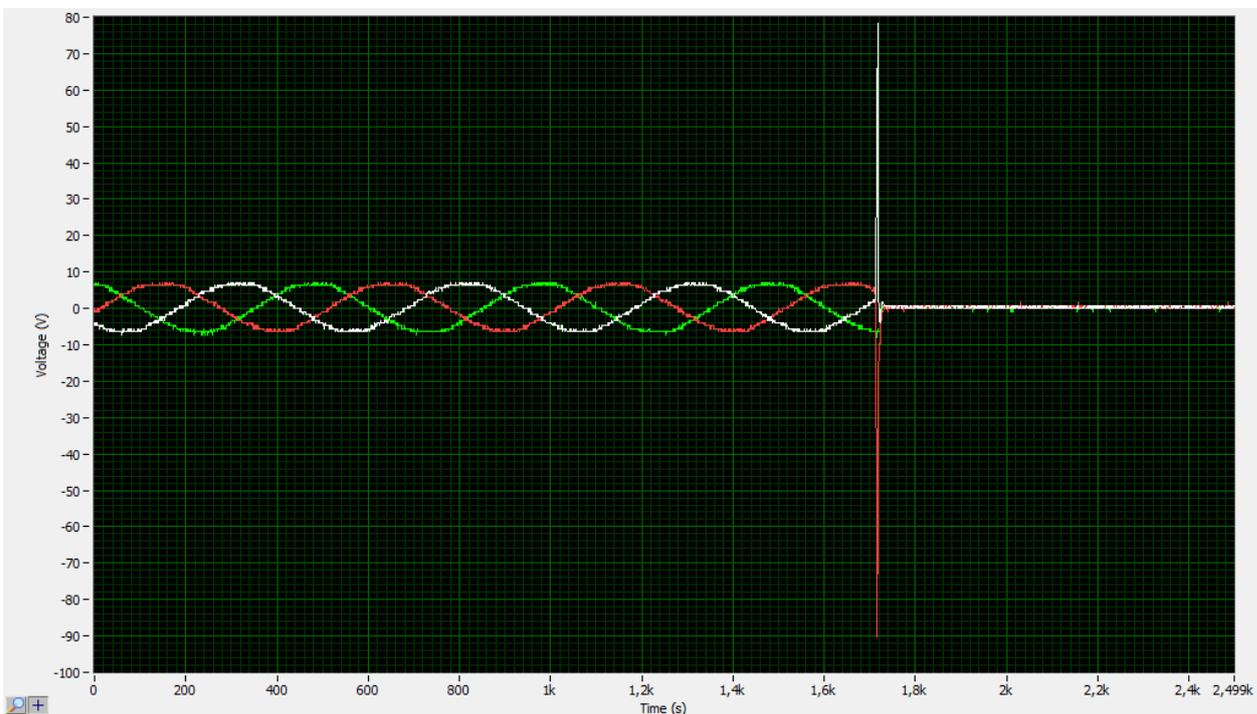


Рисунок П4.2 Отключение $K_{п} = 13$, средства защиты от перенапряжений отсутствуют

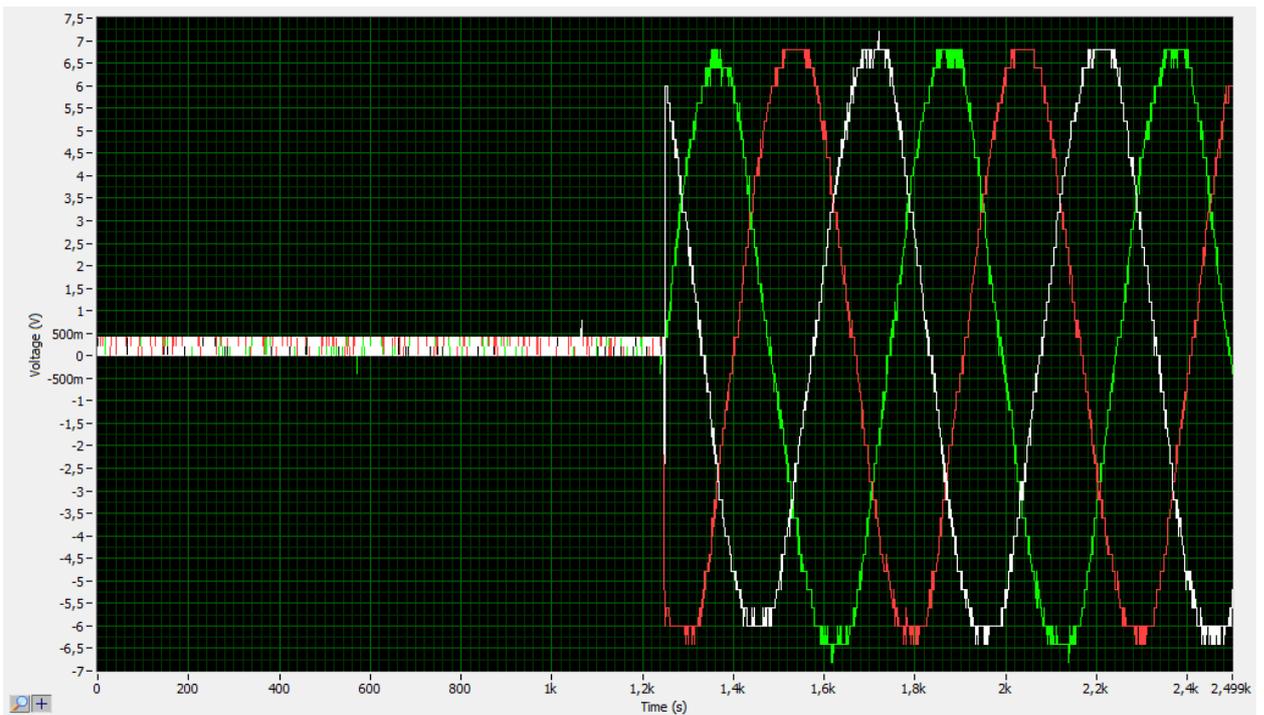


Рисунок П4.3 Включение Кп.ф.<1, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «звезда» с изолированной нейтральной точкой: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$

