

Государственный университет цветных металлов и золота

На правах рукописи

Кузьмин Роман Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЯХ 6-35 кВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент И.И. Лапаев

Красноярск – 2006

Введение	5
1. Состояние вопроса и задачи исследования.....	10
1.1 Общие положения	10
1.2 Анализ аварийности распределительных сетей напряжением 6-10 кВ.....	12
1.3 Анализ исследований коммутационных перенапряжений.	17
1.4 Анализ исследований перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю	24
2. Экспериментальные исследования внутренних перенапряжений в электрических сетях напряжением 6-10 кВ.....	30
2.1. Методические основы экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений.	30
2.2 Методические основы экспериментальных исследований перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю.....	34
2.3. Методические основы математической обработки экспериментальных данных.	36
2.4 Результаты измерения коммутационных перенапряжений и результаты обработки статистических данных при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей.....	40
2.5. Инженерная методика оценки коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ при использовании масляных или вакуумных выключателей для коммутации электродвигателей.....	42
2.6 Результаты измерений перенапряжений в режиме дугового однофазного замыкания на землю.....	52
2.7 Результаты измерений коммутационных перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю.....	62
Выводы.....	64
3. Аналитические исследования коммутационных перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю	67
3.1 Общие сведения и методика исследований.....	67

3.2 Описание физических процессов при коммутации электрических машин в режиме ОЗЗ	68
3.3 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в результате среза тока без повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя	74
3.4 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в режиме ОЗЗ с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя	83
3.5 Сравнение теоретических и экспериментальных исследований	113
Выводы	116
4. Разработка комплекса мер по снижению однофазных замыканий на землю	119
4.1 Анализ существующих устройств защиты от перенапряжений	120
4.2 Разработка универсального трехфазного резистивно – емкостного ограничителя перенапряжений и опыт его внедрения	126
4.3 Анализ эффективности защит от однофазных замыканий на землю	129
4.4 Анализ существующих устройств для создания добавочного	139
активного тока в режиме ОЗЗ	139
4.5 Разработка термически устойчивого устройства для создания добавочного активного тока	141
4.6 Комплекс мер по снижению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10кВ промышленных предприятий	143
4.7 Расчет экономического эффекта от внедрения комплекса мер по снижению ОЗЗ	145
Выводы	147
Заключение	149
Библиографический список	153
Приложение 1	162
Приложение 2	184
Приложение 3	192

Приложение 4	196
Приложение 5	198
Приложение 6	202
Приложение 7	210
Приложение 8	215
Приложение 9	219

Введение

Актуальность работы. Эффективность функционирования горно–металлургических предприятий Восточной Сибири в значительной мере определяется надежностью и экономичностью работы его системы электроснабжения.

Основными потребителями электроэнергии на данных предприятиях являются стационарные и передвижные установки большой единичной мощности. Как правило, эти установки относятся к потребителям первой категории по надежности и бесперебойности электроснабжения или к электроустановкам, нарушение электроснабжения которых приводит к значительному недоотпуску продукции.

В процессе эксплуатации изоляция высоковольтного электрооборудования технологических установок испытывает негативное воздействие многочисленных факторов, в результате чего происходит снижение ее диэлектрической прочности, что под воздействием внутренних перенапряжений очень часто приводит к однофазным замыканиям на землю (ОЗЗ). На долю ОЗЗ приходится около 66 % всех аварийных отключений в распределительных сетях 6–10 кВ горно–металлургических предприятий [38].

Широкое внедрение высоковольтных вакуумных аппаратов привело к тому, что коммутационные перенапряжения (КП) являются одной из основных причин возникновения ОЗЗ, а неселективность защит от ОЗЗ приводит к необоснованному отключению неповрежденных присоединений, что сопровождается неплановым простоем технологического оборудования и негативно отражается на экономических показателях предприятия.

Кроме этого, несвоевременное обнаружение и отключение линии с ОЗЗ приводит к множественным повреждениям в распределительной сети 6–10 кВ за счет перенапряжений, которые возникают в режиме ОЗЗ.

Поэтому актуально совместное решение двух задач, направленных на ограничение внутренних перенапряжений и повышение эффективности существующих систем защит от ОЗЗ, что позволит уменьшить количество ОЗЗ в

распределительных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий и сократить необоснованный простой технологического оборудования.

Цель работы: разработка комплекса мер, направленных на сокращение числа ОЗЗ в распределительных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий и основанных на эффективном ограничении внутренних перенапряжений и на селективной работе защит от ОЗЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ аварийности распределительных сетей 6–10 кВ на современном этапе для выявления наиболее повреждаемых элементов в системе электропитания технологического оборудования.

2. Экспериментальные исследования, направленные на определение основных факторов, влияющих на величину и характер КП и перенапряжений в режиме ОЗЗ.

3. Аналитические исследования КП в режиме ОЗЗ, возникающих в системе “выключатель – кабельная линия – электродвигатель”.

4. Разработка эффективных методов и средств, позволяющих повысить селективность работы защит от ОЗЗ.

Объект исследований: распределительные сети и электродвигатели напряжением 6 – 10 кВ промышленных предприятий Красноярского края и Иркутской области.

Предмет исследований: коммутационные перенапряжения, напряжения в режиме ОЗЗ и селективность защит от ОЗЗ.

Методика исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории электрических цепей, теории электроснабжения электротехнических комплексов, теории электрических аппаратов, электрических машин, численные методы решения уравнений, методы математического моделирования и математической статистики.

В экспериментальных исследованиях применялись методы измерения внутренних перенапряжений и токов ОЗЗ.

Научная новизна работы:

1. Определены основные причины, приводящие к возникновению ОЗЗ в распределительных сетях 6–10 кВ на современном этапе, и наиболее повреждаемые элементы в системе электроснабжения технологических комплексов, позволяющие разработать комплекс мер по снижению количества ОЗЗ.
2. Установлены зависимости уровней КП в безаварийном режиме, возникающие в системе “выключатель – кабельная линия – электродвигатель”, от параметров данной системы, что позволило разработать методику для определения кратности КП в любой точке указанной системы.
3. Выявлены зависимости уровней перенапряжений, возникающих в режиме ОЗЗ, от величины и характера тока ОЗЗ и режима нейтрали сети напряжением 6 – 10 кВ, для обоснования рационального режима нейтрали сети.
4. Установлены зависимости уровней КП в режиме ОЗЗ от места возникновения ОЗЗ, частоты коммутационного импульса, кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ, числа повторных зажигания дуги в вакуумной камере и величины присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, возникающие в системе “ выключатель – кабельная линия – электродвигатель”, позволяющие разработать устройство для эффективного ограничения КП.

Практическая ценность работы:

1. Разработана методика, позволяющая в зависимости от типа выключателя, типа и мощности электродвигателя, длины и сечения кабельной линии определить кратность КП в любой точке системы “ выключатель – кабельная линия – электродвигатель”.
2. На основе экспериментальных и аналитических исследований определены параметры универсального RC–ограничителя и разработана его конструкция, которая была учтена при осуществлении промышленного выпуска ограничения КП типа RC – 6,6 – 0,25/50. Конструкция указанного устройства запатентована как полезная модель.
3. Определены параметры устройства, предназначенного для резистивного заземления нейтрали сети 6–10 кВ промышленных предприятий, разработана

его конструкция (с учетом принудительного отвода тепла), которая была учтена при выпуске устройства типа УДАТ – 10 – 500/75. Конструкция указанного устройства запатентована как полезная модель.

4. Выполнена практическая реализация комплексного подхода к снижению числа ОЗЗ в распределительных сетях 10 кВ ОАО “АГК”, основанного на совместной эксплуатации устройств РС – 6,6 – 0,25/50 и УДАТ – 10 – 500/75.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, положительными отзывами при эксплуатации ограничителей КИ типа РС – 6,6 – 0,25/50.

Автор защищает:

1. Установление зависимости КИ, возникающих в системе “выключатель – кабельная линия – электродвигатель”, от параметров данной системы как в безаварийном режиме эксплуатации, так и в режиме ОЗЗ.

2. Установление зависимости уровней перенапряжений, возникающих в режиме ОЗЗ, от величины и характера тока ОЗЗ и режима заземления нейтрали сети напряжением 6–10 кВ.

3. Методику определения кратности КИ в системе “выключатель – кабельная линия – электродвигатель” в зависимости от параметров данной системы.

4. Комплексный подход к снижению числа ОЗЗ в распределительных сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий, основанный на высокой эффективности токовых систем защиты от ОЗЗ и эффективном ограничении внутренних перенапряжений за счет совместной эксплуатации устройства УДАТ – 10 – 500/75 с ограничителями КИ типа РС – 6,6 – 0,25/50, подключенных к зажимам электродвигателей.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Перспективные материалы: получение и технологии

обработки” (г. Красноярск, 2004г.), XII Федеральной научно–технической конференции “Электрификация металлургических предприятий Сибири, прогнозирование параметров электроснабжения и нормирования, реорганизация электроснабжения и ремонта” (г. Новокузнецк, 2004г.), международной научно – практической конференции “Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота” (г. Красноярск, 2006г.).

Реализация полученных результатов.

Результаты работы использовались на предприятии ООО “Рутас” при проведении научно–технических работ с компанией “Русал” (ОАО “АГК”, ОАО “КрАЗ”, ОАО “БрАЗ”, ОАО “САЗ”), ЗФ ОАО “ГМК Норильский никель” (Надежденский металлургический завод), АО “Алроса” (Нюрбинский ГОК), ФГУП “ГХК”, ОАО “АНПЗ”, ООО “Красноярский цемент”.

Результаты работы были использованы при разработке учебного пособия “Проектирование электроснабжения промышленных предприятий (г. Красноярск, 2006г.)”, утвержденного УМО в области энергетики и электротехники.

По результатам работы получено два патента на полезную модель и опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 81 наименований и 9 приложений. Основной пакет диссертационной работы изложен на 160 страницах, проиллюстрирован 34 рисунками и 15 таблицами, приложения представлены на 59 страницах.

1. Состояние вопроса и задачи исследования

Представлен анализ аварийности распределительных сетей 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Восточной Сибири на современном этапе. Рассмотрены вопросы возникновения коммутационных и дуговых перенапряжений. Обосновывается актуальность комплексного подхода к снижению однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий. Сформулированы задачи аналитических и экспериментальных исследований.

1.1 Общие положения

Горнодобывающие, горно-перерабатывающие, нефтеперерабатывающие и металлургические предприятия Восточной Сибири с точки зрения условий эксплуатации распределительных сетей 6-10 кВ и высоковольтного оборудования имеют много общего.

В первую очередь отметим внешние факторы: загрязненность окружающей среды, влажность и значительные суточные перепады температуры, особенно в осенний и весенний периоды.

В процессе технологического цикла на высоковольтное электрооборудование воздействуют повышенные механические и вибрационные нагрузки. Основная масса высоковольтных двигателей (87 %) имеет мощность 315 кВт и более, поэтому сечение кабельных линий и типы коммутационных аппаратов и средств защиты имеют близкие параметры [30]. Средний возраст эксплуатируемых высоковольтных кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов составляет более 10 лет. Таким образом, горнодобывающие, горно-перерабатывающие, нефтеперерабатывающие и металлургические предприятия, расположенные в Восточной Сибири, можно рассматривать как единый объект для исследования.

Длительная эксплуатация высоковольтных кабельных линий, высоковольтного электрооборудования и негативное влияние внешних факторов приводит к интенсивному старению изоляции и снижению диэлектрической прочности,

что впоследствии приводит к электрическому пробое изоляции. Электрический пробой изоляции сопровождается ОЗЗ или двух–(трёх) фазным коротким замыканием (КЗ).

До настоящего времени нет единого мнения, какая из аварий в сети 6-10 кВ является преобладающей, что затрудняет выработать комплексный подход, позволяющий свести к минимуму число аварий в сетях 6-10 кВ.

Авторы публикаций [1, 3, 57, 61] считают, что основным видом аварий в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий являются КЗ. В тоже время авторы статей [10, 30, 49, 65] показывают, что в распределительных сетях 6-10 кВ на ОЗЗ приходится 65 – 75 % всех аварийных отключений.

Ряд авторов [16, 72] утверждают, что первоначально происходит ОЗЗ, но из-за несвоевременного обнаружения повреждённого присоединения ОЗЗ переходит в двух–или трёхфазное КЗ. Удельный вес подобных аварий составляет около 30 %. Следует отметить, что вышеприведённые источники охватывают временной период до 1995 г.

В последних публикациях [1, 49], связанных с ОЗЗ и КЗ, при обосновании актуальности исследований, как правило, делаются ссылки на вышеупомянутые работы. Кроме этого, работы [1, 10, 16, 30, 49,] посвящены промышленным предприятиям, расположенным в Европейской части Российской Федерации, на Урале и Западной Сибири, и не охватывают предприятия Восточной Сибири.

Поэтому современный анализ аварийности в распределительных сетях 6-10 кВ должен проводится на базе предприятий Восточной Сибири.

В настоящей работе в качестве базовых объектов исследований были выбраны следующие предприятия: горнодобывающие - угольные разрезы Красноярского края ("Бородинский", "Березовский-1") и Иркутской области ("Мугунский", "Сафроновский", "Черемховский", "Азейский", "Тулунский"); горно-перерабатывающие – Ачинский глинозёмный комбинат (АГК); металлургические – Красноярский (КраЗ), Саяногорский (СаАЗ) и Братский (БрАЗ) алюминиевые заводы; нефтеперерабатывающие – Ачинский нефтеперерабатывающий завод (АНПЗ).

Отличительной чертой распределительных сетей 6-10 кВ угольных разрезов, "АГК" и алюминиевых заводов является их конфигурация и общая протяжённость.

Распределительные сети 6-10 кВ угольных разрезов имеют слабо разветвлённую конфигурацию. Среднее число понизительных подстанций 35/6 (110/6 кВ) не превышает 4 единицы, а общая протяжённость воздушных и кабельных линий не превышает 50 км.

Распределительные сети 6-10 кВ "АГК", "АНПЗ" и алюминиевых заводов имеют сильно разветвлённую конфигурацию. Среднее число понизительных подстанций 220/10 (110/10 кВ) и распределительных подстанций напряжением 6-10 кВ составляет 25-45 единиц. Общая протяжённость воздушных и кабельных линий составляет 200-400 км.

Широкий охват предприятий с различной конфигурацией и протяжённостью сетей 6-10 кВ позволит выявить не только основной вид аварий в распределительных сетях 6-10 кВ, но и установить, какие факторы являются основополагающими в появлении ОЗЗ и КЗ.

1.2 Анализ аварийности распределительных сетей напряжением 6-10 кВ

Анализ аварийности распределительных сетей напряжением 6-10 кВ был выполнен на базе данных, собранных за период с 1985 по 2003 г.

За указанный период было проанализировано более 6000 аварийных отключений. Из них на угольные разрезы, "АГК" и алюминиевые заводы соответственно приходится 4668, 366 и 985 аварийных отключений.

Значительное число аварийных отключений на угольных разрезах связано с более тяжёлыми условиями эксплуатации распределительных сетей и технологического оборудования [4]. К таким условиям относятся: отсутствие кабельных галерей, сильные механические и вибрационные воздействия, резкий перепад температуры в течение суток в весенний и осенний период, ведение буровзрывных работ, наличие развитого железнодорожного или автомо-

бильного транспорта и постоянное перемещение фронта работ при добыче угля.

Обработка данных по аварийным отключениям в распределительных сетях 6-10 кВ показала, что процентное соотношение между КЗ, ОЗЗ и обрывами фаз следующее: 17 %, 66 %, и 14 %. В 3 % случаев тип аварий установить не удалось.

Таким образом, основным видом аварий в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ для промышленных предприятий, расположенных в Восточной Сибири, являются ОЗЗ. В дальнейшем ограничимся анализом ОЗЗ.

Анализ показывает, что для угольных разрезов распределение ОЗЗ имеет резко выраженный сезонный характер. Наибольшее число ОЗЗ приходится на май и сентябрь. Это связано с тем, что на угольных разрезах кабельные линии находятся на поверхности земли. В осенний и весенний периоды дневная температура положительная, влага заполняет микротрещины изоляции кабельных линий и электрооборудования. В ночное время температура опускается, как правило, ниже нуля градусов. Влага в микротрещинах превращается в лед, что сопровождается объёмным расширением микротрещин. С повышением дневной температуры в микротрещинах снова образуется влага, но микротрещины обладают большим размером, следовательно, диэлектрическая прочность изоляции уменьшается и незначительные термические перегрузки, коммутационные или грозовые перенапряжения могут привести к электрическому пробое изоляции, то есть к ОЗЗ [72].

В летний период количество ОЗЗ уменьшается, это связано с тем, что прекращается резкое изменение температуры в течение суток. Температура окружающей среды повышается, что приводит к эффекту "подсушивания кабеля", диэлектрическая прочность изоляции кабеля повышается, число ОЗЗ уменьшается.

В зимний период за счёт низкой температуры окружающей среды изоляция кабельных линий имеет наибольшую диэлектрическую прочность, что способствует снижению числа ОЗЗ.

Для "АГК" и алюминиевых заводов распределение ОЗЗ в течение года имеет плавный характер с небольшим повышением числа ОЗЗ в мае-июне и сентябре-октябре. Это связано с тем, что основное количество кабельных линий уложено в специальных кабельных каналах или в траншеях. Поэтому в осенний и весенний периоды влияние резкого изменения температуры в течение суток на изоляцию кабельных линий сведено к минимуму.

При анализе распределения ОЗЗ по годам временной промежуток был разбит на две части в зависимости от количества вакуумных выключателей, эксплуатируемых в распределительных сетях 6-10 кВ. Первая часть захватывала период с 1985 по 1995 г. В этот период доля вакуумных выключателей от общего числа высоковольтных выключателей, эксплуатируемых на угольных разрезах, "АГК" и алюминиевых заводах, соответственно составила 22 %, 6 %, 5 %. Вторая часть охватывала период с 1995 по 2003 г. В этот период доля вакуумных выключателей от общего числа высоковольтных выключателей, эксплуатируемых соответственно на угольных разрезах, "АГК" и алюминиевых заводах, составляет 65 %, 12 %, 7%. Анализ показывает, что использование вакуумных выключателей в сетях 6-10 кВ приводит к росту числа ОЗЗ.

Например, для угольных разрезов увеличение числа вакуумных выключателей с 22 % до 65% привело к тому, что число ОЗЗ возросло в 4 раза. Это связано с тем, что вакуумные выключатели инициируют возникновение более высоких уровней КП по сравнению с масляными выключателями. Величина КП может превышать номинальное напряжение сети в 5 – 7 раз. Подобные перенапряжения представляют серьезную опасность для изоляции кабельных линий, электродвигателей и трансформаторов [5, 23, 42].

В табл. 1.1 более детально показаны виды повреждений и их удельный вес в образовании ОЗЗ. Эти данные наглядно указывают на то, что с внедрением вакуумных выключателей электрический пробой изоляции высоковольтных

электродвигателей на угольных разрезах (УР), "АГК" и алюминиевых заводах (АЗ) происходит чаще в 9,5; 3,4 и 3 раза соответственно.

Трансформаторы более устойчивы к КП, поэтому электрический пробой изоляции происходит гораздо реже, чем у двигателей. Однако число трансформаторов, вышедших из строя из-за пробоя изоляции, за период после 1995 года по сравнению с периодом до 1995 года, на угольных разрезах, "АГК" и алюминиевых заводах увеличилось соответственно в 5,7; 2,1 и 1,44 раза. Кроме этого, внедрение вакуумных выключателей привело к увеличению числа электрических пробоев изоляции разделок кабелей и кабельных муфт в среднем в 1,6 раза.

Для определения удельного веса КП в образовании ОЗЗ были детально проанализированы условия, при которых наступал пробой изоляции электродвигателей, трансформаторов и кабельных линий.

Если пробой изоляции происходил во время грозы, за основополагающий фактор принималось грозовое перенапряжение. Если пробой изоляции был зафиксирован после коммутационных операций, за основу принимали КП. Если пробой изоляции происходил в рабочем режиме, основной причиной пробоя считалось естественное старение изоляции. Механическое воздействие на изоляцию принималось за причину пробоя изоляции, если при осмотре места пробоя были отчётливо видны механические повреждения.

Таблица – 1.1 Основные виды повреждений, приводящих к ОЗЗ в сетях 6-10 кВ угольных разрезов (УР), АГК, алюминиевых заводов (АЗ).