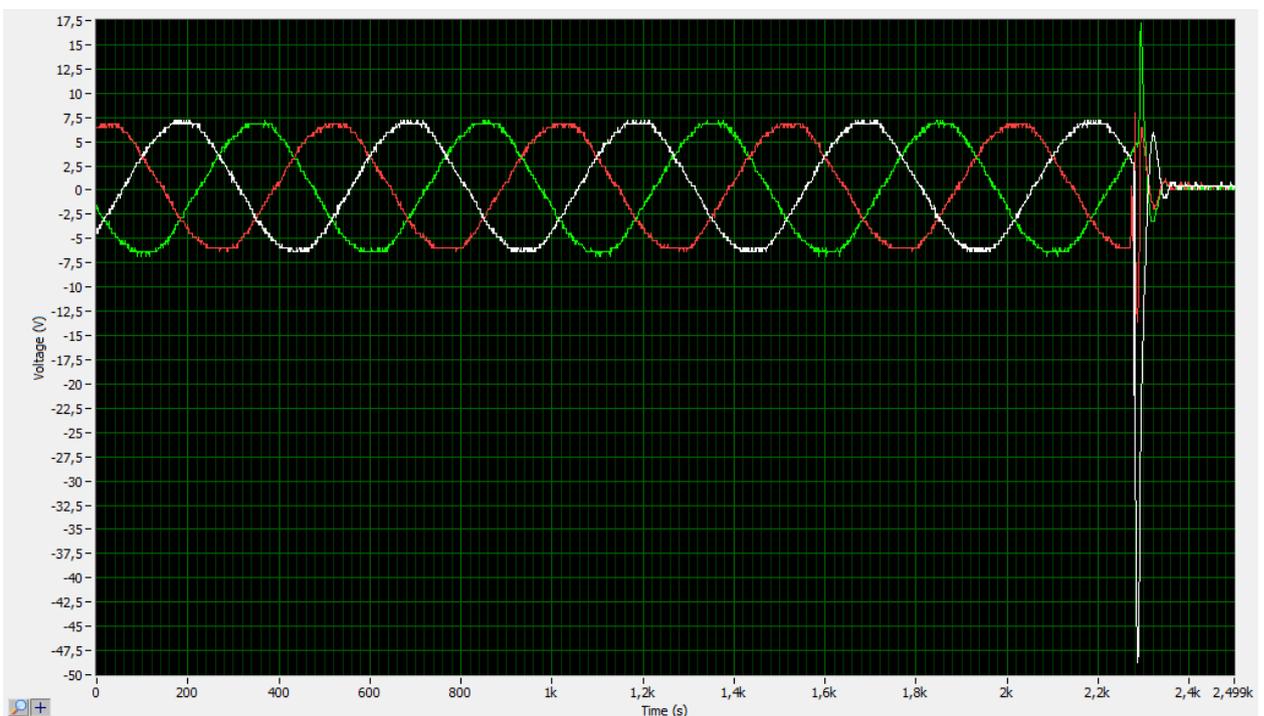


Рисунок П4.4 Отключение Кп.ф.=0,6, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «звезда» с изолированной нейтральной точкой: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$

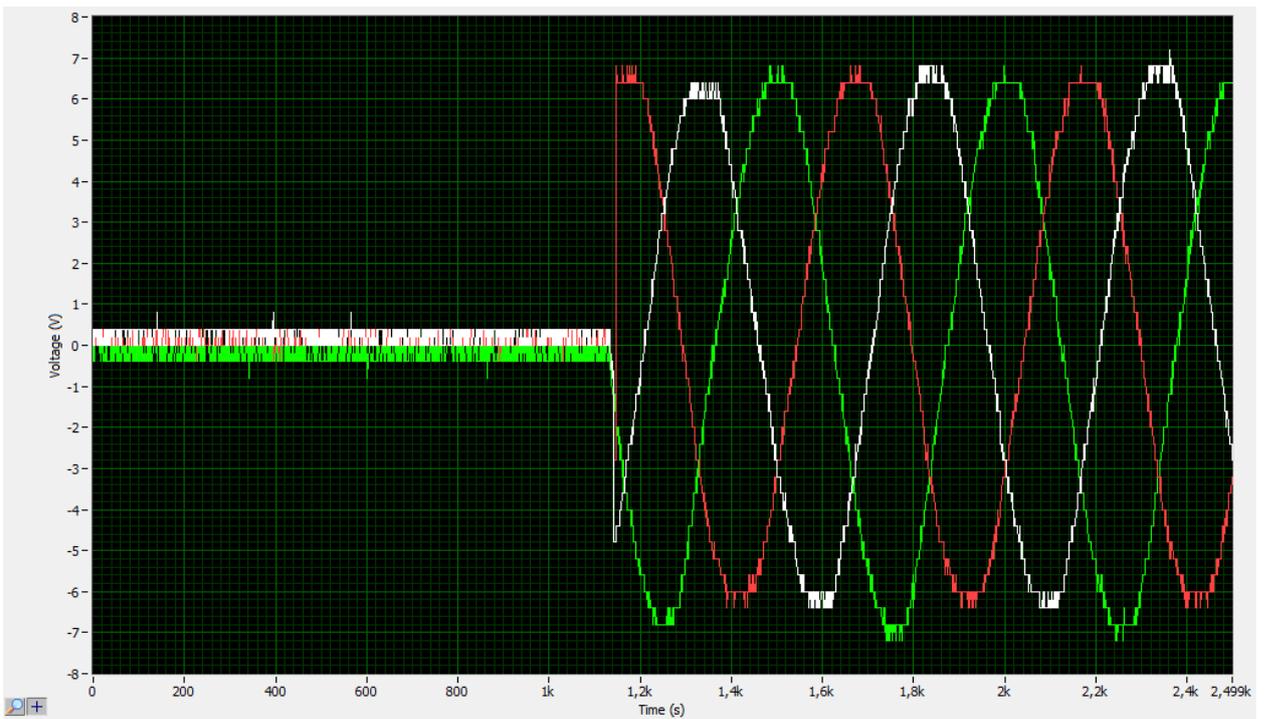


Рисунок П4.5 Включение Кп.ф.<1, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «треугольник»: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$

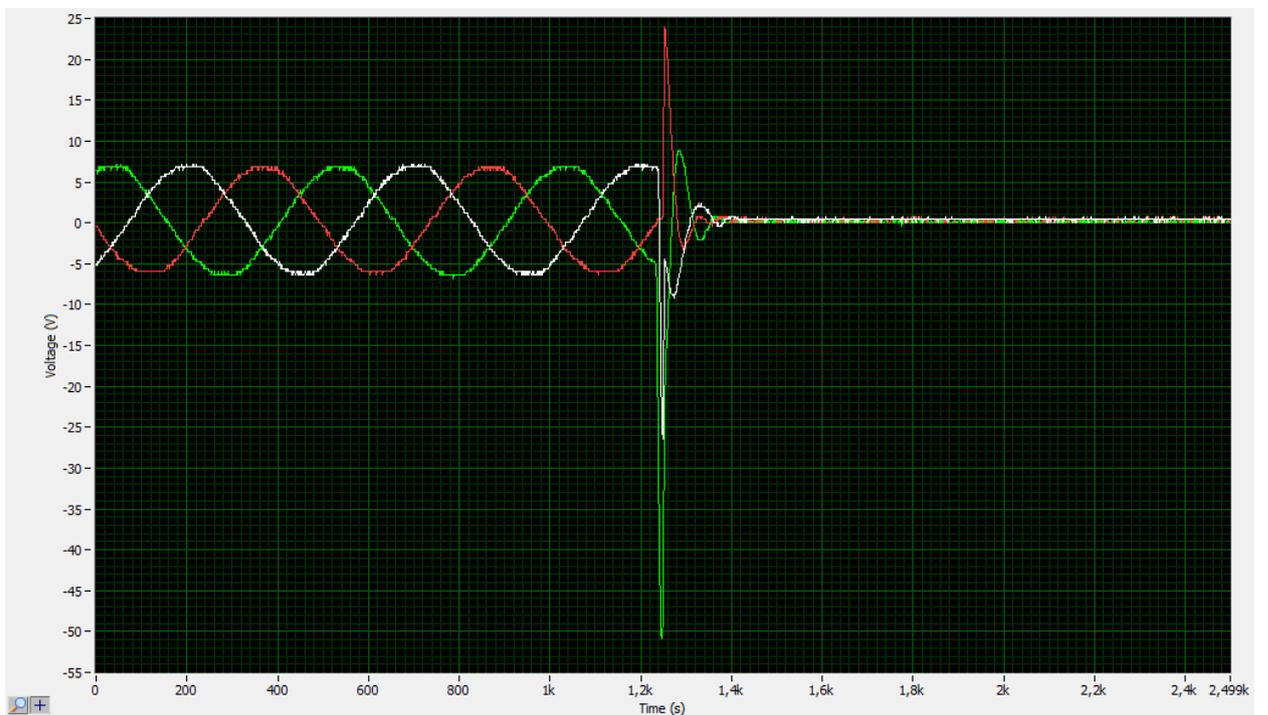


Рисунок П4.6 Отключение Кп.ф.=5,9, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «треугольник»: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$

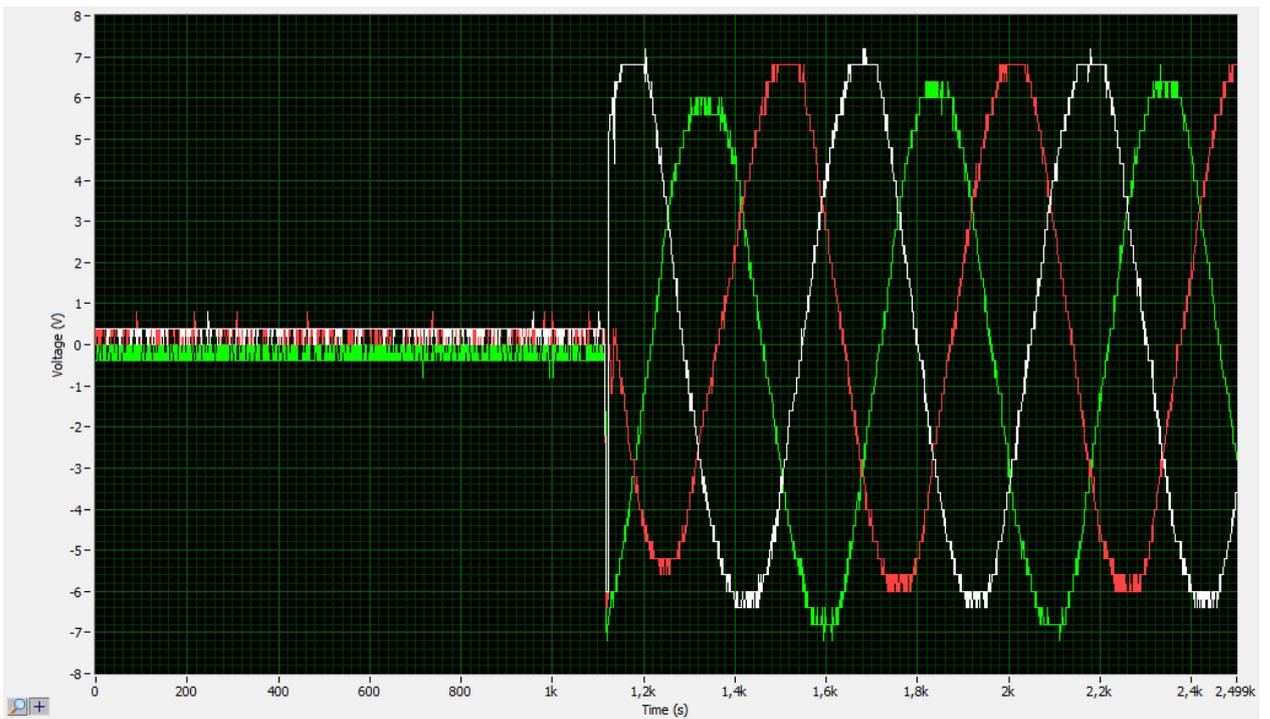


Рисунок П4.7 Включение Кп.ф.<1, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «треугольник»: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$