Наименование элемента схемы электроснабжения	Вид повреждения	Удельный вес, %					
		1985-1995			1995-2003		
		УР	АГК	АЗ	УР	АГК	АЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
Понижительная Подстанция (Распределитель- ная подстанция)	Пробой изоляторов	4,6	6	3	5	4	7,2
	Пробой изоляции ка- бельной вставки	3,4	8	12	10	15,2	16

1	2	3	4	5	6	7	8
Воздушная ЛЭП	Схлестывание проводов	8,5	-	-	1,5	-	-
	Падение опор	5,5	-	-	1	-	-
	Пробой изоляторов	5,5	-	-	4	-	-
	Обрыв проводов	4,7	-	-	0,5	-	-
Приключательный пункт	Пробой изоляторов	9	-	-	5	-	-
	Механическое воздействие	1	-	-	1	-	-
	Кабельная муфта	2	-	-	9	-	-
Кабельная линия	Пробой изоляции кабеля	14,9	44,5	36,3	4	22	13,9
	Пробой изоляции разделок и муфт кабеля	17,5	15	24,9	28	24,7	30,2
	Отгорание кабеля	8,3	7,3	8,7	2	6,4	5,8
	Механическое воздействие	11,3	9,4	8,2	1	3,4	8,2
Электроприёмник	Высоковольтные двигатели	2,3	5,3	5,2	22	13,2	15,2
	Трансформаторы	0,7	2,2	1,8	4	4,3	2,6
Прочие		1,5	2,3	3,3	2	1,8	0,6

Данные, представленные на рис. 1.1, наглядно показывают, что КП являются основополагающим фактором возникновения ОЗЗ в распределительных сетях 6-10 кВ. Данные, представленные на рис.1.1б, показывают, что перенапряжения, возникающие в режиме ОЗЗ, вызывают пробой изоляции сети практически в каждом третьем случае. Это связано с несвоевременным обнаружением и устранением (отключением) участка сети с ОЗЗ. Основной причиной несвоевременного обнаружения ОЗЗ является низкая селективность существующих защит от ОЗЗ [10, 65]. Таким образом, повышение надёжности распределительных сетей 6-10 кВ можно добиться за счёт резкого снижения числа ОЗЗ. Для достижения этой цели необходимо эффективно ограничивать КП и перенапряжения, возникающие в режиме ОЗЗ, а также добиться высокой селективности защит от ОЗЗ.

На рис. 1.1 показан удельный вес основных причин ОЗЗ до 1995 года и после 1995 года.

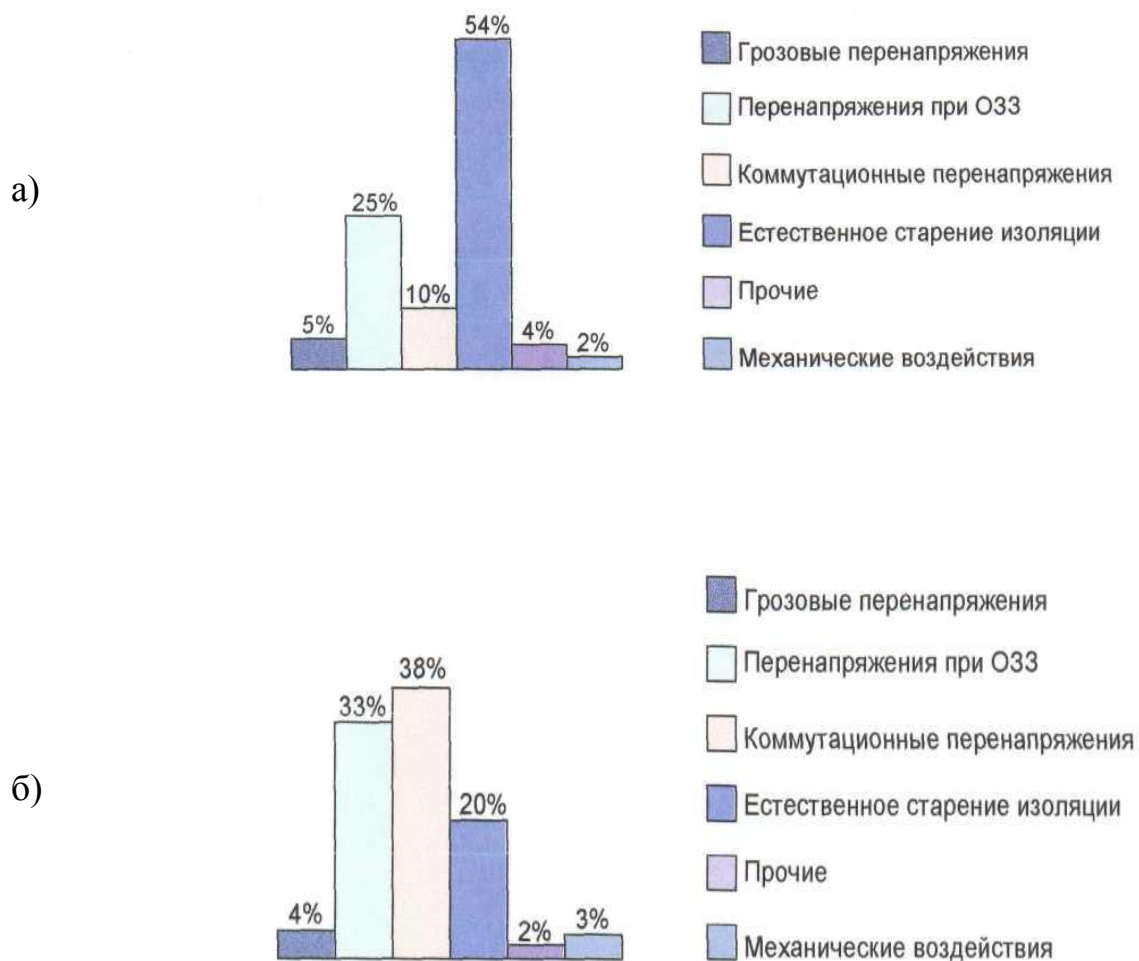


Рисунок 1.1 – Удельный вес основных причин ОЗЗ.

а) период 1988÷1995 г; б) период 1996÷2003 г.

1.3 Анализ исследований коммутационных перенапряжений

Проблеме КП посвящено значительное число научно-исследовательских работ [5, 12, 23, 36, 60, 80]. Первые исследования КП были начаты еще в 30-х годах двадцатого века [9]. В основном, в этот период в центре внимания исследователей оказались трансформаторы и линии электропередачи [1].

В работах [16, 55, 63] приведены экспериментальные данные, полученные при отключениях трансформаторов в распределительных сетях 6-10 кВ. Максимально зафиксированный коэффициент перенапряжений при коммутации трансформатора ТМ-25/6 составил $6,2U_{фм}$, где $U_{фм}$ – амплитудное значение

ние фазного напряжения [55]. Наибольшие значения восстанавливающегося напряжения были зафиксированы при отключениях ненагруженных трансформаторов.

Наибольшую опасность КП представляют для вращающихся электрических машин. Проблеме КП в сетях с двигательной нагрузкой посвящен ряд работ [1, 14, 23, 35, 50].

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований перенапряжений, возникающих при отключении в реверсе низковольтных электродвигателей А02-41-4; А02-52-4; А2-72-4 мощностью 4, 10 и 30 кВт соответственно. Максимальная амплитуда импульсного напряжения достигала значений (6-7) $U_{фм}$.

В работе [50] приведены результаты измерений амплитуд КП на установке, имитировавшей участок шахтной электрической сети. Максимально зафиксированные значения перенапряжений при включении короткозамкнутого асинхронного двигателя ЭКО-450 мощностью 450 кВт превышали фазное напряжение в три раза.

В работе [16] приведены данные статистической обработки экспериментальных значений коммутационных перенапряжений, полученных при включениях электродвигателей мощностью до 100 кВт в различных режимах. В режиме холостого хода вероятность появления перенапряжений величиной (1,5-2,0) $U_{фм}$, составила 58 %. Для номинальной нагрузки получены практически такие же результаты (1,6-2,0) $U_{фм}$.

Анализ литературных источников показал, что более подробно рассмотрен вопрос КП, возникающих при отключениях электродвигателей. Данному вопросу посвящен ряд работ [14, 16, 23, 35, 55, 80].

В работе [35] приводятся результаты измерений при отключении электродвигателей АВ-113-4М. Максимальные перенапряжения в этом случае находились в диапазоне (5-7) $U_{фм}$. Все измерения производились при заторможенном роторе электрических машин.

Более низкие уровни перенапряжений были зафиксированы при отключении электродвигателей мощностью 630-1250 кВт масляным выключателем ВМП-10 [16]. Наибольший зарегистрированный коэффициент перенапряжений в этом случае равен $3,5 U_{\text{фм}}$.

Несколько иные результаты экспериментальных исследований КП при отключении асинхронного электродвигателя мощностью 1500 кВт были получены на гидрошахте "Юбилейная" в Кузбассе [62]. При отключении двигателей в пусковом и рабочем режимах были зафиксированы перенапряжения $2,2 U_{\text{фм}}$. Наибольшие значения перенапряжений, которые достигают $3 U_{\text{фм}}$ получены при отключении холостого хода двигателя.

Проводились исследования влияния типа выключателя на уровни возникающих перенапряжений. Так, в работе [26] приведены значения коэффициентов перенапряжений, определенных при отключениях воздушным и масляным выключателями в различных режимах работы электродвигателей мощностью 100-250 кВт, напряжением 6 кВ. В случаях номинальной нагрузки максимальные значения перенапряжений равны: при коммутации воздушными выключателями – $2,5 U_{\text{фм}}$; масляными – $1,2 U_{\text{фм}}$. При отключении электродвигателя с заторможенным ротором максимальные перенапряжения увеличиваются примерно вдвое и составляют $4,2 U_{\text{фм}}$ для воздушных и $2,5 U_{\text{фм}}$ для масляных коммутационных аппаратов.

Достаточно интересной по данной тематике является работа [71]. В ней обобщены результаты исследований влияния на уровни КП различных факторов. По типу выключателя приведены следующие данные: при отключении в режиме пуска электродвигателей мощностью 100-250 кВт наименьшие перенапряжения создают элегазовые, электромагнитные и баковые масляные выключатели, а более высокие значения возникают при коммутациях воздушными выключателями. Кроме того, в этой работе затронут вопрос влияния других факторов на величину перенапряжений: мощности двигателя, длины кабельной вставки и т.д. При этом характер влияния данных факторов на величину перенапряжений в приведенной работе противоречив. Так, при

отключениях электродвигателей мощностью менее 500 кВт перенапряжения могут достигать $4,2U_{\text{фм}}$. В пределах мощностей 500-1000 кВт происходит снижение максимальных значений перенапряжений до $2,8-2,9 U_{\text{фм}}$. С дальнейшим ростом мощности электродвигателей перенапряжения снижаются еще больше, хотя в одном случае при мощности электродвигателя $P_{\text{н}}=1500$ кВт зафиксирован резкий скачок напряжения. Коммутация двигателей производилась маломасляным выключателем в режиме пуска. При отключении электродвигателей с номинальной нагрузкой значения коэффициентов перенапряжений не превышали $2U_{\text{фм}}$. Не приводилась информация о типах коммутируемых двигателей и сроках их эксплуатации, что не позволяет оценить степень влияния возникающих напряжений на изоляцию обмотки машины. Также имеются расхождения результатов исследований перенапряжений в цепях с различной длиной кабеля от высоковольтного выключателя до двигателя. Так, при отключении двигателя максимальные значения перенапряжений зафиксированы при длине кабеля 30 м и мощности электродвигателя 520 кВт. В то же время, результаты измерения КП на электродвигателе мощностью 1250 кВт показали, что в диапазоне 20-200 м длина кабеля не оказывает существенного влияния на КП. В обоих случаях коммутация производилась маломасляным выключателем. Такие взаимоисключающие выводы, вероятнее всего, получены на основе результатов исследований, выполненных в различных условиях, что не позволяет сделать заключение о степени влияния кабеля на КП.

Кроме того, отсутствовали сведения о снижении электрической прочности изоляции двигателей в процессе эксплуатации. Все это не позволяло судить о влиянии на изоляцию электродвигателей возникающих КП.

После внедрения в начале 70-х годов в опытно-промышленную эксплуатацию вакуумной коммутационной аппаратуры проблема КП существенно обострилась, что послужило толчком к всесторонним исследованиям этих процессов.

Причинами возникновения импульсного переходного напряжения являются: физический срез тока, многократные повторные зажигания дуги и виртуальный срез тока [5, 11, 15, 79].

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

По данному вопросу имеется ряд работ [12, 14, 15], в которых приводятся результаты выполненных исследований. В этих работах показано, что срез тока возникает при отключении незначительных по величине токов нагрузки вследствие нестабильного горения дуги в вакуумной дугогасящей среде межконтактного промежутка вакуумного коммутационного аппарата. Исследования выявили, что на процессы, ведущие к преждевременному обрыву тока, основное влияние оказывают теплофизические параметры контактных материалов выключателей [12].

В работе [14] приведены результаты исследования зависимости уровня тока среза от индуктивности нагрузки и напряжения питающей сети, из которых видно, что ни индуктивность, ни напряжение не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на уровень тока среза. Дальнейшие исследования подтвердили, что основное влияние на ток среза в выключателе оказывают контактные материалы [12]. Было определено, что снижения возникающего переходного напряжения вследствие преждевременного обрыва дуги можно добиться путем применения контактных материалов с продолжительным временем горения дуги, т.е. с применением мягких материалов.

Однако такой путь не всегда является приемлемым, так как необходимо учитывать взаимоисключающие требования к коммутационному аппарату: сваривание контактов, их износ и способность отключать большие токи. В то же время, продолжающиеся научно-исследовательские работы в этой области позволили создать новые контактные материалы. Уровень тока среза таких контактов снизился в несколько раз. Так, в вакуумных коммутационных аппаратах напряжением 10 кВ с номинальным током до 400 А используется сплав

Fe(70 %)-Cu(27 %)-Bi(3 %) марки ЖДВ, дающий максимальный ток среза $i_{ср}=1$ А (камера КДВ2-10/5/400УХЛ2) [37].

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

Несмотря на существенный прогресс в области разработки контактных материалов, дающих малый ток среза, проблема КП не утратила своей актуальности вследствие наличия других механизмов возникновения и эскалации КП при отключении.

Значительные по величине перенапряжения при отключении нагрузки могут быть вызваны многократными повторными зажиганиями дуги и виртуальным срезом тока.

В первом случае перенапряжение возникает, если отключение тока происходит в точке естественного перехода тока через нуль. При этом скорость нарастания восстанавливающегося переходного напряжения превышает скорость роста электрической прочности межконтактного промежутка. В момент превышения диэлектрической прочности промежутка переходным напряжением между расходящимися контактами происходит пробой и возникает колебательный процесс уравнивания напряжения нагрузки и сети, что вызывает протекание через элементы «емкость сети - индуктивность кабеля - емкость нагрузки» высокочастотного тока. При прерывании высокочастотного тока вновь начинается рост восстанавливающегося напряжения, и если к этому моменту электрическая прочность промежутка недостаточна, чтобы выдержать возникшие напряжения, то возникает повторное зажигание. Это, в свою очередь, приводит к постепенному росту электромагнитной энергии в отключаемом контуре и, как следствие, увеличению напряжения на зажимах нагрузки, максимальное значение которого определяется отключающей способностью вакуумной коммутационной аппаратуры и уровнем токов среза. Во втором случае КП возникают при виртуальных срезах токов в результате многократных повторных зажиганий дуги. При повторном зажигании дуги в первой отключенной фазе появляет-

ся высокочастотный ток, который через паразитные емкости выключателя проникает в соседние фазы. В результате наложения данного тока на ток промышленной частоты, имеющий противоположную полярность, в этих фазах могут возникать срезы тока значением в сотни ампер (рис.1.2). Данный процесс развивается в сетях, имеющих сильную, емкостную связь между фазами [7].

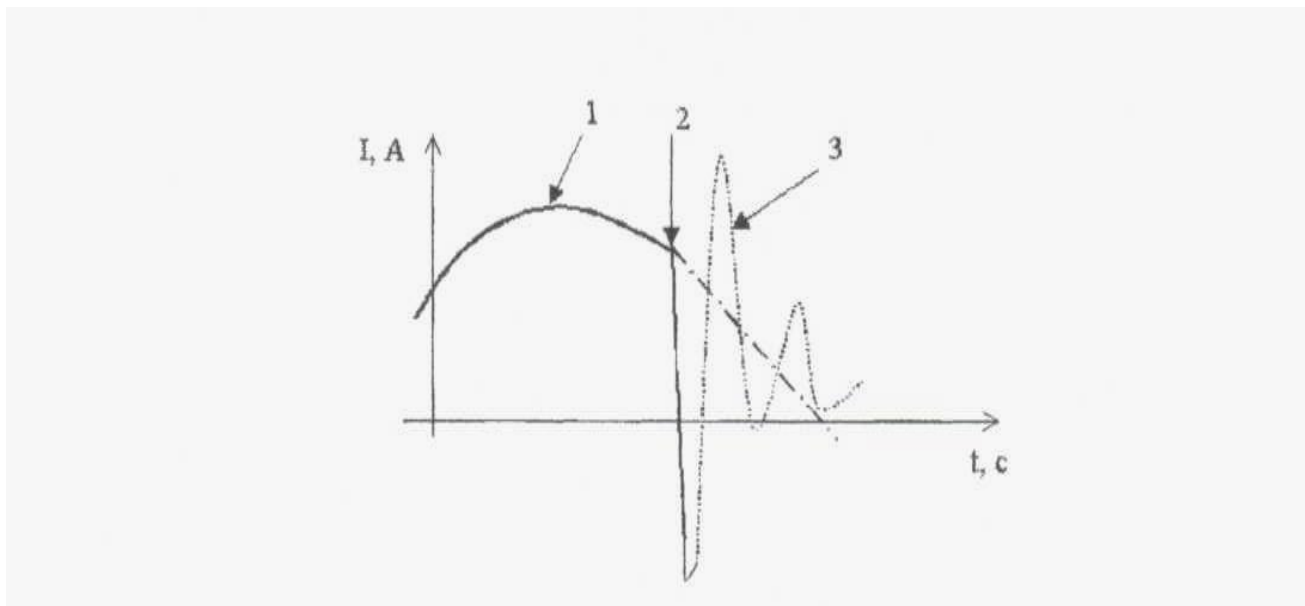


Рисунок 1.2 – Виртуальный срез тока: 1 - ток промышленной частоты, 2 - виртуальный срез тока; 3 - высокочастотный ток.

Одной из первых, где были начаты экспериментальные исследования перенапряжений при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумной коммутационной аппаратурой, является горнодобывающая промышленность, так как именно в ней были внедрены первые вакуумные выключатели в опытно-промышленную эксплуатацию. В работе [62] приведены результаты экспериментальных исследований перенапряжений, проведенных в 1975 году институтом ВНИИГидропром в Кузбассе. Измерения проводились при коммутации вакуумными выключателями электродвигателей типа ДАЗ мощностью 1500 кВт углесосных установок пульпоперекачивающей станции. Максимальные перенапряжения, после статистической обработки экспериментальных данных, имели следующие значения: в режиме рабочей нагрузки — $2,2U_{\text{фм}}$ при

токах среза не более 20 А; в процессе пуска – $1,8 U_{фм}$; в режиме холостого хода – $2,94 U_{фм}$.

Использование конденсаторной защиты по схеме «треугольник» последовательно с активными токоограничивающими сопротивлениями приводило к снижению уровней возникающих перенапряжений при $C = 0,1$ мкФ на 35 %, а при $C=0,2$ мкФ на 54 %.

Значительный объем исследований перенапряжений при коммутациях высоковольтных электрических машин и трансформаторов в период с 2000 года по 2004 год были выполнены сотрудниками кафедры “Электрификации горно-металлургического производства” Государственного Университета цветных металлов и золота и ООО "Рутас" г. Красноярск. Существенная часть этих работ посвящена экспериментальным исследованиям перенапряжений, возникающих при коммутациях вакуумными выключателями высоковольтных двигателей и трансформаторов, эксплуатируемых на угольных разрезах в нормальном режиме.

В ходе выполненных экспериментальных исследований были получены неординарные результаты, в частности, КП, превышающие значение $8U_n$, были зафиксированы при коммутации электродвигателей в режиме ОЗЗ [40]. Последние обстоятельства заставляют более детально обратить внимание на КП в режиме ОЗЗ. Для решения подобной задачи необходимо проанализировать состояние вопроса, связанного с перенапряжениями в режиме ОЗЗ.

1.4 Анализ исследований перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю

Теоретические и экспериментальные исследования перенапряжений в режиме ОЗЗ были начаты в 30-ых годах 20 века. Данные исследования показали, что наибольшие перенапряжения в режиме ОЗЗ возникают при дуговом ОЗЗ. По гипотезе Петерса, дуга успевает погаснуть при первом переходе через нуль полного тока с учётом высокочастотных колебаний. По гипотезе

Слепяна, дуговой промежуток не успевает сколько-нибудь существенно восстанавливать свою электрическую прочность при быстром проходе через нуль высокочастотных колебаний. По этой гипотезе дуговой промежуток успевает восстановить свою электрическую прочность после затухания высокочастотных колебаний, когда медленно проходит через нуль сравнительно небольшой ток промышленной частоты, определяющийся ёмкостью сети. Согласно теории Петерса и Слепяна максимальный уровень перенапряжений при дуговом ОЗЗ может достигать $4,2 U_{\text{фм}}$.

Экспериментальные измерения, выполненные в период 1930-1955 годов, показали, что максимальные перенапряжения при дуговом ОЗЗ не превышают $3,3-3,5 U_{\text{фм}}$. По этой причине в 1957 году исследователями Н.Н. Беляковым и Ч.М. Джуварлы [26] была предложена гипотеза: дуга пытается погаснуть при каждом проходе через нуль полного тока с учётом высокочастотных составляющих. Однако при этом сравнительно быстро (с частотой собственных колебаний сети) на дуговом промежутке восстанавливается напряжение, возникает повторный пробой, новое погасание и так далее, пока восстанавливающееся напряжение собственной частоты не будет ниже некоторого предела. После этого дуга гаснет, на дуговом промежутке восстанавливается сравнительно медленно более высокое напряжение промышленной частоты, и снова происходит повторный пробой. По теории Белякова Н.Н. и Джуварлы Ч.М., максимальные перенапряжения в подобном режиме могут достигать $3,3 U_{\text{фм}}$.

В период с 1960 по 1990 год были проведены теоретические и экспериментальные исследования перенапряжений при дуговых ОЗЗ.

Учёные МГИ, СГИ, ИГД имени Скочинского, ДПИ выполнили исследования ОЗЗ применительно к горным предприятиям. В этих исследованиях были охвачены распределительные сети напряжением 6-10 кВ угольных разрезов, железорудных карьеров и дражных полигонов. Максимальные зарегистрированные перенапряжения при дуговом ОЗЗ для данных объектов промышленности находятся в диапазоне $2,6-3,2 U_{\text{фм}}$. При этом ток ОЗЗ не превышает 3,5 А [10, 65, 70].

Авторы работ [6, 44, 46] направили свои исследования на изучение перенапряжений при дуговом ОЗЗ на предприятиях чёрной и цветной металлургии. Максимально зафиксированные значения перенапряжений при дуговом ОЗЗ для данной группы промышленных предприятий находились в диапазоне 2,9-3,5 $U_{фм}$. При этом ток ОЗЗ находился в диапазоне от 3,5 до 50 А.

Исследователи [16, 48, 49,] занимались изучением дуговых ОЗЗ в сетях с токами ОЗЗ, превышающими 50 А. К таким сетям, как правило, относятся сети больших муниципальных образований и промышленных групп. Для подобных сетей максимальная величина перенапряжений при дуговом ОЗЗ не превышает значений 2,5 $U_{фм}$.

Анализ вышеперечисленных источников позволяет сделать следующее заключение:

1. При весьма большом токе однофазного замыкания на землю ($I_{озз} > 50 \text{ А}$) дуга горит устойчиво, падение напряжения на дуге сравнительно мало, и, вследствие большой проводимости при проходе тока через нуль, не успевает восстанавливаться сколько-нибудь значительная электрическая прочность изоляции, при этом перенапряжения не превышают значения 2,5 $U_{фм}$.

2. При достаточно малом токе ($I_{озз} < 2,5 \text{ А}$) дуга горит неустойчиво, и после одного или нескольких повторных зажигания и погасаний, несколько раздувшись за счет тепловых потоков воздуха, дуга гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность, и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы, при этом перенапряжения не превышают 3,2 $U_{фм}$.

3. При промежуточном значении тока ($2,5 \text{ А} < I_{озз} < 50 \text{ А}$) наблюдаются многократные погасания и зажигания дуги, сопровождающиеся колебательными перезарядами емкости сети и перенапряжениями, величина которых может возрасти до 3,5 $U_{фм}$.

Авторы работ [21, 74, 75] доказали, что для изоляции электродвигателей максимально допустимая величина перенапряжений не должна превышать

2,4 $U_{фм}$. Очевидно, что существующие перенапряжения при дуговом ОЗЗ могут привести к электрическому пробое изоляции высоковольтных двигателей. Поэтому в период с 1980 года по 2004 год проводятся исследования по эффективному ограничению перенапряжений, возникающих в режиме дугового ОЗЗ.

Ряд авторов [2, 29, 31] для эффективного ограничения перенапряжений при дуговом ОЗЗ рекомендуют использовать нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и доказывают, что перенапряжения при этом не будут превышать значения 2,4 $U_{фм}$. В тоже время в работах [32, 38, 40,] получены уровни ограничений дуговых перенапряжений при использовании ОПН на предприятиях. Величина перенапряжений при использовании ОПН составляет 2,6-2,7 $U_{фм}$, кроме того, ОПН подвержены термическому разрушению при продолжительных ОЗЗ. Например: средний срок эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений типа ОПНК-6 на угольных разрезах Красноярского края не превышает 1,2 года. Основная причина выхода из строя - термическое разрушение [40].

Авторы работ [8, 25, 47,] для эффективного ограничения токов ОЗЗ и, как следствие, перенапряжений предлагают автоматические дугогасящие реакторы с разбалансировкой не более 5 %. В данных работах приводятся как теоретические, так и экспериментальные исследования дуговых перенапряжений с использованием дугогасящих реакторов. Показано, что максимально зарегистрированные дуговые перенапряжения не превышают 2,2 – 2,4 $U_{фм}$. Однако исследователи [24] утверждают, что при полной компенсации емкостного тока в режиме ОЗЗ дугогасящими ректорами в сети могут возникать резонансные перенапряжения, превышающие фазные напряжения сети в 3,5-4 раза, т.е. эффективность использования дугогасящих реакторов, как средства ограничения дуговых перенапряжений является противоречивой.

В последнее время учёные г. Санкт-Петербурга и г. Новосибирска для глубокого ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ предлагают использовать резистивное заземление нейтрали в сетях 6-10 кВ. В этом направлении проведены теоретические работы и разработаны соответствующие кон-

структивные решения, позволяющие ограничивать перенапряжения при дуговых ОЗЗ до значений $2-2,2 U_{фм}$.

Следует отметить, что исследования в вышеперечисленных работах относятся к неповреждённым фазам сети в режиме ОЗЗ. До настоящего времени считалось, что перенапряжения в режиме ОЗЗ в повреждённой фазе не возникают. Однако исследования профессора Обабкова В.К. показали, что на повреждённой фазе возникают перенапряжения, которые могут превышать напряжение в сети в 4,5-6 раз в зависимости от величины тока ОЗЗ [25].

Таким образом, анализ литературных источников, посвященных перенапряжениям при дуговых ОЗЗ, показал, что до настоящего времени остаются проблемы как теоретических, так и экспериментальных исследований данного вида перенапряжений.

С учётом изложенного, целью данной диссертационной работы является определение зависимости величины КП от типа и мощности высоковольтных двигателей, типа коммутационного аппарата, от параметров кабельной линии, а также исследования КП в режиме ОЗЗ с учётом работы защиты от ОЗЗ и разработка комплекса мер, позволяющих сократить число ОЗЗ в сетях 6-10 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования КП на различных типах высоковольтных двигателей с учётом типа и длины кабельной линии.
2. Провести аналитические и теоретические исследования КП в режиме ОЗЗ.
3. На основе результатов исследований провести анализ эффективности существующих устройств защиты от коммутационных и дуговых перенапряжений.
4. Разработать научно обоснованный и практически реализуемый комплексный подход к снижению ОЗЗ в распределительных сетях 6–10 кВ, основанный на эффективном ограничении дуговых перенапряжений и КП в сочетании с высокой селективностью защит от ОЗЗ.

В диссертационной работе эти задачи решены на примере распределительных сетей 6–10кВ горнодобывающих, горно-перерабатывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий, расположенных в Восточной Сибири.

2. Экспериментальные исследования внутренних перенапряжений в электрических сетях напряжением 6-10кВ

Проведен анализ измерительных устройств перенапряжений и методик измерений. Приведены результаты измерений КП на высоковольтных электродвигателях в зависимости от их типа и мощности электродвигателя, а также от длины, сечения кабельных линий и типа коммутационного аппарата. Проведена статистическая обработка эмпирических значений КП. Разработан экспресс-метод оценки КП при использовании масляных и вакуумных выключателей для коммутации электродвигателей. Приведены результаты измерений перенапряжений при дуговых ОЗЗ и КП в режиме ОЗЗ.

2.1. Методические основы экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений

Известно, что величина перенапряжений, возникающих при коммутациях высоковольтных электродвигателей, зависит от большого числа факторов: величины отключаемого тока, типа коммутационного аппарата, неодновременности расхождения контактов коммутатора, характера нагрузки, параметров отключаемой нагрузки, длины и сечения кабельной вставки между выключателем и электродвигателем и т.д. Многие из этих факторов носят случайный характер и действуют в различных сочетаниях.

Учет всех факторов при аналитических исследованиях переходных процессов, возникающих при коммутации электродвигателей, не представляется возможным. Поэтому экспериментальные исследования являются основной базой для дальнейших теоретических исследований и разработки высокоэффективных методов и средств борьбы с КП.

Анализ литературных источников, проведенный автором диссертационной работы, показал, что существует большое количество приборов и устройств для

исследований КП: воздушный промежуток с заданным напряжением пробоя, клидонограф, тениограф, пиковый вольтметр, осциллографические регистраторы [16].

Однако опыт экспериментальных исследований показал, что существующая отечественная измерительная аппаратура для исследования перенапряжений не может быть использована в производственных условиях по следующим причинам:

1. Значительная погрешность измерений при использовании клидонографов и тениографов.
2. Неприспособленность для работы на реальных объектах исследований (резкие колебания температуры окружающей среды, удары, ускорения, сильные вибрации, большой вес, габариты).
3. Использование автоматических регистраторов с электроннолучевой разверткой требует высококвалифицированного и систематического обслуживания, что практически является невозможным в условиях работы оборудования.
4. Влияние сильных помех, возникающих в производственных условиях: работа сварочных агрегатов и сильные электромагнитные поля.
5. Трудоемкость и относительно большая длительность настройки измерительной аппаратуры, что недопустимо на высокопроизводительной электроустановке, так как число циклов " включение - отключение " ограничено технологическим процессом.

В связи с этим сотрудниками кафедры «Электрификации горно-металлургического производства» Государственного университета цветных металлов и золота и ООО "Рутас" был разработан аналоговый преобразователь амплитуд импульсов КП РКП – 4. Практическая реализация данного прибора была выполнена специалистами ОАО "Алмазавтоматика" г. Красноярска. Прибор состоит из ёмкостного накопительного устройства и преобразователя накопленной информации в удобную для отсчета величину. Принцип действия таких регистраторов основан на амплитудно-временном аналоговом преобразо-

вании исследуемых импульсов в квазипостоянное напряжение с цифровым выводом информации. Это позволило повысить точность и упростить производство измерений на действующих электроустановках.

Техническая характеристика и условия эксплуатации регистратора амплитуд КП РКП – 4:

диапазон измеряемых амплитуд	5-25 В;
основная приведенная погрешность	6 %;
диапазон длительности импульсов	5- 2000 мкс;
время фиксации показаний	0,5 мин;
температура окружающего воздуха	-20 + 40°С;
относительная влажность до	80%;
атмосферное давление	86 - 106 кПа.

Для снижения уровней импульсов перенапряжений до приемлемых для измерений значений существуют различные устройства. В основном предпочтение отдается делителям напряжения (ДН). Однако некоторые типы делителей удовлетворительно функционируют только при определенных типах сигналов. Например, делитель, состоящий только из активного сопротивления, успешно работает при измерениях в цепях постоянного тока, а чисто емкостный делитель в цепях переменного тока. Активно-емкостный делитель, как правило, используется в тех случаях, когда высоковольтное плечо ДН состоит из большого числа конденсаторов (измерения на сверхвысоких напряжениях) и имеет длину порядка нескольких метров. В этом случае при высокой частоте начинает сказываться влияние распределенной индуктивности. Указанный делитель имеет сложную конструкцию, что затрудняет его использование непосредственно на объектах исследования.

Эксперименты, проведенные сотрудниками кафедры «Электрификации горно-металлургического производства», показали, что для измерений КП наиболее приемлемыми являются компенсированные емкостные делители.

При совместной работе ДН и регистратора РКП входные параметры регистратора не оказывают влияния на результаты измерений. Не возникают допол-

нительные погрешности и от кабельной линии. Длина соединительной кабельной линии у передвижных электроустановок линии не превышает 5 м при напряжении 6-10 кВ. При измерениях на стационарных установках напряжением 6-10 кВ - не более 3 м.

Делители перенапряжений выполняются в трехфазном исполнении, но могут применяться и как однофазные. Конструкция делителя позволяет ступенчато изменять коэффициент деления, что позволяет измерять уровни перенапряжений в сетях 3, 6 и 10 кВ.

Технические характеристики и условия эксплуатации компенсированного емкостного делителя напряжения ДНЕК-10:

номинальное напряжение	$U_H = 3,6, 10 \text{ кВ};$
импульсная прочность	$U_{\text{им. пр.}} = 115 \text{ кВ};$
коэффициенты деления по ступеням	1182, 2390, 3852;
максимальная основная погрешность	0,77 %;
температура окружающего воздуха	-20 +40 С;
относительная влажность при температуре +20 С	до 80 %;
атмосферное давление	86-106 кПа.

Электроизмерительная аппаратура прошла метрологическую аттестацию и испытана в лабораторных и промышленных условиях.

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

Использование только регистратора КП не позволяет зафиксировать форму и длительность коммутационного импульса.

Указанные факторы можно учесть при использовании современных многоканальных цифровых осциллографов, которые являются компактными и удобными в обслуживании. Для проведения экспериментальных исследований в реальных условиях использовались приборы РКП-4, многоканальный цифровой осциллограф и делитель напряжения ДНЕК-10. Измерительная аппаратура подключалась в двух точках (рис.2.1):

К1 – начало кабельной линии, соединяющей выключатель с электродвигателем или трансформатором;

К2 – зажимы статорной обмотки электродвигателя.

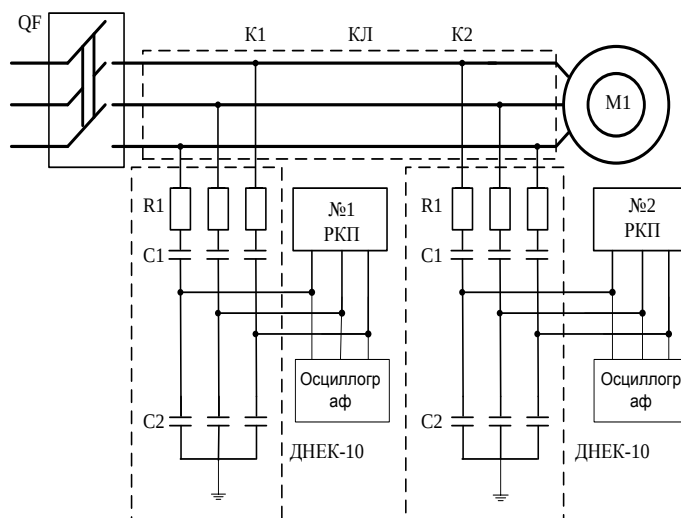


Рисунок 2.1 – Схема измерения коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя и на зажимах выключателя.

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

Основная цель экспериментальных исследований - получение статистических распределений перенапряжений для различных типов электродвигателей и регистрация максимально возможных КП.

2.2 Методические основы экспериментальных исследований перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю

При исследовании напряжений в режиме ОЗЗ необходимо установить влияние характера тока ОЗЗ на величину перенапряжений при дуговых ОЗЗ, а также выяснить влияние конфигурации сети на величину перенапряжения в режиме ОЗЗ. Кроме этого, исследовать КП в режиме ОЗЗ.

На рис.2.2 показана схема, с помощью которой производились исследования перенапряжений при дуговых ОЗЗ.

При срабатывании высоковольтного выключателя QF2 через плавкую вставку начинает протекать ток ОЗЗ, который фиксируется амперметром. С течением определённого времени плавкая вставка перегорает и между контактами К и М возникает дуга. Расстояние между К и М составляет 8мм, что позволяет поддерживать устойчивое горение дуги. Осциллограф, подключенный к высоковольтному делителю напряжения, фиксирует значение напряжения на фазах А, В, С. Далее информация, зафиксированная цифровым осциллографом, вводится в компьютер и выводится на экран монитора. По указанной методике были выполнены измерения перенапряжений при дуговых ОЗЗ на разрезах "Бородинский" и "Березовский-1", на ОАО "АГК" и ОАО "АНПЗ".

Использование одновременно двух и более точек измерений позволит определить влияние конфигурации сети на перенапряжения при дуговых ОЗЗ.

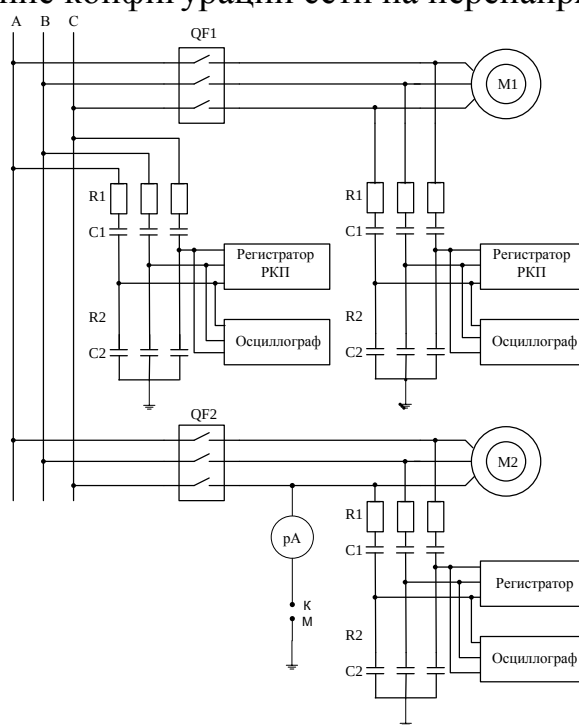


Рисунок 2.2 – Схема, с помощью которой производились исследования перенапряжений при дуговых ОЗЗ и КП в режиме ОЗЗ.

Известно, что существующие системы защиты от ОЗЗ за счет низкой селективности часто отключают неповрежденные присоединения, в то время как линия с ОЗЗ остается подключенной к секции шин подстанции [4, 12]. В этом случае, согласно принципу суперпозиции, может произойти наложение дуговых перенапряжений на КП. Для исследования этого режима была использова-

на методика измерения КП, возникающих при отключении электропотребителей в режиме ОЗЗ.

Схема измерений КП при отключении электропотребителей в режиме ОЗЗ аналогична схеме при измерениях перенапряжений в режиме ОЗЗ (рис.2.2).

Последовательность эксперимента состояла в следующем:

1. На второй линии создавалось искусственное ОЗЗ с перемежающейся дугой.
2. С помощью выключателя QF1 отключалась неповрежденная линия, тем самым имитировалась неселективная работа защиты от ОЗЗ и фиксировались перенапряжения, возникающие на зажимах двигателя М1, с помощью регистратора, одновременно снимались осциллограммы. Сигнал для регистратора и осциллографа подавался с высоковольтного делителя напряжений.
3. Для имитации селективной работы защит от ОЗЗ сначала выполняется пункт 1 данного эксперимента, а затем отключается выключатель QF2 и производится фиксация перенапряжений на зажимах двигателя М2 и М1.

2.3. Методические основы математической обработки экспериментальных данных

Математическая обработка экспериментальных данных производилась согласно источникам [18, 19, 45, 67] и по алгоритму, представленному на рис. 2.3. Использование указанного алгоритма обработки данных позволяет выявить влияние на величину КП типа и мощности электродвигателя в производственных условиях, типа коммутационной аппаратуры, длины и сечения кабельной линии.