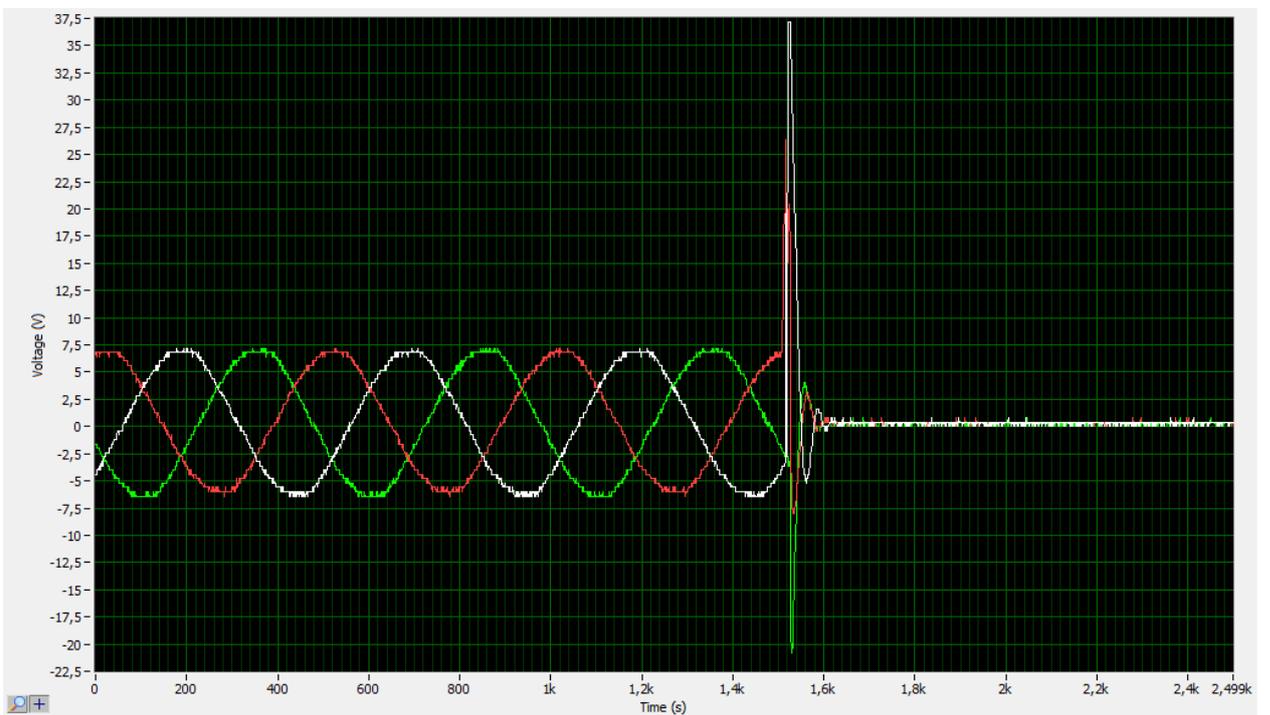


Рисунок П4.8 Отключение Кп.ф.=4,7, средство защиты от перенапряжений: RC-цепи, собранные по схеме «треугольник»: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$

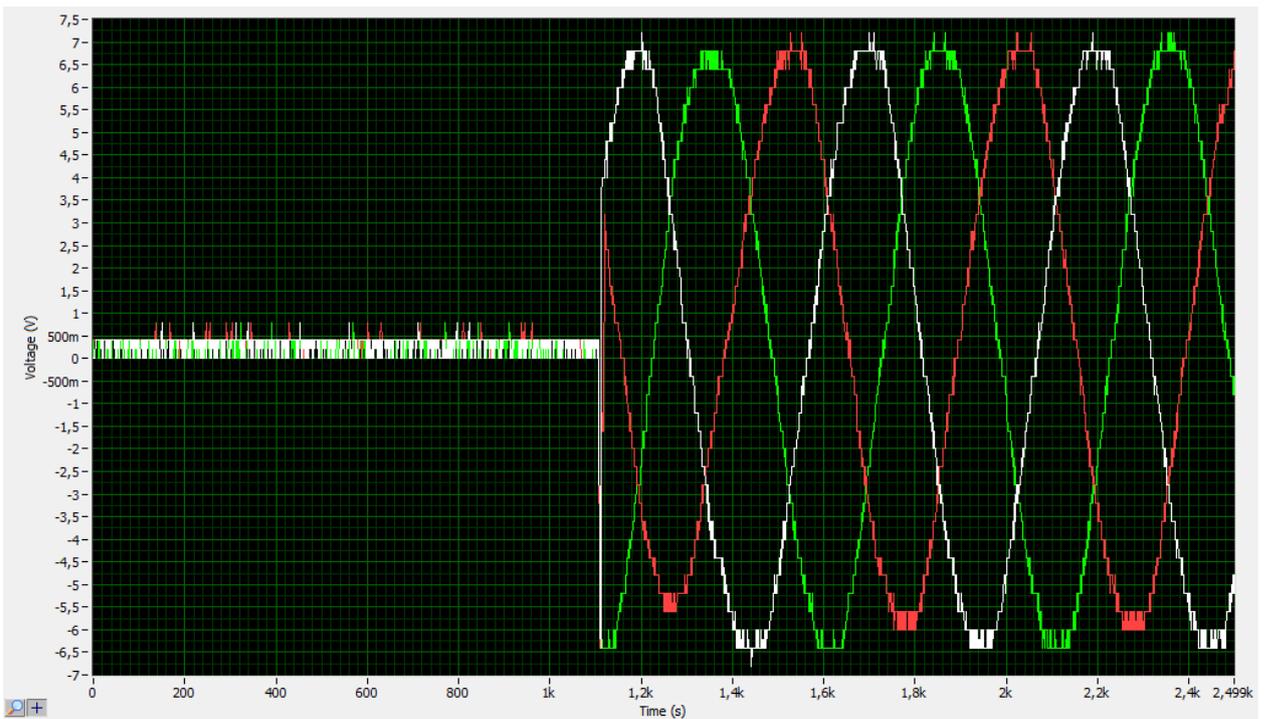


Рисунок П4.9 Включение Кп.ф.<1, средство защиты от перенапряжений: конденсаторы, собранные по схеме «треугольник», $C = 0,75 \text{ мкФ}$

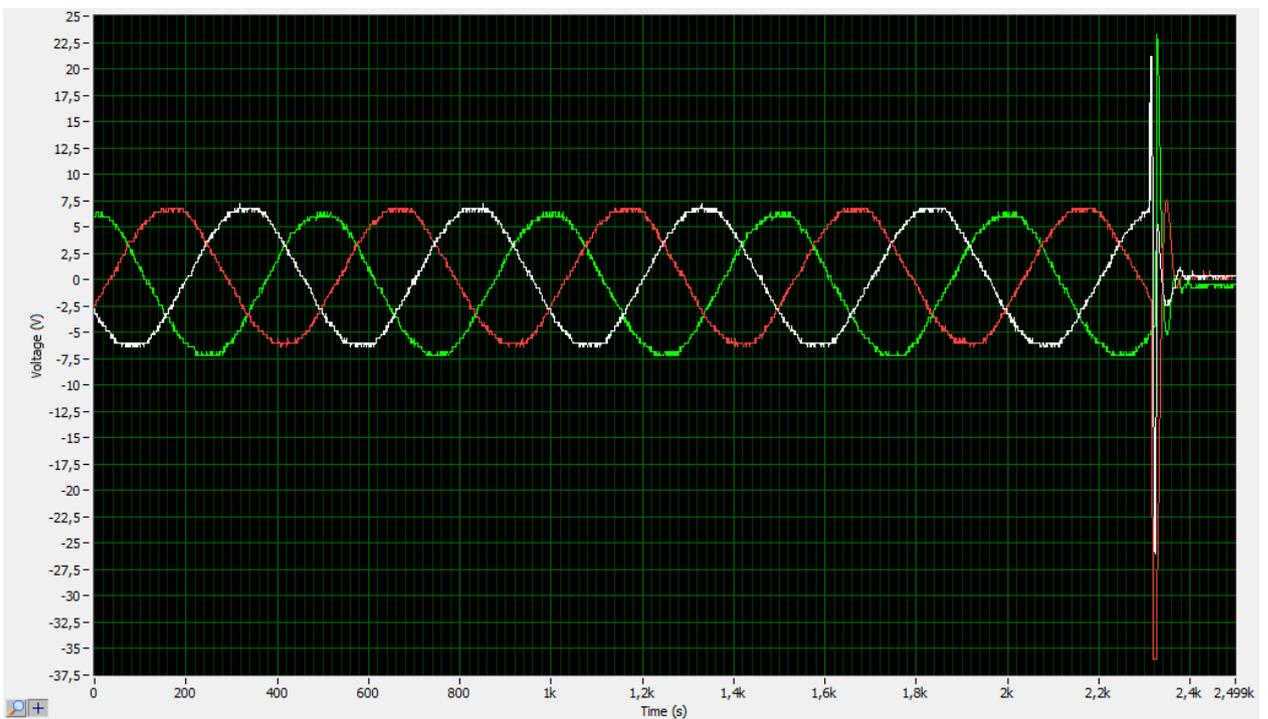


Рисунок П4.10 Отключение Кп.ф.=4,54, средство защиты от перенапряжений: конденсаторы, собранные по схеме «треугольник», $C = 0,75 \text{ мкФ}$