Для получения достоверной информации по влиянию тех или иных факторов на исследуемую величину необходимо спланировать гарантированный объем выборки, т.е. определить количество измерений на определенном объекте при определенных условиях.

Согласно [45] гарантированный объем выборки определяется по заданной точности δ и односторонней доверительной вероятности α . Значение односторонней доверительной вероятности α следует выбирать не менее 0,8, а значение предельной относительности ошибки δ не выше 0,25. Наиболее целесообразны значения $\alpha = 0,8 \div 0,95$, $\delta = 0,1 \div 0,25$.

Если $\alpha = 0,8$, а $\delta = 0,25$, то минимальный объем выборки $M_{\min} = 26$; при $\alpha = 0,8$, а $\delta = 0,15$ минимальный объем выборки необходимо увеличить до $M_{\min} = 42$. Таким образом, для получения достоверной информации количество измерений на одном объекте должно находиться в пределах от 26 до 42, при этом значение ошибки не будут превышать 25 % [45].



Рисунок 2.3 – Алгоритм обработки статистических данных.

Математическое ожидание (эмпирическое среднее) каждой выборки производится по следующему выражению:

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

где n_i - количество измерений определенной выборки;

Z_{ij} – амплитуда измеренного коммутационного импульса.

Дисперсия рассчитывается по следующей формуле:

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

Среднеквадратичное отклонение определяется по выражению:

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

Коэффициент вариации определяется по выражению:

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

Проверка выборок на однородность позволит выявить, какие факторы влияют, а какие не оказывают существенного влияния на КП, что позволит в дальнейшем их не учитывать.

Проверка выборок на однородность производится по следующим трем критериям: сравнению средних значений, дисперсии и по критерию χ^2 Пирсона.

Для сравнения средних использовался критерий t_x , который рассчитывается по формуле:

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

где, $\bar{X}_i$ - среднее значение первой выборки;

$\bar{X}_j$ - среднее значение второй выборки;

n_i - количество данных первой выборки;

n_j - количество данных второй выборки;

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

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

где, S_i – среднее квадратичное отклонение первой выборки;

S_j – среднее квадратичное отклонение второй выборки.

Критерий χ^2 рассчитывается по специальной программе, изложенной в работе [43]. Вероятность Пирсона $\{\chi^2\}$ указывает на то, с какой достоверностью данные выборки можно объединять.

Выборки объединяются в том случае, если $t_s \leq 3$, $t_x \leq 3$, а $P\{\chi^2\} > 0,05$, в противном случае выборки объединять нельзя. Объединение выборок указывает на то, что данный фактор не оказывает существенного влияния на КП. Если выборки не объединяются, то данный фактор, по которому происходило объединение выборок, серьезно влияет на величину и характер КП.

Проверка на экстремальность необходима для того, чтобы выяснить – принадлежит или не принадлежит максимальное значение исследуемой величины к генеральной совокупности исходных данных, то есть является ли максимальное значение КП закономерной величиной или неточностью, допущенной при измерении данной величины.

Проверка выборки на экстремальность определялась с помощью критерия ξ_m . Для коэффициента вариации $V > 0,3$:

$$\xi_m = \sqrt{k} \left(\frac{k \cdot n - 1}{k \cdot n} \cdot \frac{Z_{\max}}{\bar{X}} - 1 \right), \quad (2.7)$$

где:
$$k = \frac{1}{V^2}$$

Для коэффициента вариации $V \leq 0,3$:

$$\xi_m = \frac{Z_{\max} - \bar{X}}{S}, \quad (2.8)$$

По рассчитанному значению k и объему выборки n [45] определим критическую границу β_n^+ ; максимальное значение $Z_{\max}$ не принадлежит к генеральной совокупности и отбрасывается с доверительной вероятностью $\alpha = 0,9$, если $\xi_n > \beta_n^+$ и данное значение можно не учитывать. В противном случае, если $\xi_n < \beta_n^+$ максимальное значение исследуемой величины принадлежит генеральной со-

вокупности, то есть имеет закономерный характер. Его необходимо учесть при разработке рекомендаций.

2.4 Результаты измерения коммутационных перенапряжений и результаты обработки статистических данных при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей

Исследования КП проводились на синхронных электродвигателях мощностью от 315 кВт до 10000 кВт и на асинхронных электродвигателях мощностью от 180 кВт до 6000 кВт. Автором были выполнены измерения КП на электродвигателях мощностью до 2500 кВт включительно. Измерения на электродвигателях более высокой мощности были выполнены сотрудниками предприятия ООО «Рутас» и кафедры «ЭГМП» ГУЦМиЗ. Длина кабельной линии между выключателем и электродвигателем изменялась от 15 до 560 м. В роли коммутационных аппаратов использовались вакуумные и масляные выключатели.

Коммутация электродвигателей производилась вакуумными выключателями, изготовленными Минусинским электроаппаратным заводом и фирмой «Таврида - Электрик», а в качестве масляных выключателей использовались выключатели типа ВМП и ВМЭ. Общий объем экспериментальных измерений составил около шести тысяч. Величина КП оценивалась с помощью коэффициента кратности:

$$K = \frac{U}{U_H}, \quad (2.9)$$

где: U – напряжение на зажимах электродвигателя;

U_H – номинальное напряжение сети.

В качестве примера, приведенного в приложении 1, рассмотрены КП, возникающие при коммутации асинхронных и синхронных электродвигателей мощностью 500, 1250 и 2500 кВт.

В табл. (П1.1-П1.13) и (П1.14-П1.23), соответственно, приведены результаты измерений КП, а также указаны средние значения, дисперсия, среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации для синхронных и асинхронных

электродвигателей в зависимости от мощности электродвигателей, типа выключателя, сечения и длины кабельной линии и характера производства. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что основными факторами, влияющими на величину и характер КП, являются: тип и мощность электродвигателя, тип коммутационного аппарата. Такие факторы, как модель однотипных выключателей, производственные условия и технологические процессы практически не оказывают влияния на величину и характер КП. С увеличением длины и сечения кабельной линии между выключателем и электродвигателем КП на зажимах электродвигателя снижаются, если тип выключателя масляный. В случае использования вакуумного выключателя для коммутации электродвигателей длина и сечение кабельной линии не влияют на величину и характер перенапряжений, возникающих на зажимах электродвигателя. С ростом мощности электродвигателей величина КП снижается. На рис.2.4 показано изменение кратности КП ($K_{\max}$) в зависимости от типа и мощности электродвигателя и типа выключателя. $K_{\max}$ были рассчитаны при условии, что длина кабельной линии между выключателем и электродвигателем была менее 50 м.

Учитывая, что на смену масляным выключателям приходят вакуумные выключатели, которые при коммутации электродвигателей создают условия для возникновения наиболее высоких КП, возникает необходимость в разработке методики по оценке КП в системах электроснабжения высоковольтных электродвигателей.

Методика должна быть простой и универсальной, не требующей сложных математических расчетов при определении кратности КП как на зажимах электродвигателя, так и на зажимах выключателя.

Создание подобной методики позволит не только оценить величину КП, но и обосновать необходимость средств защиты от КП.

Выполненные экспериментальные исследования и статистическая обработка данных позволит разработать подобную методику.

2.5. Инженерная методика оценки коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10кВ при использовании масляных или вакуумных выключателей для коммутации электродвигателей

Для разработки инженерной методики оценки КП необходимо:

- оценить максимальное значение КП в системе электроснабжения электродвигателей;
- уточнить влияние типа, длины и сечения кабельной линии на величину КП;
- обосновать допустимые безопасные значения КП;
- обосновать необходимость использования средств защиты от КП.

Проверка экспериментальных данных на экстремальность показала, что максимальные значения КП имеют закономерный характер и зависят от типа и мощности электродвигателя, а также от типа выключателя. На рис. 2.4 показаны кривые кратности КП ($K_{\max}$) в зависимости от типа, мощности электродвигателя, а также от типа выключателя.

Измерения КП на зажимах электродвигателя (точка К1) и на зажимах выключателя (точка К2), т.е. в начале и конце кабельной линии, производились согласно схеме, представленной на рис. 2.1, как при включении, так и при отключении электродвигателя.

В качестве примера в приложении 2 приведены результаты измерений, которые представлены в табл. П2.1, и П2.2 соответственно для асинхронных и синхронных электродвигателей.

Понижающий коэффициент кратности КП обусловлен емкостью кабельной линии, для точек К1 и К2 рассчитывался по формулам:

$$\text{для точки К2} \quad K_{m.2} = \frac{K_{\max}}{K_2} \quad (2.10)$$

$$\text{для точки К1} \quad K_{2.1} = \frac{K_2}{K_1} \quad ,$$

где: $K_{\max}$ – максимальная кратность КП;

K_2 – кратность КП в точке К2 в момент измерения.

K_1 – кратность КП в точке К1 в момент измерения.

Значение коэффициента $K_{\max}$ принималось согласно кривым, представленным на рис. 2.4.

Сопоставляя данные табл. с П2.1 с данными табл. П2.2, видно, что среднее значение понижающего коэффициента k_n при отключении электродвигателей не зависит от типа кабельной линии, типа и мощности электродвигателя, а в основном зависит от длины и сечения кабельной линии.

Это связано с тем, что изоляция силовых кабелей напряжением 6-10 кВ представляет из себя неоднородный диэлектрик. Емкость кабеля как неоднородного диэлектрика зависит от частоты ω и выражается формулой [4, 69]:

$$C(\omega) = C_{\Gamma} + \frac{\Delta C}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)}, \quad (2.11)$$

где: C_{Γ} – геометрическая емкость диэлектрика;

ΔC – добавленная емкость диэлектрика;

T – постоянная времени.

Геометрическая емкость диэлектрика (C_{Γ}) – это емкость неоднородного диэлектрика при бесконечно высокой частоте, когда процессы проводимости не влияют на распределение напряжения по слоям диэлектрика. Установлено [69, 70], что геометрическая емкость диэлектрика кабельной линии напряжением 6-10 кВ в основном зависит от длины и сечения кабельной линии, т.е. является величиной постоянной для кабельных линий, разных по типу, но имеющих одну длину и сечение.

Добавочная емкость диэлектрика (ΔC) и постоянная времени (T) кабельной линии зависят от параметров отдельных слоев изоляции.

Для промышленной частоты $f = 50$ Гц емкость кабеля определяется по выражению (2.11) и зависит не только от длины и сечения кабеля, но и от его типа (конструкции). При увеличении частоты в сто раз и выше, т.е. при частоте ком-

мутационного импульса 5000 Гц и выше, емкость кабеля $C(\omega) \approx C_T$ и становится независимой от типа кабеля [68].

На рис. 2.5 показаны графики изменения понижающего коэффициента k_n в зависимости от сечения и длины кабельной линии.

Для определенного сечения и определенной длины кабельной линии соблюдается следующая закономерность. Если электродвигатель коммутируется масляным выключателем,

$$K_{2.1} \approx K_{m.2} \approx k_n \quad (2.12)$$

т.к. разброс значений коэффициентов $K_{2.1}$ и $K_{m.2}$ по отношению к k_n не превышает 4 %.

Если электродвигатель коммутируется вакуумным выключателем, то соблюдается соотношение:

$$K_{2.1} \approx k_n \quad (2.13)$$

В этом случае значение коэффициента $K_{2.1}$ по отношению к k_n не превышает 3,5 %.

Значения коэффициентов $K_{m.2}$ при использовании вакуумных выключателей намного отличается от среднего значения понижающего коэффициента k_n . Это связано с тем, что при отключении электродвигателя вакуумным выключателем КП могут достигать максимальных значений в том случае, если “срез тока” происходит на восходящей части полуволны тока нагрузки. В этом случае разброс значений не превышает 20 %. Если “срез тока” происходит на нисходящей части полуволны тока нагрузки, то значения КП меньше максимального значения в 1,2÷2,5 раза [42].

Экспериментальные данные табл. П2.1 и П2.2 полностью подтверждают теоретические исследования автора [42], т.к. при “срезе тока” на восходящей полуволне тока нагрузки коэффициент $K_{m.2}$ изменяется в диапазоне 1÷1,19, а при “срезе тока” на нисходящей полуволне тока нагрузки коэффициент $K_{m.2}$ изменяется от 1,21 до 2,46.

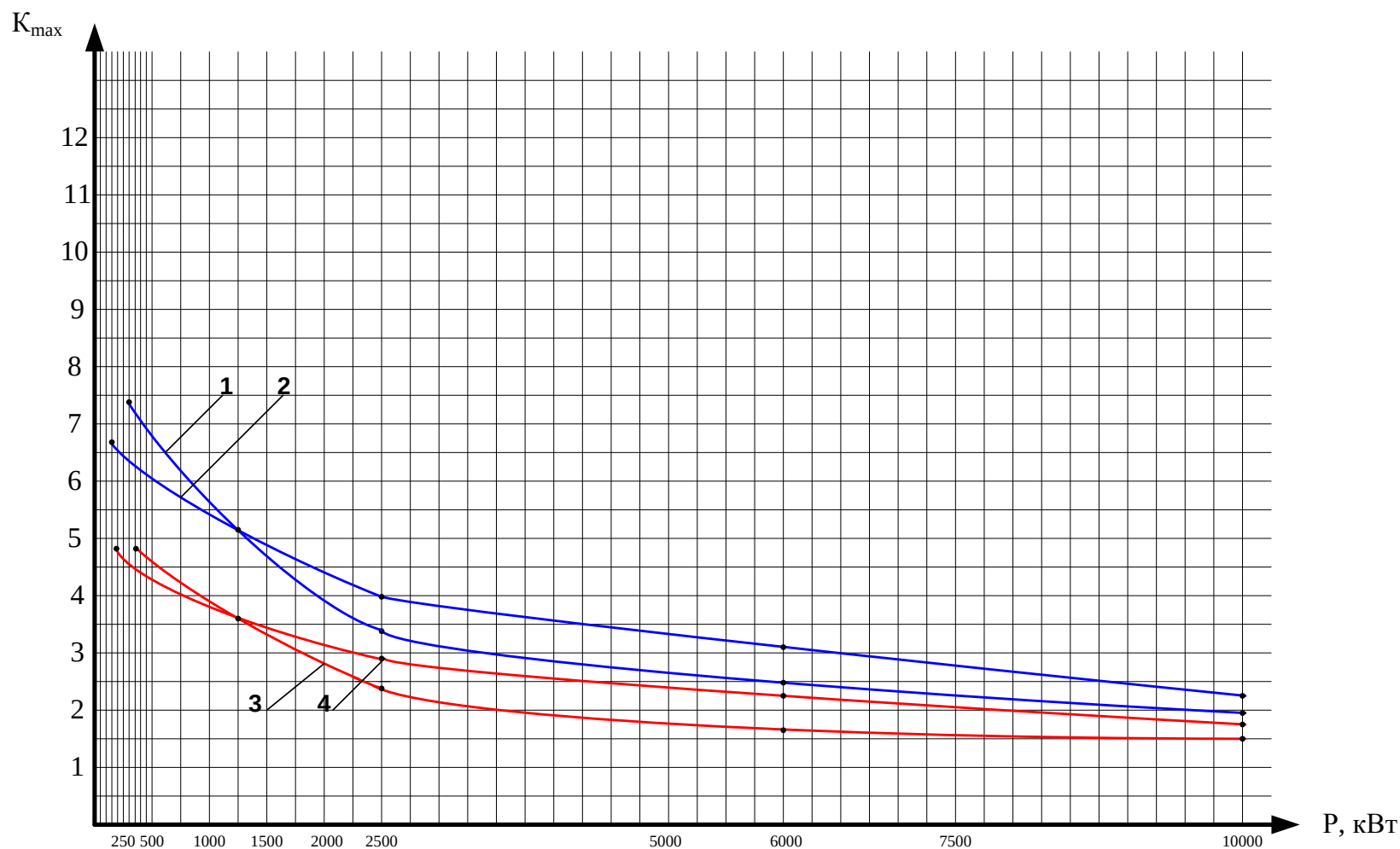


Рисунок 2.4 – Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений $K_{\max}$ для электродвигателей в зависимости от мощности электродвигателя и типа выключателя.

1 – синхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 2 – асинхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 3 – синхронный электродвигатель с масляным выключателем; 4 – асинхронный электродвигатель с масляным выключателем.

В качестве примера на рис. 2.6 и рис. 2.7 приведены осциллограммы переходного процесса при отключении синхронных электродвигателей мощностью 2500 кВт и 1250 кВт вакуумным выключателем.

В первом случае (рис. 2.6) “срез тока” в фазе “А” произошел на восходящей полуволне, вследствие этого перенапряжение на фазе “А” достигло максимального значения с кратностью 3,5.

Во втором случае (рис. 2.7) максимальное перенапряжение возникает в фазе “В” с кратностью 2,4, т.к. “срез тока” произошел на нисходящей полуволне. Получаем кратность перенапряжений ниже максимально возможной для данного типа электродвигателя в 2,16 раза.

Следует отметить, что во время проведения экспериментов вышли из строя два асинхронных и один синхронный электродвигатель за счет пробоя изоляции статорной обмотки. Кроме этого, в двух случаях наблюдался пробой изоляции разделок кабелей тех концов, которые подключались к зажимам синхронного двигателя.

Один из асинхронных электродвигателей был абсолютно новый, а второй находился в эксплуатации 5 лет и 4 месяца. Синхронный электродвигатель находился в эксплуатации 2 года и 8 месяцев.

Изоляция статорной обмотки нового асинхронного электродвигателя выдержала 24 коммутационных импульса, а на 25 импульсе ($K_2=4,75$) наступил электрический пробой изоляции статорной обмотки, который привел к ОЗЗ. Изоляция асинхронного электродвигателя, находящегося в эксплуатации до начала проведения эксперимента более 5 лет, выдержала 10 коммутационных импульсов, а в 11 импульсе ($K_2=2,9$) наступил электрический пробой изоляции статорной обмотки, который сопровождался ОЗЗ, т.к. сработала защита от ОЗЗ.

Изоляция синхронного электродвигателя оказалась гораздо устойчивее к КП, т.к. выдержала 32 коммутационных импульса, а на 33 импульсе наступил электрический пробой ($K_2=6,72$).

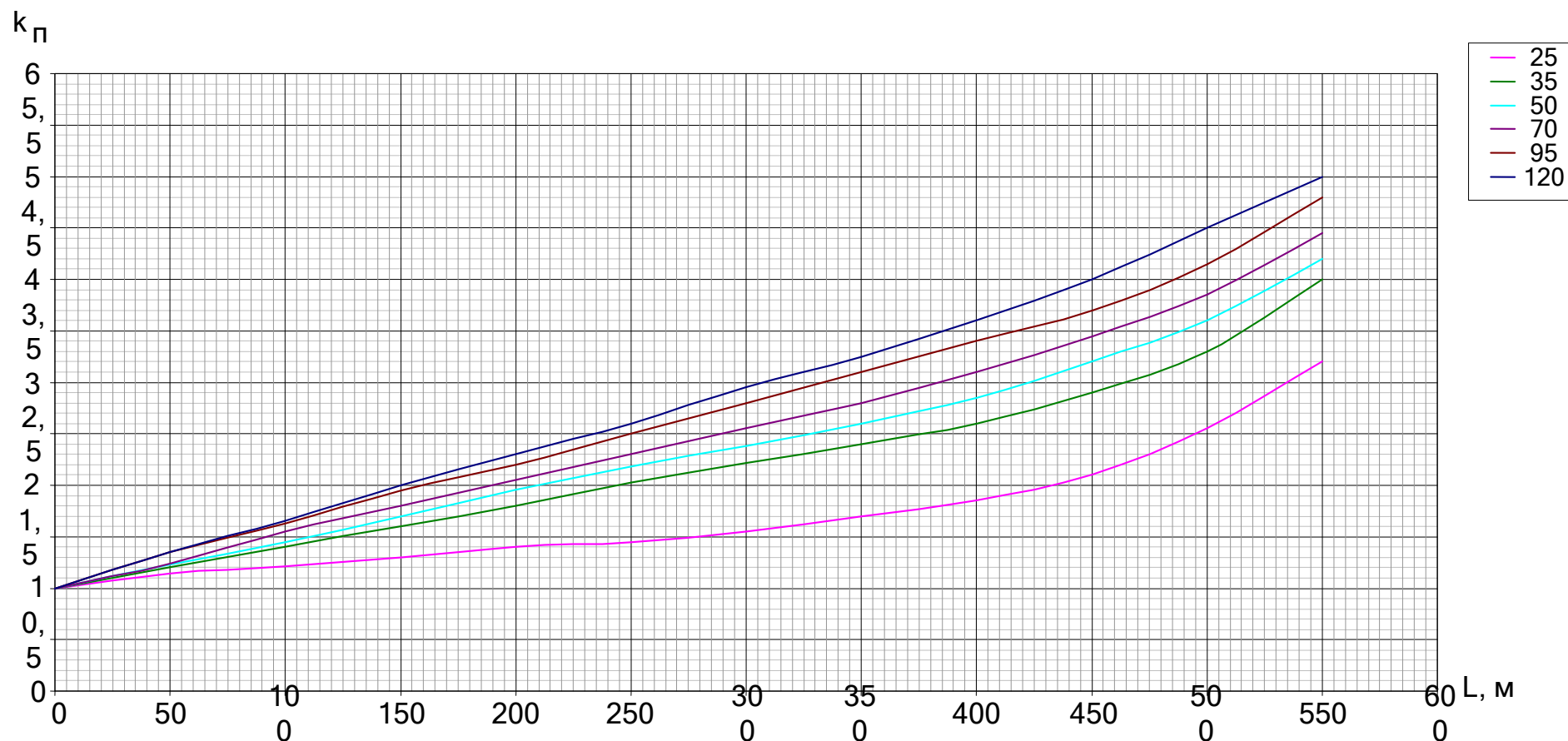


Рисунок 2.5 - Изменение понижающего коэффициента коммутационных перенапряжений в зависимости от длины и сечения кабельной линии

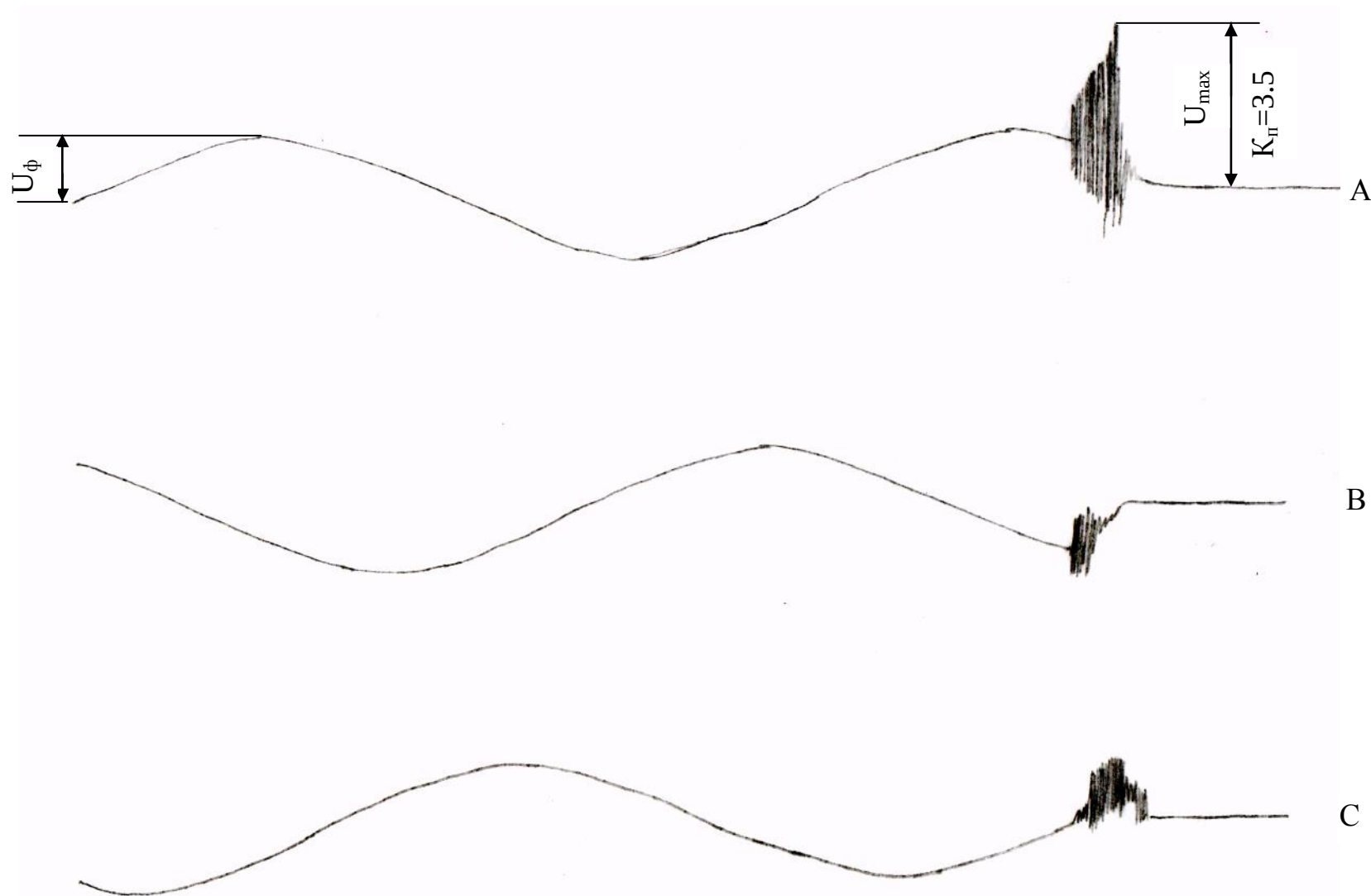


Рисунок 2.6 – Осциллограмма при отключении синхронного двигателя $P = 2500$ кВт СДН-2-18-64-12 вакуумным выключателем ВВТЭ-10-10/630 2У, $K_{\max} = 3,5$, $f = 80$ кГц.

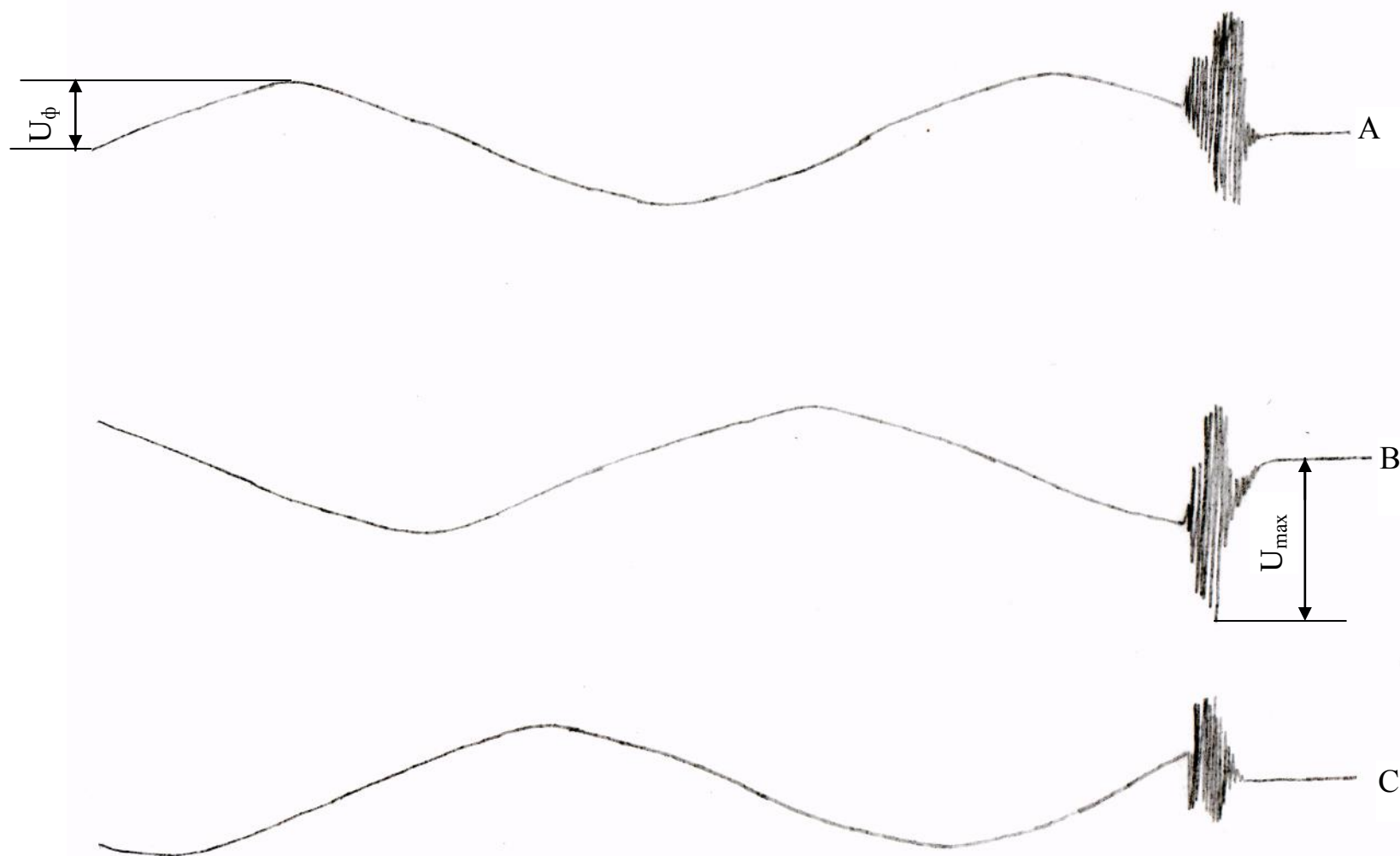


Рисунок 2.7 – Осциллограмма при отключении синхронного двигателя $P = 1250\text{кВт}$ СТД-1250-2УХЛ4 вакуумным выключателем ВВТЭ-10-10/630 2у, $K_{max} = 2,4$, $f = 60\text{ кГц}$.

Пробой разделок кабелей наступал в среднем через 14 коммутационных импульсов. Первый пробой разделок кабеля (тип кабеля СБГ (3х120) , $l = 650$ м) произошел, когда кратность перенапряжений составила 7,4. Второй пробой разделки кабеля (тип кабеля КШВГ (3х120+1х35) , $l = 400$ м) произошел, когда кратность перенапряжения составила 7,05.

Данные исследования показали, что допустимая кратность КП сильно зависит от срока эксплуатации электродвигателей и кабельных линий.

Профессор Гончаров А.Ф. в своих работах [21, 22, 23, 74, 75] доказал, что для электродвигателей, находящихся в эксплуатации до 5 лет, допустимая кратность КП не должна превышать 2,4, а при эксплуатации свыше 5 лет – 1,8. Для кабелей напряжением 6 – 10 кВ допустимый коэффициент кратности равен 4,3, если срок эксплуатации не превышает 5 лет, и 2,8 – при эксплуатации свыше 5 лет.

Учитывая, что срок эксплуатации кабельных линий и электродвигателей на промышленных предприятиях значительно превышает пятилетний срок, то допустимые кратности КП для кабельных линий и электродвигателей соответственно будут равны: 2,8 и 1,8. Таким образом, необходимо использовать средства защиты от КП, если реальные уровни перенапряжений в электрических сетях 6-10 кВ промышленных предприятий будут превышать допустимые значения. В противном случае КП могут послужить причиной пробоя изоляции электродвигателей и кабельных линий.

Принимая во внимание вышеизложенный материал, для расчета КП в системе электроснабжения электродвигателей необходимо знать следующие исходные данные: тип выключателя, тип и мощность электродвигателя, длину и сечение кабельной линии между выключателем и электродвигателем.

Расчет КП необходимо производить в следующей последовательности:

1. При отключении электродвигателя от сети масляным выключателем кратность КП на зажимах электродвигателя (точка K_2) и на зажимах выключателя (точка K_1) определяется по формулам:

$$K_2 = \frac{K_{\max}}{k_{\Pi}}; \quad K_1 = \frac{K_2}{k_{\Pi}}, \quad (2.14)$$

где $K_{\max}$ – максимальная кратность перенапряжений, определенная по графику (рис. 2.4) с учетом типа, мощности электродвигателя и типа выключателя;

k_{Π} – понижающий коэффициент, величина которого определяется по графику (рис. 2.5) в зависимости от сечения и длины кабельной линии.

2. При отключении электродвигателя от сети вакуумным выключателем кратность КП на зажимах электродвигателя (точка K_2) и на зажимах выключателя (точка K_1) определяется по следующим формулам:

$$K_2 = K_{\max}; \quad K_1 = \frac{K_2}{k_{\Pi}} \quad (2.15)$$

При подключении электродвигателя к сети кратность КП в точке K_2 и K_1 определяется по формулам:

$$K_2 = \frac{2,2}{6,5 - k_{\Pi}}, \quad K_1 = \frac{K_2}{k_{\Pi}} \quad (2.16)$$

Если значение коэффициентов K_2 и $K_1 < 1$, то в расчетах коэффициенты K_2 и K_1 принимают равным 1.

3. Производим обоснование необходимости защиты от КП сначала для точки K_2 , если $K_2 > K_{\text{доп}}$, то защита необходима. Выбираем защиту от КП. Далее делаем пересчет кратности КП в точке K_1 с учетом ограничения перенапряжений средствами защиты по формуле:

$$K_1 = \frac{K_{\text{огр}}}{k_{\Pi}}, \quad (2.17)$$

где: $K_{\text{огр}}$ – уровень ограничения КП средствами защиты.

Если соблюдается неравенство $K_1 > K_{\text{доп}}$, то выбираем защиту от КП для точки K_1 .

Разработанная методика была использована для расчета КП в системах электроснабжения напряжением 6 – 10 кВ таких предприятий, как ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”, ОАО “Ачинский нефтеперерабатывающий завод”, ОАО “Красноярский алюминиевый завод”, ОАО “Братский алюминиевый завод”, ОАО “Саяногорский алюминиевый завод”, Федеральное государствен-

ное унитарное предприятие “Горно–химический комбинат”, ООО “Красноярский цемент”, “Надежденский металлургический завод” ЗАО “Норильский никель” и Нюрбинский ГОК ОАО “Алроса”.

Отклонение расчетных данных от данных, полученных при измерении КП не превышало 7,5 %, что указывает на высокую достоверность расчетных значений КП.

2.6 Результаты измерений перенапряжений в режиме дугового однофазного замыкания на землю

Эксперименты проводились в сетях 6 – 10 кВ с изолированной, компенсированной и частично заземленной нейтралью. Сети напряжением 6–10 кВ были разбиты на 3 группы. К первой группе относились сети с емкостным током замыкания на землю до 5 А. К таким сетям относятся слаборазветвленные сети горных предприятий, в частности угольных разрезов, и локальные сети 6 кВ промышленных предприятий с двигательной нагрузкой.

Вторая группа включала сети, у которых емкостной ток замыкания на землю находился в диапазоне от 5 до 50 А. К таким сетям относятся распределительные сети 6 – 10 кВ промышленных предприятий, у которых общая протяженность кабельных линий на один силовой трансформатор главной понизительной подстанции (ГПП) превышает 50 км.

Например, к таким сетям относятся распределительные сети ОАО “Ачинский нефтеперерабатывающий завод”, ОАО “Красноярский цемент” и ФГУП “Горно–химический комбинат”.

К третьей группе относятся сети с емкостным током замыкания на землю более 50 А. К таким сетям можно отнести распределительные сети 6–10 кВ промышленных предприятий, у которых на один силовой трансформатор ГПП или на генератор собственной ТЭЦ приходится более 50 км общей протяженности кабельных линий. В качестве сетей третьей

группы были использованы распределительные сети 10 кВ ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”.

Измерения перенапряжений производились одновременно в трех точках распределительной сети согласно методике изложенной в п 2.2. Первая точка измерений находилась в непосредственной близости от места искусственного ОЗЗ. Второй точкой измерения служила секция шин подстанции. В роли третьей точки измерения выступала самая удаленная точка от места искусственного ОЗЗ. Результаты измерений приведены в табл. 2.1.

В сетях с изолированной нейтралью при пробое изоляции одной из фаз сети на землю возможны три режима горения заземляющей дуги, которые сопровождаются перенапряжениями. При весьма большом токе однофазного замыкания ($I_c > 50 \text{ А}$) дуга горит устойчиво, падение напряжения на дуге сравнительно мало, т.к., вследствие большой остаточной проводимости при переходе тока через нуль, не успевает восстановиться электрическая прочность изоляции. Данный режим близок к глухому замыканию на землю, поэтому коэффициент кратности перенапряжений находится в пределе $1,9 \leq K_{\text{ОЗЗ}} \leq 2,1$.

При достаточно малом токе ($I_c < 5 \text{ А}$) дуга горит неустойчиво, после одного или нескольких (не более 3 – 4) повторных зажигания и погасаний дуга гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность, и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы. Максимальные значения коэффициента кратности перенапряжений находятся в пределах $2,0 \leq K_{\text{ОЗЗ}} \leq 2,1$.

При промежуточном значении тока ($5 \text{ А} \leq I_c \leq 50 \text{ А}$) наблюдаются многократные повторные погасания и зажигания дуги, сопровождающиеся колебательными перезарядами емкостей сети по отношению к земле, что приводит к значительным перенапряжениям.

Таблица 2.1 – Результаты измерений перенапряжений в режиме ОЗЗ, в зависимости от режима нейтрали сети.

Режим нейтрали сети		Кратность перенапряжения, $K_{OЗЗ} = \frac{U_{MAX}}{U_H}$		
		$I_c < 5A$	$5A \leq I_c \leq 50A$	$I_c > 50A$
Изолированная		2,0÷2,1	2,2÷3,0	1,9÷2,1
Компенсированная	$\frac{I_c - I_L}{I_L} \leq 0.05 $	-	1,6÷1,8	1,6÷1,8
	$\frac{I_c - I_L}{I_L} > 0.05 $	-	2,1÷3,3	2,1÷3,3
Заземлённая через резистор	$\frac{I_a}{I_c} = 0,1$	2,0÷2,1	2,2÷2,8	1,9÷2,1
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,2$	1,9÷2,05	1,9÷2,05	1,9÷2,05
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,3$	1,8÷1,9	1,9÷2,05	1,8÷1,9
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,4$	1,7÷1,8	1,8÷1,9	1,8÷1,9
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,5$	1,7	1,7÷1,8	1,7÷1,8
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,6$	1,7	1,7	1,7
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,8$	1,7	1,7	1,7
	$\frac{I_a}{I_c} = 1$	1,7	1,7	1,7
	$\frac{I_a}{I_c} = 1,2$	1,65	1,65	1,65

Максимальное значение коэффициента кратности перенапряжений находится в пределах $2,2 \leq K_{OЗЗ} \leq 3,0$.

В сетях с компенсируемой нейтралью можно добиться значительно-го снижения кратности перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ ($1,6 \leq K_{\text{ОЗЗ}} \leq 1,8$), если разбалансировка реактора не будет превышать 5 %. В противном случае начинает существенно возрастать кратность перенапряжений. Если разбалансировка реактора будет 10 %, то кратность перенапряжений увеличивается до 2,1. При разбалансировке 15 % и 25 % кратность перенапряжений соответственно возрастает до 2,6 и 3,3, т.е. сети в режиме перекомпенсации (недокомпенсации), с точки зрения перенапряжений, практически не отличаются от сетей с изолированной нейтралью.

В качестве примера на рис. 2.8 и 2.9 приведены осциллограммы режима дугового ОЗЗ в распределительной сети 6кВ ОАО “Ачинского нефтеперерабатывающего завода”. В первом случае (рис. 2.8) разбалансировка реактора ЗРОМ-175 составляла 4 %, при этом кратность перенапряжений составила 1,7, а время восстановления напряжения на отдельных фазах сети после отключения линии с ОЗЗ составило 0,26 с.

Во втором случае (рис. 2.9) разбалансировка реактора ЗРОМ-175 составила 22 %. Кратность перенапряжения возросла и достигла значения 2,7, а время восстановления напряжения после отключения линии с ОЗЗ составило 0,32 с.

В случае частичного заземления нейтрали сети через резистор ограничение кратности перенапряжений зависит от величины добавочного активного тока I_a , наложенного на емкостной ток замыкания на землю I_c .

Эксперимент показывает, что снижение перенапряжений до значения $1,7U_n$ можно добиться, если $I_a/I_c \geq 0,6$. При условиях $I_a/I_c \geq 0,4$ кратность перенапряжений не будет превышать значение 1,9, а если отношение $I_a/I_c \geq 0,2$, то кратность перенапряжения не превысит значения 2,0.