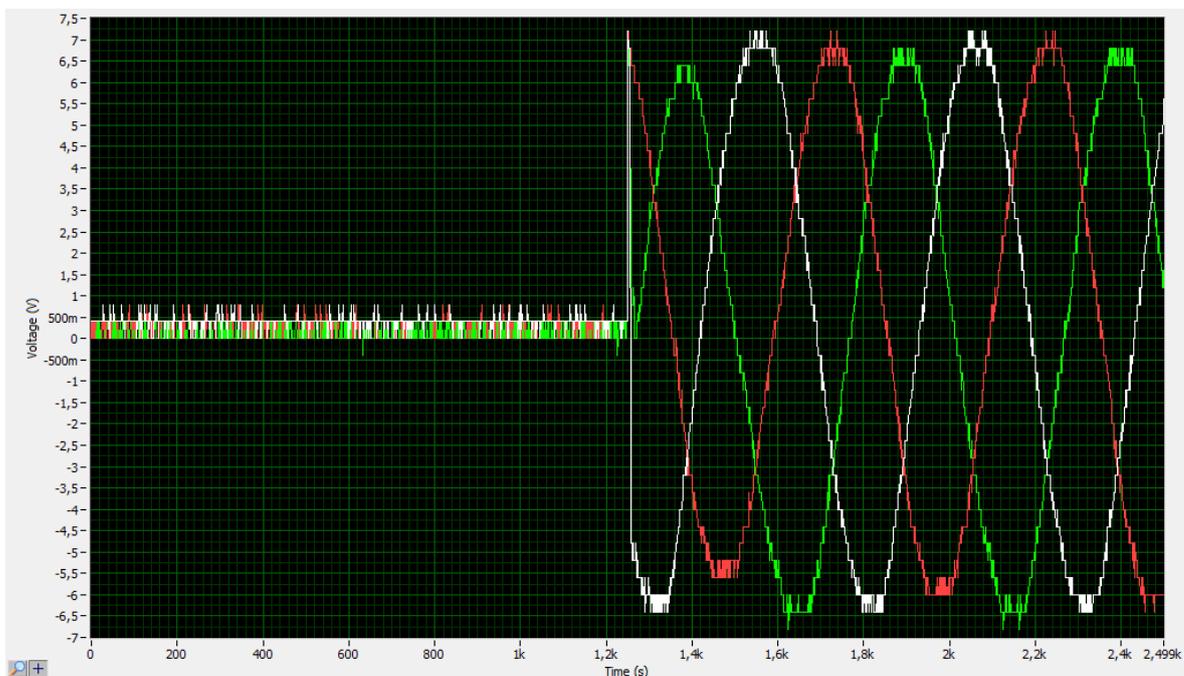


Рисунок П4.11 Включение Кп.ф.<1, средство защиты от перенапряжений: конденсаторы, собранные по схеме «треугольник» с последовательным включением резисторов с треугольником конденсаторов: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$

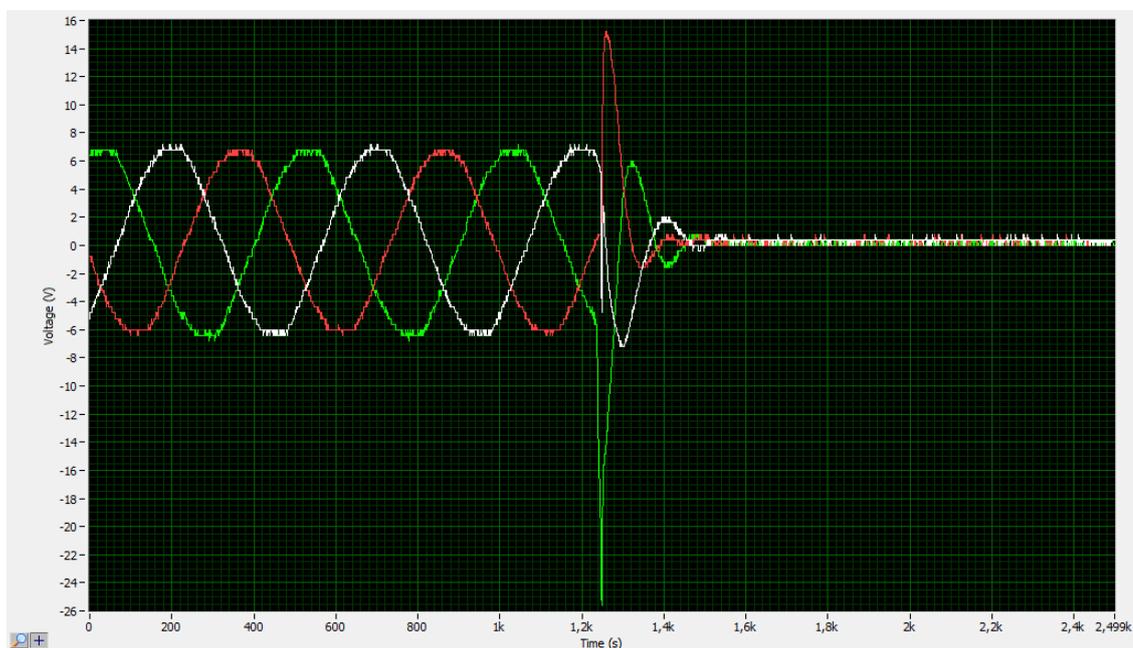


Рисунок П4.12 Отключение Кп.ф.=3,3 средство защиты от перенапряжений: конденсаторы, собранные по схеме «треугольник» с последовательным включением резисторов с треугольником конденсаторов: $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$

Приложение 5

Статистические выборки кратностей коммутационных перенапряжений

Таблица П5.1– Статистические выборки кратностей коммутационных перенапряжений

Ток Нагрузки ПРТР Инагр , А	АО «РУСАЛ Саяногорск»	АО «РУСАЛ Саяногорск»
	Коммутация элегазовым выключателем	Коммутация вакуумным выключателем
Режим: включение, ток электролиза 200кА		
35	0,7; 0,7; 0,3; 0,5; 0,5; 0,9; 0,6; 0,9; 0,5; 0,3; 0,9; 0,4; 0,5; 0,7; 0,95; 0,5; 0,7; 0,8; 0,95; 0,7; 0,9; 0,8; 0,5; 0,7; 0,8; 0,5;	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;
175	0,7; 0,7; 0,5; 0,7; 0,9; 0,8; 0,9; 0,3; 0,9; 0,9; 0,5; 0,7; 0,9; 0,4; 0,9; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 0,9; 0,3; 0,5; 0,9; 0,5; 0,7; 0,5;	0,9; 1,3; 1,2; 1,5; 1,5; 1,2; 1,1; 1,3; 1,5; 0,9; 1,2; 1,1; 1,3; 1,2; 1,2; 1,1; 1,2; 0,9; 1,5; 1,1; 1,3; 1,2; 0,9; 1,3; 1,2; 0,9;
350	1,4; 1,3; 1,9; 1,6; 1,8; 2,6; 2,1; 2,8; 1,4; 2,95; 2,2; 1,4; 1,6; 1,9; 2,1; 2,95; 1,6; 1,9; 2,95; 1,5; 1,6; 1,9; 1,7; 2,95; 2,95; 2,95;	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;
525	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;	2,5; 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;
620	0,6; 0,7; 0,8; 0,4; 0,8; 0,4; 0,4; 0,9; 0,6; 0,8; 0,8; 0,9; 1,2; 0,3; 0,6; 0,4; 0,9; 0,3; 0,4; 1,2; 0,9; 1,2; 0,7; 0,5; 0,4; 0,8;	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;
700	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;	0,8; 0,6; 1,1; 0,4; 0,4; 0,8; 0,9; 0,4; 1,1; 0,6; 0,8; 0,9; 0,3; 0,3; 0,6; 0,9; 0,4; 0,9; 0,4; 1,1; 0,3; 1,1; 0,4; 0,5; 0,7; 0,8;
Режим: отключение, ток электролиза 200кА		
35	1,25; 1,1; 0,9; 0,8; 1,0; 1,0; 1,1; 0,9; 1,1; 0,5; 0,6; 1,25; 1,1; 1,1; 0,7; 0,9; 0,5; 1,0; 0,7; 1,0; 0,7; 0,7; 0,6; 0,8; 0,6; 1,0;	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;
175	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;	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; 2,1;
350	1,55; 1,4; 0,9; 1,1; 1,3; 0,8; 1,4; 1,1; 1,1; 1,55; 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; 1,55; 1,0;	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; 3,6; 1,4;
525	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;	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; 3,9; 2,8; 3,8; 1,7; 0,8; 2,4; 1,1; 4,0;
620	1,1; 1,45; 1,0; 1,4; 1,2; 1,2; 1,3; 1,4; 0,9; 1,1; 1,2; 1,0; 1,45; 0,9; 1,3; 1,4; 1,1; 1,75; 1,2; 0,8; 1,3; 1,2; 1,2; 1,4; 1,0; 1,1;	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; 2,1; 1,1; 1,0; 2,1; 0,8; 1,4; 1,5;
700	0,9; 1,0; 1,1; 0,8; 1,35; 1,1; 1,2; 0,9; 1,0; 1,1; 1,35; 1,2; 1,0; 1,35; 1,1; 1,1; 0,9; 0,8; 1,2; 1,2; 1,1; 0,8; 0,9; 1,2; 1,0; 1,35;	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;