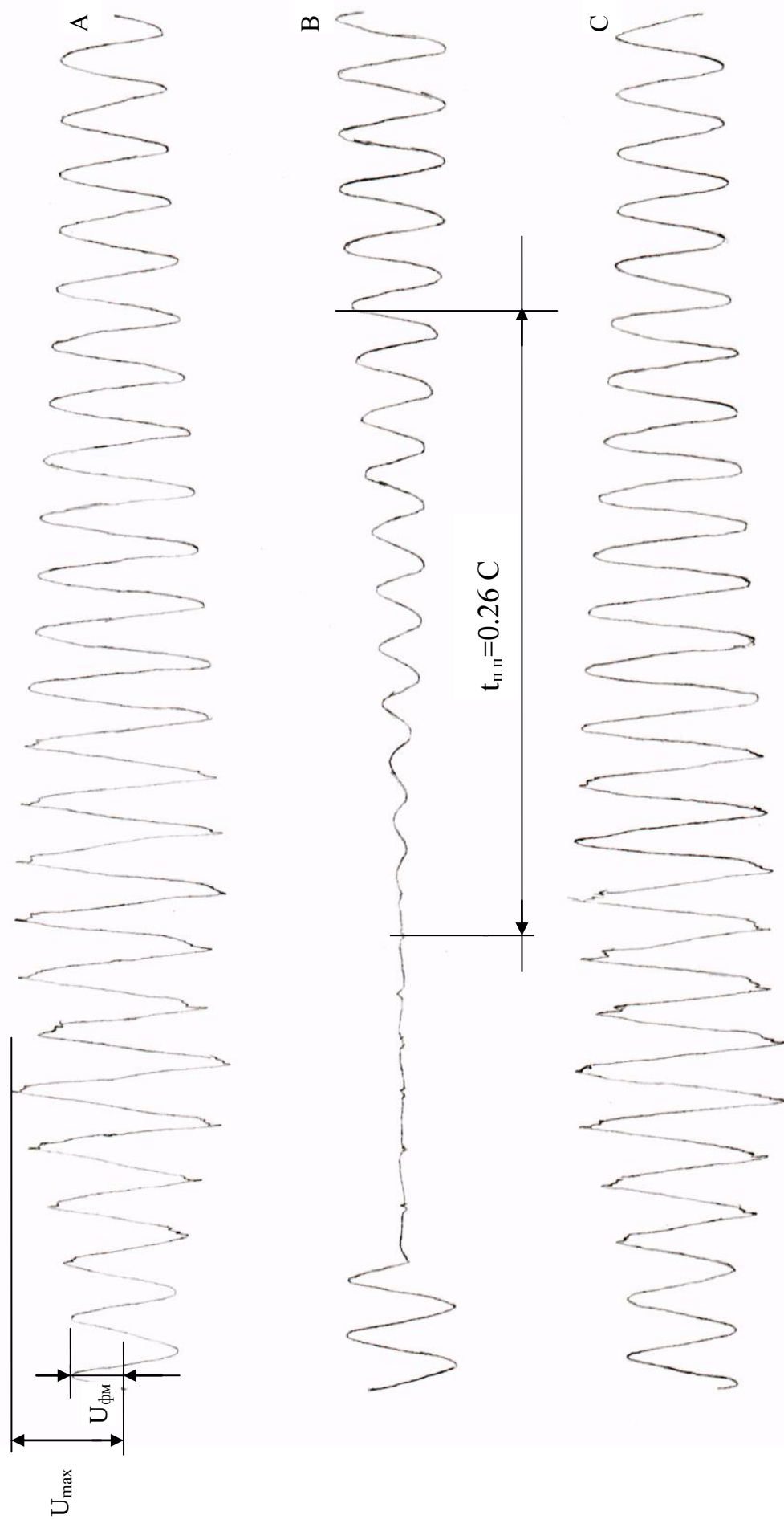


Рисунок 2.8 – Переходной процесс при дуговом ОЗЗ в распределительной сети 6 кВ
ОАО “АНПЗ”. $I_c = 36 \text{ A}$, $I_r = 37,5 \text{ A}$, $K_{\text{ОЗЗ}} = 1,7$.

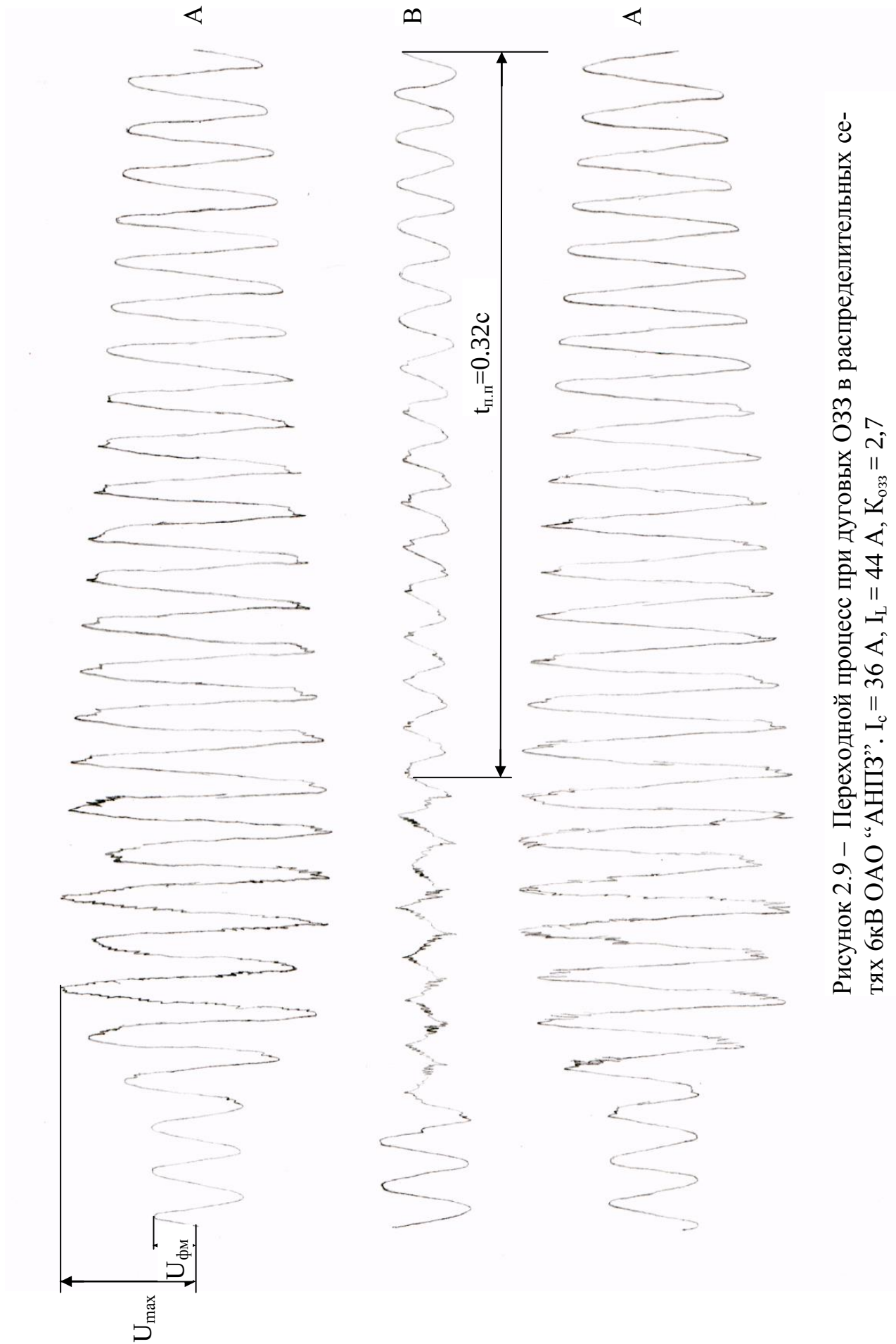


Рисунок 2.9 – Переходной процесс при дуговых ОЗЗ в распределительных сетях 6кВ ОАО “АНПЗ”. $I_c = 36$ А, $I_L = 44$ А, $K_{033} = 2,7$

В приложении 3 в качестве примера на рис. ПЗ.1, ПЗ.2, ПЗ.3 и ПЗ.4 приведены осциллограммы режима ОЗЗ в распределительной сети 6кВ разрез “Березовский-1”. На рис ПЗ.1 приведены осциллограммы переходных процессов при дуговом ОЗЗ, кратность перенапряжений составила 2,4, при этом емкостной ток ОЗЗ равен 12А. На рис ПЗ.2, ПЗ.3, ПЗ.4 показаны осциллограммы для сети 6 кВ, нейтраль которой заземляется через резистор величиной 1400, 450 и 300 Ом, что позволило наложить на ток ОЗЗ добавочный активный ток величиной 2,5, 7,5 и 12 А соответственно. Кратность перенапряжений для соотношений I_a/I_c , равных 0,21, 0,625 и 1 соответственно была равна 1,9, 1,8 и 1,7.

Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями авторов [65] , если ток ОЗЗ меньше 5А. Несколько отличаются настоящие результаты от результатов авторов [49], т.к добиться снижения кратности перенапряжений до уровня $1,7 U_n$ возможно при выполнении условия $I_a/I_c \geq 0,6$, а не при условии $I_a/I_c \geq 0,4$. При условии $I_a/I_c \geq 0,4$ кратность перенапряжения достигает значения равного $1,8U_n$.

Хорошо согласуются полученные результаты с результатами зарубежных исследований [46, 76, 77] при выполнении условия $I_a/I_c \geq 0,2$. Отклонение полученных результатов от результатов вышеприведенных авторов не превышает 4,5 %.

Одновременное измерение перенапряжений в нескольких точках распределительной сети показало, что для сетей с током ОЗЗ до 5 А и более 50 А, перенапряжения в разных точках сети имеют практически одно и то же значение, т.к. разница значений ≈ 8 %.

Однако в сетях с током ОЗЗ, находящимся в диапазоне от 5 до 50 А, перенапряжения в различных точках сети имеют различные значения. Разница значений при определенных условиях достигала 25 %.

Наибольшая кратность перенапряжений получена в точке ОЗЗ и в местах сосредоточения больших индуктивных сопротивлений: как правило, на зажимах электродвигателей мощностью до 500 кВт. При определенной

длине кабельной линии между точкой ОЗЗ и электродвигателем перенапряжения на зажимах электродвигателя превышают напряжения в точке ОЗЗ в 1,25 раза, т.е. возникает резонанс на зажимах электродвигателя.

Данное явление хорошо объяснено исследователями [25] на базе физической модели распределительной сети.

Авторы доказывают, что разряд емкости поврежденной фазы через место пробоя в сочетании с подпиткой энергией, запасенной в статорной обмотке электродвигателя, создают резонансный контур, что и приводит к появлению высоких перенапряжений на зажимах электродвигателя. Резонансная длина кабельной линии определяется по формуле:

$$l_{\text{рез}} = \frac{3}{4} \cdot (\omega^2 L \cdot C_{\text{уд}})^{-1}, \quad (2.18)$$

где: $\omega = 2\pi \cdot f$ - угловая частота;

L – индуктивность обмотки электродвигателя, Гн;

$C_{\text{уд}}$ – удельная емкость кабеля, Ф/м.

Разряд емкости поврежденной фазы в подавляющем большинстве случаев происходит в форме высокочастотных колебаний с различными частотами и амплитудами на каждом присоединении.

Исследования, выполненные автором, показывают, что заземление нейтрали сети через резистор, величина которого позволяет выполнить условие:

$$I_a \geq 0,2 I_c \quad (2.19)$$

приводит к срыву резонанса на зажимах электродвигателя. Перенапряжения на зажимах электродвигателя не превышают значения $2U_n$ и не отличаются от перенапряжений в точке ОЗЗ.

Подобный эффект можно получить и при заземлении нейтрали сети через дугогасящий реактор при условии:

$$\frac{I_c - I_L}{I_c} \leq |0.05| \quad (2.20)$$

В результате исследований перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ измерялись не только перенапряжения, но и фиксировались броски емкостных токов ОЗЗ в первый момент времени возникновения ОЗЗ.

Достоверная информация о величине бросков емкостных токов ОЗЗ и о факторах, влияющих на величину бросков, позволит в дальнейшем (см. главу 4) повысить эффективность токовых систем защиты от ОЗЗ.

Величина бросков емкостных токов оценивалась с помощью коэффициента K_6 :

$$K_6 = \frac{i(0_+)}{I_c} \quad , \quad (2.21)$$

где: $i(0_+)$ – максимальное значение тока ОЗЗ в первый момент времени после возникновения ОЗЗ, А;

I_c - установившееся величина тока ОЗЗ, А.

В табл. 2.2 приведены значения коэффициента K_6 в зависимости от режима нейтрали сети 6-10 кВ.

Исследования показали, что в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью броски емкостных токов не зависят от величины тока ОЗЗ и превосходят установившееся значение в 4,5 раза.

В сетях с заземленной нейтралью через резистор влияние бросков емкостного тока зависит от величины добавочного активного тока. С увеличением добавочного активного тока кратность бросков снижается.

Так, при выполнении условия (2.19) броски емкостных токов ОЗЗ не превышают полуторакратных значений установившихся токов ОЗЗ.

Таким образом, заземление нейтрали сети 6-10 кВ через резистор, при котором выполняется условие (2.19), позволит ограничить перенапряжения до безопасных пределов ($K_{\text{озз}} \leq 2,0$), ликвидировать условие возникновения резонанса на зажимах электродвигателей и сократить броски емкостных токов ОЗЗ минимум в 3 раза.

Таблица 2.2 – Значения коэффициента K_6 в зависимости от режима нейтрали сети 6-10кВ.

Режим нейтрали сети		Значение коэффициента K_6		
		$I_c < 5A$	$5A \leq I_c \leq 50A$	$I_c > 50A$
Изолированная		4,2÷4,5	4,2÷4,5	4,2÷4,5
Компенсированная	$\frac{I_L}{I_c} \leq 1.05 $	-	4,1÷4,5	4,2÷4,5
	$\frac{I_L}{I_c} > 1.05 $	-	4,1÷4,5	4,2÷4,5
Заземлённая через резистор	$\frac{I_a}{I_c} = 0,1$	2,2÷2,6	2,2÷2,6	2,2÷2,6
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,2$	1,4÷1,5	1,4÷1,5	1,4÷1,5
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,3$	1,4	1,4	1,4
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,4$	1,4	1,4	1,4
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,5$	1,4	1,4	1,4
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,6$	1,3	1,3	1,3
	$\frac{I_a}{I_c} = 0,8$	1,3	1,3	1,3
	$\frac{I_a}{I_c} = 1$	1,2	1,2	1,2
	$\frac{I_a}{I_c} = 1,2$	1,2	1,2	1,2

2.7 Результаты измерений коммутационных перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю

Эксплуатация распределительных сетей 6-10 кВ промышленных предприятий в режиме ОЗЗ очень часто сопровождалась групповыми повреждениями электродвигателей и кабельных линий, если в качестве коммутационных аппаратов использовались вакуумные выключатели [40, 41]. Анализ повреждений показал, что пробой изоляции кабельных линий и статорных обмоток электродвигателей, как правило, происходит в той же фазе, на которой возникло ОЗЗ, т.к. групповые повреждения практически не сопровождалось двухфазными короткими замыканиями через землю.

Одной из причин групповых повреждений электродвигателей может служить резонанс, возникающий на зажимах электродвигателей при определенной длине кабельной линии до точки ОЗЗ [25]. Данное явление возникает достаточно редко, поэтому не может выступать в роли основной причины групповых повреждений.

Установлено, что групповые повреждения чаще всего возникают из-за неселективной работы защиты от ОЗЗ, т.е. когда защита отключает от секции шин подстанции неповрежденную линию или когда неповрежденная линия отключается оперативным персоналом в поисках места повреждения. На основании изложенного возникает вопрос: может быть, причиной групповых пробоев изоляции кабельных линий и электродвигателей являются КП, которые возникают в неповрежденных линиях в случае их отключения от секций шин подстанции в режиме ОЗЗ. Исследований в данном направлении практически не проводилось. Для ответа на поставленный вопрос были выполнены измерения КП в режиме ОЗЗ согласно методике, изложенной в пункте 2.2.

Измерения проводились в распределительных сетях 6 кВ с двигательной нагрузкой на ОАО “Ачинском глиноземном комбинате”, в сетях 6 кВ угольных разрезов “Бородинский”, “Березовский”, “Черемховский”.

Выполненные исследования подтвердили изложенное предположение. Действительно, КП достигают максимальных значений в неповрежденных линиях в случае их отключения от распределительной сети в режиме ОЗЗ только вакуумными выключателями. Максимальные КП строго возникают в той же фазе сети, на которой существовало ОЗЗ. Перенапряжения могут превышать напряжение сети в 8 – 9 раз. Подобный уровень перенапряжений превосходит все известные уровни КП при отключении электродвигателей с заторможенным ротором или в режиме холостого хода, так и перенапряжения в режиме дугового ОЗЗ.

На неповрежденных фазах коммутационные перенапряжения по величине оказались ниже в $1,3 \div 1,6$ раза КП, которые возникают при отключении электродвигателей в безаварийном режиме.

При отключении линии с ОЗЗ вакуумными выключателями в распределительной сети максимальные перенапряжения возникают на неповрежденных фазах. Величина перенапряжений так же в $1,3 \div 1,6$ раза ниже КП, возникающих при отключении электродвигателей в безаварийном режиме. На поврежденной фазе кратность перенапряжений не превышала единицы.

Для иллюстрации вышеизложенного материала в приложении 4 на рис.П4.1 и П4.2 приведены осциллограммы КП при отключении синхронного электродвигателя СТД-1600-2УХЛ4 вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-20/1000У2 в режиме ОЗЗ при селективной и неселективной работе защиты от ОЗЗ. Учитывая, что максимальные КП ($K_{\pi}=8\div9$) возникали практически в каждом третьем отключении неповрежденной линии с двигательной нагрузкой, то число опытов было ограничено до 5 – 6 отключений.

В случае отключения неповрежденной линии и линии с ОЗЗ от распределительной сети масляным выключателем, величина и характер КП на неповрежденных фазах не отличаются от КП, которые возникают при отключении линии в безаварийном режиме. Кратность КП в поврежденной фазе не превышала единицы как при отключении неповрежденной линии, так и линии с ОЗЗ.

Таким образом, КП, возникающие в неповрежденных линиях с двигательной нагрузкой при отключении их от распределительной сети 6 – 10 кВ вакуумными выключателями могут быть основной причиной групповых повреждений в режиме ОЗЗ.

Учитывая, что данный вид КП практически не исследован поэтому для определения факторов, которые влияют на величину и характер КП в режиме ОЗЗ, необходимо описать указанный процесс с физической точки зрения. На основании физического описания разработать физико-математическую модель данного процесса, которая позволит установить основные причины и условия возникновения максимальных КП в режиме ОЗЗ и разработать способы их эффективного ограничения. Решению указанных вопросов посвящена третья глава диссертации.

Выводы

На основании экспериментальных измерений внутренних перенапряжений и на основании анализа данных можно сделать следующие основные выводы:

1. Величина и характер КП, возникающих на зажимах электродвигателей при коммутации их вакуумными выключателями, в основном, зависят от типа и мощности электродвигателя и не зависят от длины и сечения кабельной линии, связывающей вакуумный выключатель и электродвигатель, а также от типа вакуумного выключателя и технологического процесса, в котором используется электродвигатель.

2. Величина и характер КП, возникающих на зажимах электродвигателей при коммутации их масляными выключателями, в основном, зависит от типа и мощности электродвигателя, а также от длины и сечения кабельной линии, связывающей выключатель с электродвигателем, и практически не зависит от типа масляного выключателя и технологического процесса, в котором используется электродвигатель.

3. С ростом мощности электродвигателей максимальная кратность перенапряжений на зажимах электродвигателя снижается, так при использовании вакуумных выключателей зафиксированы следующие максимальные кратности перенапряжений для синхронных электродвигателей: 7,4; 7; 6,5; 6,2; 5,5; 5,2; 3,4; 2,5, мощность которых соответственно составляла 315, 400, 500, 630, 1000, 1250, 2500, 6300 кВт; а для асинхронных электродвигателей аналогичной мощности максимальная кратность перенапряжений соответственно равна 6,4; 6,2; 6; 5,8; 5,3; 5,2; 4; 3. При использовании масляных выключателей максимальная кратность перенапряжений для вышеуказанных синхронных электродвигателей равна: 4,8; 4,6; 4,5; 4,3; 3,8; 3,6; 2,4; 1,6, а для асинхронных электродвигателей соответственно составила: 4,6; 4,4; 4,25; 4,1; 3,7; 3,6; 2,9; 2,5.

4. Частота коммутационного импульса при коммутации электродвигателей вакуумными или масляными выключателями соответственно находится в диапазоне: $60 \div 120$ кГц и $3 \div 15$ кГц.

5. Разработанная инженерная методика оценки КП позволяет оценить кратность перенапряжений в любой точке системы: “выключатель – кабель – электродвигатель”, не прибегая к методам математического моделирования и к экспериментальным измерениям, т.к. погрешность методики не превышает 7,5 %.

6. Кратность перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ для сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью при емкостном токе ОЗЗ до 5 А не превышает 2,1; если величина тока ОЗЗ находится в диапазоне $5 \div 50$ А, то кратность

перенапряжения находится в пределе $2,2 \div 3,0$; с увеличением емкостного тока свыше 50 А кратность перенапряжения не превышает 2,5.

7. Для сети 6–10 кВ с компенсированной нейтралью кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ может быть снижена до $1,7 \div 1,8$, если разбалансировка реактора не превышает 5 %, в противном случае кратность перенапряжения возрастает и становится соизмеримой с кратностью перенапряжений для сети с изолированной нейтралью.

8. При заземлении нейтрали сети 6–10 кВ через резистор можно снизить кратность перенапряжений до 2,0, если выполняется условие $I_a/I_c \geq 0,2$, а при выполнении условия $I_a/I_c \geq 0,6$ кратность перенапряжений снижается до $1,7 \div 1,8$. Дальнейшее увеличение добавочного активного тока практически не приводит к снижению кратности перенапряжений.

9. Максимальные КП в режиме ОЗЗ возникают в неповрежденной линии с двигательной нагрузкой в той фазе, в которой существует ОЗЗ в случае отключения данной линии от сети вакуумным выключателем. КП могут превышать напряжения сети в 8 – 9 раз, что представляет серьезную опасность для изоляции кабельной линии и статорной обмотки электродвигателей.

3. Аналитические исследования коммутационных перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю

Сделано описание коммутационных перенапряжений при отключении электрических машин в режиме ОЗЗ с физической точки зрения. Проведено математическое моделирование перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателей в режиме ОЗЗ. Установлены зависимости уровней перенапряжений от параметров системы электроснабжения электродвигателя, момента коммутации, мощности электродвигателя, величины тока ОЗЗ и кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ.

3.1 Общие сведения и методика исследований

Основным моментом аналитического исследования является адекватность схемы замещения системы “вакуумный выключатель – кабельная – электродвигатель” высокочастотному импульсному процессу в режиме ОЗЗ.

Поэтому является целесообразным применением однофазной схемы замещения с сосредоточенными параметрами, эквивалентной схеме с распределенными параметрами [7, 23, 33].

При математическом описании ПП принимаем ряд допущений:

- междуфазную и межвитковую емкость не учитываем (первой пренебрегаем ввиду ее незначительности – 10 % от емкости фазы на землю; вторая учитывается только для электродвигателей малой мощности) [23];

- обмотка электрической машины является линейной цепью, параметры которой не зависят от величины тока и перенапряжения;
- в диапазоне частот 5 – 125 кГц индуктивность обмотки остается постоянной и определяется сверхпереходным индуктивным сопротивлением;
- напряжение сети при частоте 50 Гц считаем квазипостоянной величиной, равной мгновенному значению напряжения в начальный момент переходного процесса;
- ротор двигателя в момент коммутации является неподвижным.

Процесс моделирования можно разделить на два этапа:

1. Произвести описание КП при отключении электродвигателей в режиме ОЗЗ с физической точки зрения, что позволит более детально выбрать схему заземления.
2. Произвести математическое моделирование переходных процессов при коммутации электродвигателей в однофазной схеме замещения с сосредоточенными параметрами в режиме ОЗЗ, без учета и с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя.

3.2 Описание физических процессов при коммутации электрических машин в режиме ОЗЗ

В данном разделе проведем аналитические исследования основных факторов, влияющих на КП, возникающие на зажимах электродвигателей при отключении их от распределительной сети вакуумным выключателем в режиме ОЗЗ.

Напряжение на зажимах электродвигателя в момент отключения его от сети оценивается выражением [12]:

$$U = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad , \quad (3.1)$$

где: L – индуктивность обмотки электродвигателя, Гн;

C – емкость обмотки по отношению к земле, Ф;

i_0 – ток среза в вакуумной камере, А.

Электрический заряд q на емкости C равен:

$$q = U \cdot C, \quad (3.2)$$

С учетом выражения (3.2) выражение (3.1) примет вид:

$$U = \frac{i_0^2 \cdot L}{q} \quad (3.3)$$

Таким образом, для анализа изменения напряжения на зажимах электродвигателей необходимо проанализировать изменение электрического заряда на каждой фазе сети по отношению к земле. Электрический заряд каждой фазы сети пропорционален напряжению, следовательно, в первую очередь проведем анализ изменения фазных напряжений сети в режиме дугового ОЗЗ.

Пусть в трехфазной сети с изолированной нейтралью произошло однофазное дуговое замыкание на землю (рис.3.1.)

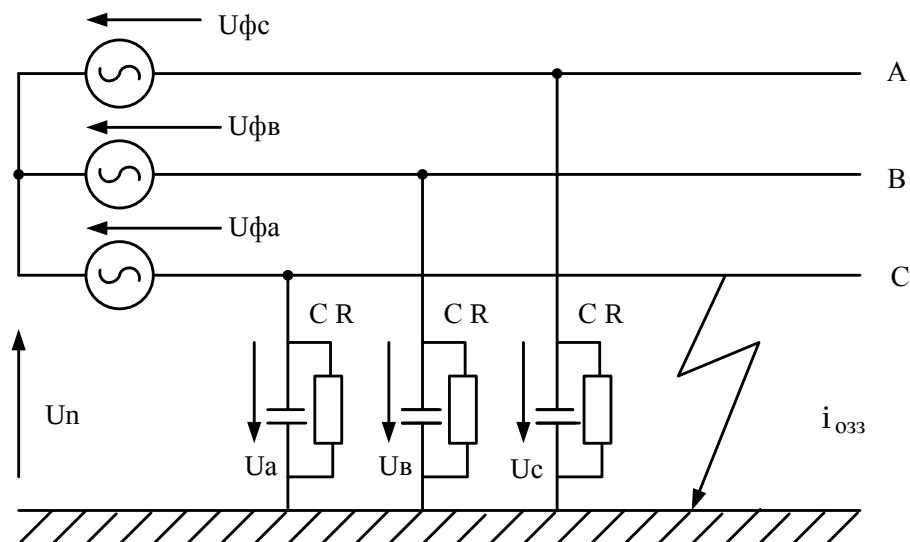


Рисунок 3.1 – Расчетная схема идеализированной сети при однофазном замыкании на землю.

Примем, что $R \gg X_c$, т.е. сопротивление изоляции сети идеально. В этом случае сеть обладает только емкостным сопротивлением, тогда очевидно, что ток замыкания на землю $i_{озз}$ будет опережать фазное напряжение поврежденного провода на угол $\pi/2$. Поэтому фазные напряжения сети целесообразно записать в виде:

$$U_{\Phi A} = U_{\Phi M} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) ; \quad (3.4)$$

$$U_{\Phi B} = U_{\Phi M} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}) ;$$

$$U_{\Phi C} = U_{\Phi M} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}) .$$

Таким образом, непосредственно перед замыканием фазы А на землю, т.е. при $t = -0$, напряжение фаз А, В, С относительно земли имели значения $U_A(-0) = U_{\Phi M}$, $U_B(-0) = U_C(-0) = -0,5U_{\Phi M}$.

В интервале времени от $t = 0$ до $t = \pi/\omega$, назовем его первым, ток замыкания на землю изменяется по закону:

$$i_3 = 3U_{\Phi M} \omega C \sin(\omega t + \pi), \quad (3.5)$$

а напряжение смещения нейтрали U_n равно напряжению фазы А источника.

Согласно гипотезе Петерсона, дуга гаснет при прохождении тока замыкания через ближайший нуль. Это случается в момент $t = \pi/\omega$ (рис 3.2). Произойдет мгновенное перераспределение напряжений на емкостях сети относительно земли, поскольку емкость поврежденной фазы больше не будет закорочена током дуги, сопротивление которой полагаем равным нулю.

Напряжение смещения нейтрали во втором интервале, т.е. при $\pi \leq \omega t \leq \frac{3}{2}\pi$, найдем на операторной схеме, представленной на рис.3.3. Так как напряжение смещения нейтрали в операторной форме

$$\underline{U}_n(p) = -\frac{U_{\Phi M}}{p}, \quad (3.6)$$

то переход от изображения к оригиналу дает

$$U_n = -U_{\Phi M} . \quad (3.7)$$

Следовательно, нулевая точка трехфазного источника относительно земли после погасания дуги принимает не изменяющийся во времени потенциал, равный по значению амплитуде фазного напряжения сети.

Поэтому напряжение в сети в промежутках погасания дуги будут определяться выражениями:

$$U_A = U_{\text{фм}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right]; \quad (3.8)$$

$$U_B = U_{\text{фм}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) + 1 \right];$$

$$U_C = U_{\text{фм}} \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3} \right) + 1 \right].$$

Таким образом, напряжения неповрежденных фаз сети относительно земли могут достигать значения, равного удвоенной амплитуде фазного напряжения сети $2U_{\text{фм}}$ (см. рис 3.2), а в поврежденной фазе напряжения изменяются от 0 до $U_{\text{фм}}$.

В момент $\omega t = \frac{3}{2}\pi$, $U_A = U_{\text{фм}}$, т.е. когда опять возникает ток дуги на землю, емкость закоротится, в связи с этим произойдет скачок тока $i_{\text{озз}}$ (см. рис.3.2). Далее этот процесс, как и с момента $\omega t = \frac{\pi}{2}$, повторится, только все значения (токи, напряжения) поменяют знаки.

Реальные сети обладают, помимо емкостей фаз относительно земли, также активными и индуктивными сопротивлениями проводов. Поэтому возможны колебательные процессы при дуговых замыканиях на землю, приводящие к более высоким перенапряжениям относительно полученных для идеализированных сетей, что было подтверждено исследованиями, результаты которых приведены во второй главе. Однако значения максимальных перенапряжений в реальной сети не будут опускаться ниже перенапряжений, полученных для идеализированной сети. Это указывает на то, что максимальные значения электрического заряда на неповрежденных фазах сети в режиме ОЗЗ как минимум увеличиваются в 2 раза, а в неповрежденной фазе изменяются от нуля до значения, соответствующего безаварийному режиму сети.

Следовательно, если отключение неповрежденной линии с двигательной нагрузкой от распределительной сети произойдет в момент горения дуги, когда заряд на поврежденной фазе стремится к нулю, КП на обмотке электродвигателя, которая связана с данной фазой сети, может в идеальном случае ($g=0$) до-

стигнуть бесконечно больших значений, что непременно приведет к пробое изоляции обмотки электродвигателя. В реальной сети электрический заряд на поврежденной фазе сети обусловлен напряжением дуги:

$$U_g = i_{o33} \cdot R_g, \quad (3.9)$$

где: i_{o33} - ток однофазного замыкания на землю;

R_g - активное сопротивление дуги.

Это позволяет, как показали реальные измерения, ограничить КП.

Однако уровень КП является очень высоким и может превышать напряжение сети в 8 – 9 раз.

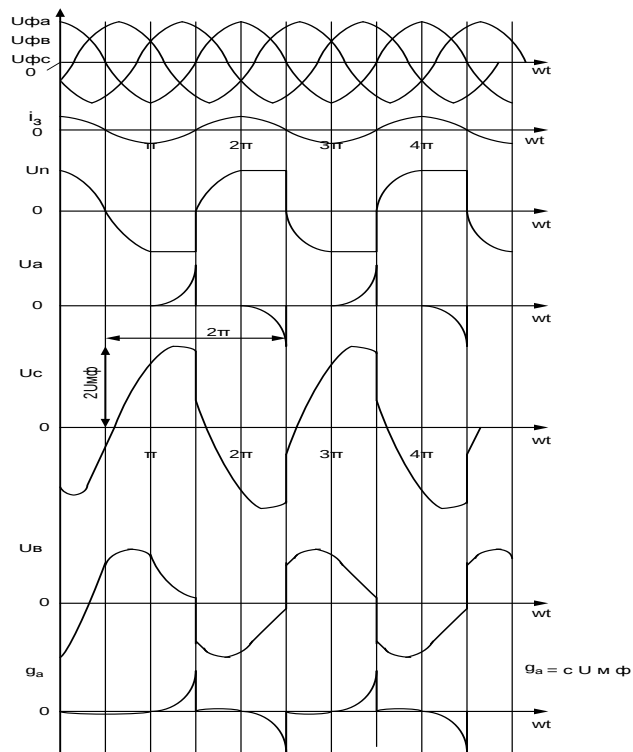


Рисунок 3.2 – Кривые, характеризующие переходный процесс при дуговом замыкании на землю в идеальной сети.

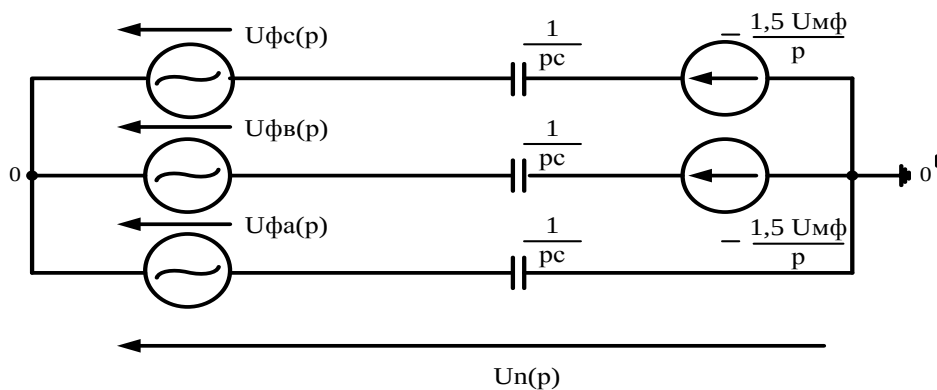


Рисунок 3.3 – Операторная схема переходного процесса для интервала $\pi \leq \omega t \leq \frac{3}{2}\pi$.

Если отключение произойдет в период, когда дуга не горит, КП на обмотке электродвигателя снижаются и не будут отличаться от перенапряжений в безаварийном режиме. Это связано с тем, что восстанавливается напряжение на поврежденной фазе сети, а следовательно, возрастет и электрический заряд до величины, соответствующей безаварийному режиму $g_a = CU_{\text{ФМ}}$, что и приводит к ограничению напряжения.

При отключении поврежденной линии с двигательной нагрузкой от распределительной сети в момент горения дуги, КП на обмотке электродвигателя, которая связана с поврежденной фазой сети, не возникает, т.к. магнитная энергия, запасенная в индуктивном сопротивлении обмотки, “стекает” через дугу в землю.

Если отключение произойдет в период, когда дуга не горит, перенапряжения на обмотке электродвигателя возрастают, т.к. обмотка уже не будет связана с землей через дугу.

В этом случае КП по величине не будут отличаться от перенапряжений в безаварийном режиме, т.к. происходит быстрый процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе сети. Электрический заряд возрастает до значения, соответствующего безаварийному режиму (см. рис. 3.2, кривая g_A). Величина перенапряжений на зажимах электродвигателя, связанных с неповрежденными фазами сети в момент отключения электродвигателя от сети, будет ниже как минимум в два раза, по сравнению с КП в безаварийном режиме, что подтверждается реальными измерениями, приведенными во второй главе. Это связано с тем, что электрический заряд на указанных фазах в режиме ОЗЗ возрастает как минимум в два раза.

Из вышеизложенного следует, что если происходит отключение неповрежденной линии с двигательной нагрузкой в момент горения дуги вакуумным

выключателем, то КП достигают максимальных значений на зажимах той обмотки электродвигателя, которая связана с поврежденной фазой сети. Кроме этого, в однолинейной схеме замещения, с помощью которой будет смоделирован процесс отключения электродвигателя в режиме ОЗЗ, необходимо учесть шунтирование емкости обмотки двигателя перемежающейся дугой ОЗЗ, т.е., когда горит дуга, напряжение на емкости равно нулю.

3.3 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в результате среза тока без повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя

В соответствии с принятым допущением и объяснением возникновения максимальных перенапряжений при отключении электродвигателя в режиме ОЗЗ без учета повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя напряжение для фазы, связанной с землей, можно определить по выражению:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left(-\frac{i_{CP}(0_-)}{C_H \omega_B} \right) \cdot \sin(\omega_B t) \right\}, \quad (3.10)$$

а для фазы, не связанной с землей, выражение (3.10) будет иметь вид:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} \left[\left\{ \frac{-i_{CP}(0_-) - \alpha U_H(0) C_H}{C_H \omega_B} \right\} \sin(\omega_B t) + U_H(0) \cos(\omega_B t) \right], \quad (3.11)$$

Схема замещения и вывод формул (3.10) и (3.11) приведены в приложении 5. В качестве примера для исследования коммутационных перенапряжений в режиме ОЗЗ были приняты синхронные двигатели типа СДЭУ – 14 – 29 – 6 и СДЭ – 16 – 46.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.1÷3.3. На рис. 3.4÷3.7 приведены графики зависимостей напряжения от различных факторов.

Из графиков на рис.3.5 видно, что с увеличением присоединенной емкости на зажимах электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6 происходит значительное

снижение амплитуды восстанавливающегося напряжения на фазе, которая была связана с землей. Например, при отсутствии добавочной емкости на зажимах электродвигателя максимальное значение напряжения равно 43700 В, а при наличии добавочной емкости, равной $0,05 \cdot 10^{-6}$, $0,15 \cdot 10^{-6}$ и $0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф, величина перенапряжения снижается соответственно до 7860 В, 5650 В и 3670 В.

С увеличением присоединенной емкости на зажимах электродвигателя СДЭУ – 14 – 26 – 6 снижается не только амплитуда коммутационного импульса, но и скорость нарастания напряжения. При отсутствии добавочной емкости скорость нарастания напряжения равна 11205 В/мкс. С увеличением присоединенной емкости до $0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф скорость нарастания напряжения отличается в 324 раза и составляет 34,6 В/мкс, при этом частота коммутационного импульса снижается с 63,8 кГц до 2,37 кГц. Следует также отметить тот факт, что с увеличением присоединенной мощности на зажимах электродвигателя увеличивается время затухания переходного процесса.

Таблица 3.1 – Зависимость коэффициента коммутационных перенапряжений на фазе, связанной с землей, от величины тока среза и мощности электродвигателя (длина кабельной вставки равна нулю).

Тип электродвигателя	СДЭУ – 14 – 29 – 6, Р=520 кВт		СДЭ – 16 – 46 – 6, Р = 1250 кВт	
Ток среза, А	5,66	14,0	5,66	14,1
$U_{H.CB}$, В	23542	43720	7689	14300
$K_n = \frac{U_{H.CB}}{U_H}$	3,92	7,29	1,28	2,38

Таблица 3.2 - Зависимость коэффициента коммутационных перенапряжений на фазе, связанной с землей, от величины присоединенной емкости на зажимах синхронного двигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, ток среза 14,1 А

Приведенная до-	0	$0,05 \cdot 10^{-6}$	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$
-----------------	---	----------------------	----------------------	----------------------

бавочная ем- кость, Ф				
$U_{H.CB}, В$	43720	7860	5650	3670
$K_n = \frac{U_{H.CB}}{U_H}$	7,29	1,31	0,93	0,6

Таблица 3.3 – Зависимость коэффициента коммутационных перенапряжений (K_n) на фазе, не связанной с землей, синхронного двигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6 от величины кратности перенапряжений при дуговом ОЗЗ ($K_{OЗЗ}$) и тока среза.

Режим сети	ОЗЗ отсут- ствует	Металлическое (глухое) ОЗЗ	Дуговое ОЗЗ	Дуговое ОЗЗ
Кратность перенапря- жений при дуговом ОЗЗ, $K_{OЗЗ} = \frac{U_m}{U_{\phi m}}$	1	1,73	2,5	3,6
Ток среза, А	14,1/5,66	14,1/5,66	14,1/5,66	14,1/5,66
$U_{H.CB}, В$	39000/13520	35500/10240	31950/15300	26780/17730
$K_n = \frac{U_{H.CB}}{U_H}$	6,5/2,25	5,92/1,71	5,33/2,55	4,46/2,96

Из сравнения переходных процессов двигателей СДЭУ – 14 – 29 – 6 и СДЭ – 16 – 46 – 6 видно, что с ростом мощности электрической машины в 2,4 раза происходит снижение возникающих перенапряжений (рис. 3.6) в 3 раза, а частота коммутационного импульса снижается с 63,8 кГц до 50 кГц. Время затухания переходного процесса увеличивается.