Режим: включение, ток электролиза 400кА		
35	0,8; 0,6; 0,4; 0,5; 0,7; 0,9; 0,6; 1,0; 0,8; 0,5; 0,7; 1,0; 0,8; 0,8; 1,0; 0,5; 1,0; 0,9; 0,9; 0,6; 0,7; 0,9; 0,7; 0,5; 0,8; 1,0;	0,7; 0,7; 1,3; 1,3; 1,0; 1,2; 0,8; 0,8; 0,8; 1,2; 1,2; 1,3; 0,8; 0,9; 0,8; 1,2; 1,0; 0,7; 1,3; 0,7; 0,7; 0,7; 1,1; 1,0; 1,7; 1,2;
175	0,8; 0,6; 0,9; 0,5; 0,9; 0,7; 0,8; 0,5; 0,9; 0,8; 0,5; 0,7; 0,9; 0,5; 0,8; 0,5; 0,5; 0,8; 0,9; 0,8; 0,5; 0,5; 0,8; 0,6; 0,7; 0,5;	0,9; 1,6; 1,2; 1,6; 1,6; 1,0; 1,1; 1,0; 1,5; 0,9; 1,3; 1,1; 1,3; 1,7; 1,4; 1,1; 1,0; 1,9; 1,6; 1,0; 1,3; 1,3; 0,9; 1,4; 1,2; 0,8;
350	1,5; 1,2; 1,8; 1,8; 1,7; 3,0; 2,2; 2,7; 1,5; 2,9; 2,2; 1,5; 3,0; 1,5; 2,2; 2,8; 1,6; 1,8; 2,9; 1,5; 3,0; 1,8; 1,7; 2,9; 2,8; 2,9;	3,5; 1,7; 1,8; 2,1; 1,9; 3,2; 2,2; 1,7; 1,9; 2,0; 2,8; 2,8; 3,3; 1,0; 3,1; 1,4; 2,8; 1,0; 3,3; 3,0; 1,0; 1,0; 2,3; 2,0; 2,5; 2,4;
525	2,6; 1,4; 1,6; 2,1; 1,2; 3,1; 1,2; 1,9; 2,5; 1,9; 1,7; 2,3; 1,9; 2,8; 1,0; 1,7; 1,3; 2,5; 1,5; 1,6; 3,1; 2,2; 2,5; 1,8; 2,2; 3,1;	2,6; 2,0; 3,5; 2,6; 2,0; 3,7; 3,7; 3,0; 3,6; 3,6; 2,8; 1,6; 1,6; 1,6; 2,5; 1,8; 2,2; 1,6; 2,0; 2,8; 1,9; 2,0; 1,8; 3,5; 3,7; 3,7;
620	0,5; 0,7; 0,8; 0,6; 0,6; 0,4; 0,4; 0,8; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,25; 0,5; 0,6; 0,4; 0,7; 0,8; 1,25; 1,2; 0,9; 1,25; 0,7; 0,6; 0,7; 0,7;	1,7; 1,8; 1,6; 1,0; 1,0; 1,7; 1,8; 1,0; 1,8; 1,5; 1,5; 1,6; 1,3; 1,2; 1,0; 1,2; 1,2; 1,2; 1,0; 1,2; 1,3; 1,0; 1,3; 1,6; 1,6; 1,6;
700	0,8; 0,4; 0,6; 0,9; 0,95; 0,7; 0,95; 0,6; 0,9; 0,9; 0,5; 0,5; 0,95; 0,5; 0,7; 0,8; 0,7; 0,95; 0,8; 0,9; 0,6; 0,5; 0,95; 0,5; 0,5; 0,6;	1,2; 0,5; 1,1; 0,5; 0,6; 0,8; 0,5; 0,5; 1,1; 0,5; 1,0; 1,0; 0,6; 0,5; 0,5; 0,7; 0,5; 0,8; 1,2; 1,2; 0,3; 1,0; 0,4; 0,4; 0,6; 0,6;
Режим: отключение, ток электролиза 400кА		
35	1,1; 1,2; 1,0; 0,7; 1,3; 0,7; 1,0; 1,0; 1,3; 0,7; 0,6; 1,0; 1,0; 1,2; 0,6; 1,1; 0,6; 0,6; 0,9; 0,8; 1,3; 0,6; 0,5; 0,7; 0,5; 0,9;	1,2; 1,0; 1,5; 1,8; 1,2; 1,3; 1,8; 1,0; 1,3; 1,7; 1,3; 1,8; 1,0; 1,0; 1,2; 1,7; 1,1; 1,2; 1,5; 1,0; 1,6; 1,6; 1,7; 1,0; 1,2; 1,3;
175	0,8; 1,1; 1,4; 1,0; 0,7; 0,8; 0,6; 1,4; 0,7; 0,5; 1,0; 1,2; 1,2; 1,4; 1,0; 1,3; 0,8; 0,5; 0,7; 1,1; 0,9; 0,7; 1,4; 0,5; 0,7; 0,8;	1,5; 1,6; 1,1; 1,0; 1,0; 1,0; 2,1; 0,9; 0,4; 0,9; 2,1; 1,5; 0,8; 1,0; 1,4; 1,2; 1,1; 1,2; 1,4; 1,5; 0,8; 2,1; 1,1; 1,5; 1,8; 1,6;
350	1,5; 1,0; 1,1; 1,7; 1,0; 0,8; 1,1; 1,7; 0,7; 1,7; 0,6; 1,1; 1,0; 1,2; 1,2; 1,1; 1,2; 1,7; 1,0; 1,4; 1,3; 1,2; 1,2; 0,9; 1,3; 1,1;	2,6; 1,6; 3,5; 3,0; 1,2; 1,6; 2,8; 2,6; 3,5; 3,5; 3,0; 1,1; 3,0; 3,0; 2,8; 2,3; 1,7; 2,1; 3,2; 3,3; 2,3; 2,9; 1,1; 3,2; 3,5; 1,4;
525	1,8; 1,8; 1,3; 1,5; 2,6; 1,0; 0,8; 2,0; 2,6; 0,9; 1,7; 2,4; 2,6; 1,0; 1,6; 2,4; 0,9; 1,6; 2,6; 1,8; 1,6; 2,1; 0,7; 2,4; 1,0; 0,9;	1,4; 1,3; 2,0; 2,1; 3,9; 1,0; 3,1; 1,8; 1,9; 3,9; 2,7; 2,3; 3,2; 2,6; 3,8; 1,0; 2,5; 1,0; 3,9; 1,8; 2,8; 2,7; 1,0; 1,4; 1,1; 3,0;
620	1,0; 1,5; 1,2; 1,6; 1,0; 1,4; 1,1; 1,6; 0,9; 0,9; 1,4; 0,8; 1,5; 1,0; 1,6; 1,1; 1,2; 1,5; 1,6; 0,8; 0,9; 1,1; 1,3; 1,3; 1,1; 1,1;	1,8; 1,8; 1,0; 1,0; 1,8; 1,4; 1,8; 1,6; 2,0; 2,0; 1,8; 1,9; 1,1; 1,2; 2,0; 1,9; 1,5; 1,0; 1,6; 1,1; 2,0; 1,2; 2,0; 1,8; 1,0; 1,2;
700	0,8; 1,1; 1,4; 0,9; 1,0; 1,0; 1,3; 1,2; 1,0; 1,0; 1,4; 1,3; 0,9; 1,3; 1,3; 1,0; 1,4; 0,8; 0,8; 0,9; 1,2; 0,9; 0,9; 1,0; 1,4; 1,0;	1,6; 1,0; 1,5; 0,9; 1,5; 1,5; 1,0; 1,6; 1,3; 1,3; 1,6; 1,2; 1,2; 1,2; 1,5; 1,0; 1,0; 1,5; 1,3; 1,3; 1,5; 1,2; 1,2; 1,3; 1,3; 1,2;

Приложение 6

Справка о практическом использовании результатов в ООО "ИНЖИНИРИНГ
СТРОИТЕЛЬСТВО ОБСЛУЖИВАНИЕ"



Инжиниринг
Строительство
Обслуживание



660111, Российская Федерация
Красноярский край, г. Красноярск
ул. Пограничников, д.33
Тел.:(391) 256 45 10
engineering@iso-serv.com
ОГРН 1187746982060, ИНН 7730248021,
КПП 246543001

«12» декабря 2025 г.

Справка

О внедрении результатов диссертационной работы А.В. Тихонова «Обоснование и разработка научно-технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия».

Результаты исследований диссертации А.В. Тихонова в части разработанных научно-технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 10 кВ внедрены и используются на предприятиях АО «РУСАЛ» для повышения надежности и эффективности функционирования систем электроснабжения основных производственных процессов.

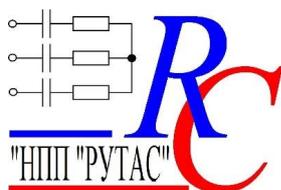
Руководитель группы проектов Департамента
электрообеспечения ООО «ИСО»



С.М. Лубников

Приложение 7

Материалы по внедрению результатов работы



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Научно-производственное предприятие

«РУТАС»

ИНН 2461207730
КПП 246101001
ОГРН 1092468041533
ОКВЭД 72.19, 27.12
ОКПО 62415527

р/сч: 40702810300390000168
АО «Дальневосточный банк»
БИК: 040507705
к/сч:30101810900000000705

Исх.№ 57/25 от «10» декабря 2025 г.

г. Красноярск



Утверждено
Директор ООО «НПП «РУТАС»

/ Кузьмин С.В.

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационной работы Тихонова Алексея Валерьевича на тему «Обоснование и разработка научно-технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия».

Результаты диссертационной работы, в части технического решения по усовершенствованию средства ограничения коммутационных перенапряжений в виде гасителя-компенсатора принята в ООО «НПП «РУТАС» для серийного производства.

Главный инженер ООО «НПП
«РУТАС»

/ Меншиков В.А.

Юридический адрес: 660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, оф.10

Почтовый адрес: 660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, оф.10

Тел./факс: 8 (391) 265-58-45, **e-mail:** rutas2004@list.ru