На рис. 3.7 показаны графики переходных процессов для фазы электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, не связанной с землей, для четырех случаев. Первый график отражает переходной процесс, возникающий в статорной обмотке электродвигателя при отключении его от сети в режиме холостого хода и при отсутствии ОЗЗ.

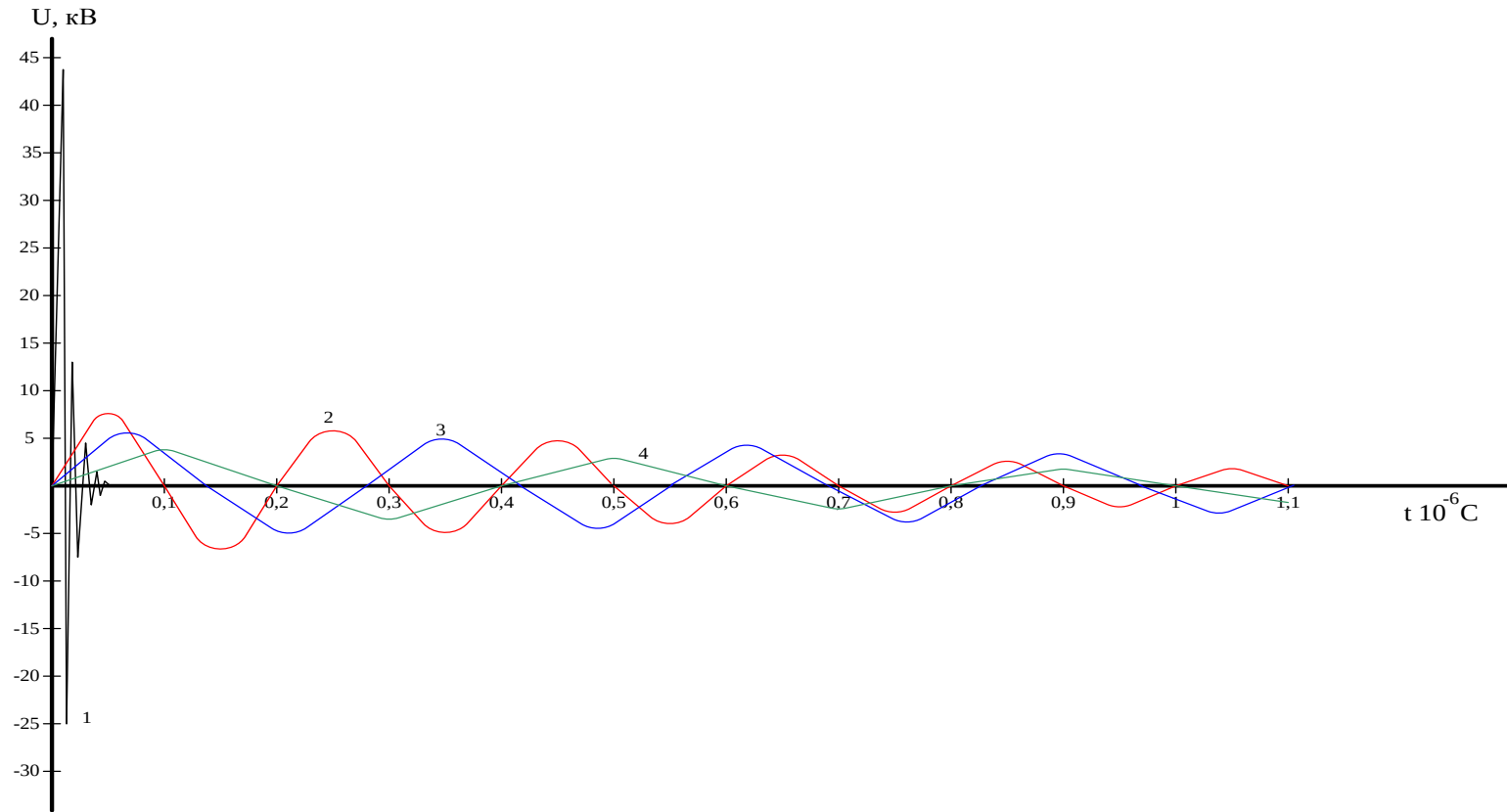


Рисунок 3.4 – Зависимость величины коммутационных перенапряжений на фазе, связанной с землей, при неселективном отключении электродвигателя СДЭУ-14-29-6 на холостом ходу от величины присоединенной добавочной емкости: 1. $C_{доб} = 0$, $f = 63,8$ кГц; 2. $C_{доб} = 0,05 \cdot 10^{-6}$ Ф, $f = 5,27$ кГц; 3. $C_{доб} = 0,15 \cdot 10^{-6}$ Ф, $f = 3,65$ кГц; 4. $C_{доб} = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф, $f = 2,37$ кГц.

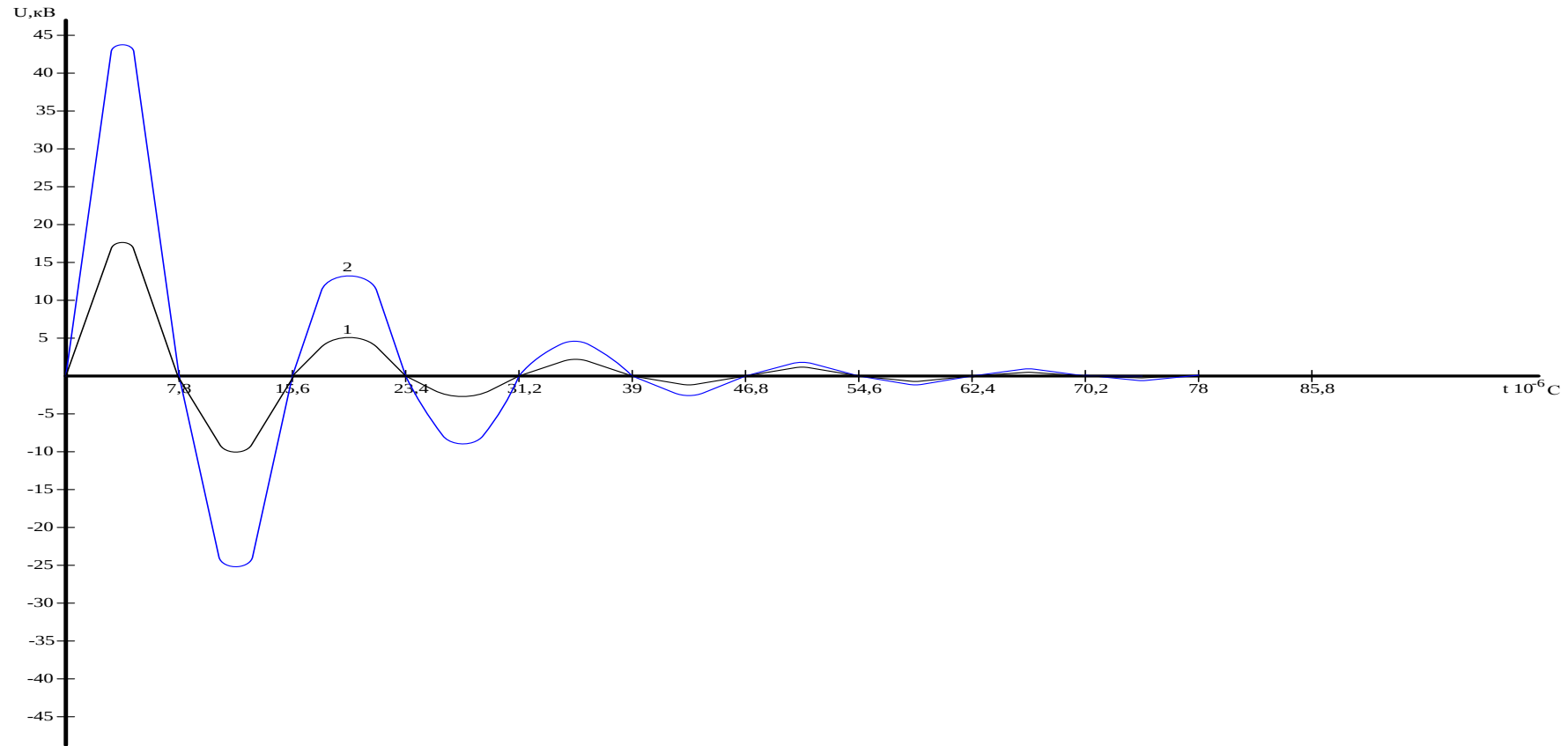


Рисунок 3.5 – Зависимость величины коммутационных перенапряжений на фазе, связанной с землей, при неселективном отключении электродвигателя СДЭУ-14-29-6 на холостом ходу от величины тока среза, $C_{доб} = 0$; 1. ток среза $i_{ср} = 5,66$ А; 2. ток среза $i_{ср} = 14$ А.

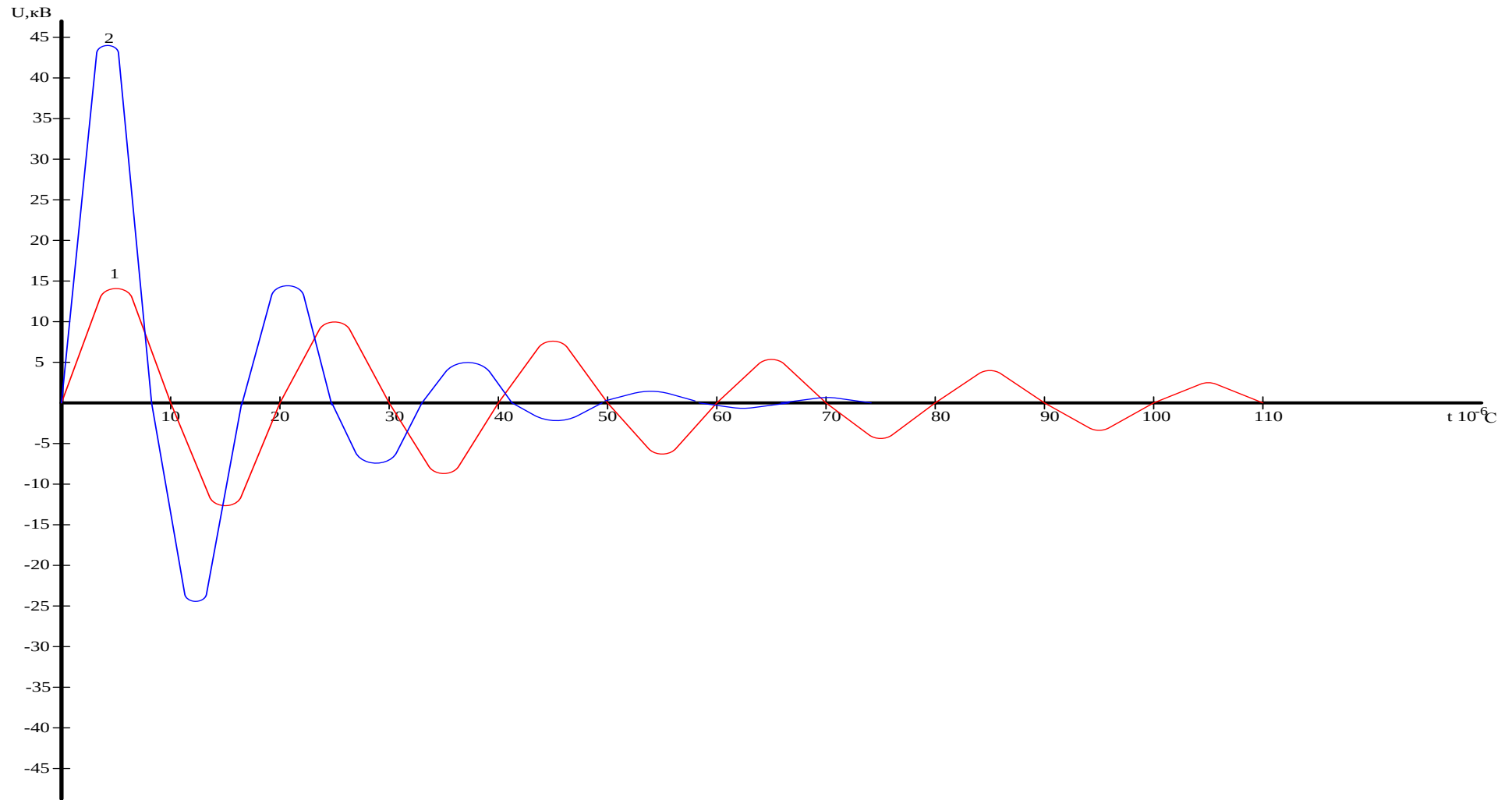


Рисунок 3.6 – Зависимость величины коммутационных перенапряжений на фазе, связанной с землей, при отключении электродвигателя на холостом ходу от мощности электродвигателя: 1. СДЭУ-16-48-6, $P = 1250$ кВт, $i_{cp} = 14,1$ А, $f = 50 \cdot 10^3$ Гц; 2. СДЭУ-14-29-6, $P = 520$ кВт, $i_{cp} = 14,1$ А, $f = 63,8 \cdot 10^3$ Гц.

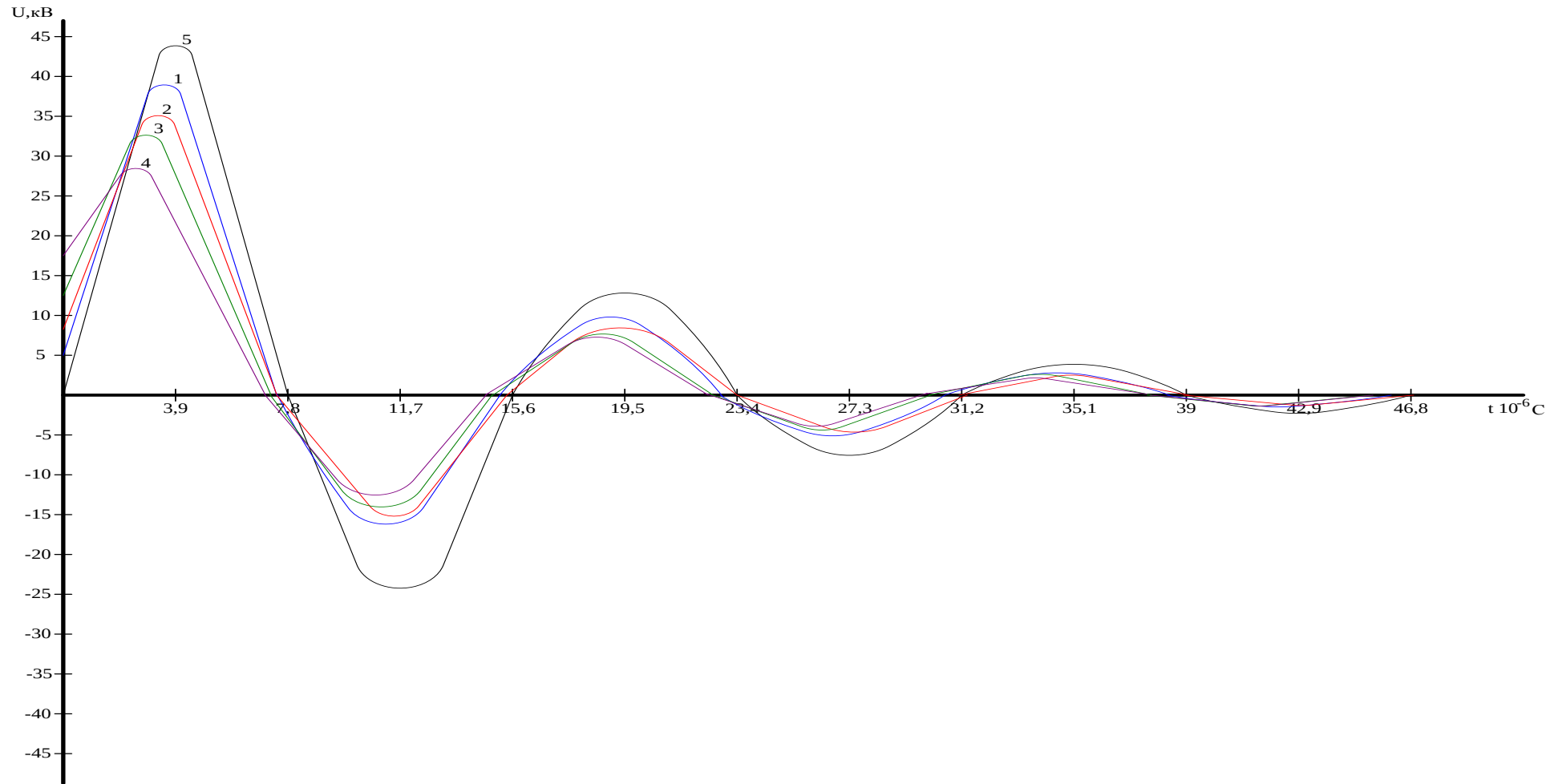


Рисунок 3.7 – Зависимость величины коммутационных перенапряжений на фазе, не связанной с землей, при отключении электродвигателя СДЭУ-14-29-6 на холостом ходу от кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ, ток среза 14,1А: 1. Без ОЗЗ; 2. $K_{\text{озз}} = 1,73$, металлическое (глухое ОЗЗ); 3. $K_{\text{озз}} = 2,5$, дуговое ОЗЗ; 4. $K_{\text{озз}} = 3,6$, дуговое ОЗЗ; 5. Фаза связана с землей.

Второй, третий и четвертый графики отражают переходные процессы при отключении электродвигателя в режиме ОЗЗ в той фазе статорной обмотки электродвигателя, которая не была связана с землей. Переходной процесс, изображенный на втором графике, соответствует металлическому (глухому) ОЗЗ. Третий и четвертый графики переходных процессов относятся к дуговому ОЗЗ, которое сопровождалось перенапряжением на неповрежденной фазе, соответственно равным $2,5U_{\text{фм}}$ и $3,6U_{\text{фм}}$, ток среза равен 14,1 А. Из графиков видно, что с ростом кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ ($K_{\text{озз}}$) КП снижаются (графики 2, 3, 4) и не превышают кратность КП, которые возникают на зажимах электродвигателя при отключении его от сети при отсутствии ОЗЗ (график1). Это связано с тем, что с ростом перенапряжений на неповрежденной фазе сети в режиме ОЗЗ растет и заряд $q(0_-)$ на емкости, что и приводит к более глубокому ограничению КП.

Сопоставляя результаты моделирования КП в режиме ОЗЗ, возникающих в фазах статорной обмотки электродвигателя, связанной с землей и не связанной с землей, видно, что при ложном отключении электродвигателя от сети в режиме ОЗЗ КП, возникающие в фазе, которая была связана с землей, имеют более высокую кратность.

Полученные результаты моделирования КП без учета повторных зажигания дуги позволяют определить влияние мощности двигателя, тока среза, кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ на величину КП, но не учитывают повторные зажигания дуги в вакуумной камере выключателя, поэтому результаты экспериментальных исследований могут отличаться от результатов, полученных при моделировании. Следовательно, необходимым является расчет перенапряжений с учетом многократных повторных зажигания дуги в выключателе.

3.4 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в режиме ОЗЗ с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя

Математическое моделирование КП в результате среза тока без повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя показало, что характер КП на фазах статорной обмотки электродвигателя, связанных с землей и не связанных с землей, имеют определенные отличия. Поэтому математическое моделирование КП с учетом повторных зажигания дуги необходимо выполнить как для фазы, не связанной с землей, так и для фазы, которая была связана с землей. В коммутационных аппаратах процессы отключения силовой нагрузки сопровождаются многократными повторными зажиганиями дуги (МПЗ). Повторные зажигания дуги, возникающие в высоковольтных выключателях, приводят к постепенному росту величины напряжения на нагрузке (эскалация напряжения), что в свою очередь может привести к электрическому пробое изоляции статорных обмоток высоковольтных электродвигателей.

Кратко рассмотрим процессы отключения нагрузки. Допустим, что коммутационный аппарат отключил ток промышленной частоты. В результате этого на его полюсах появляется восстанавливающееся переходное напряжение.

Когда величина напряжения превысит диэлектрическую прочность межконтактного промежутка, произойдет электрический пробой.

Вследствие этого в статорную обмотку электродвигателя снова начинает поступать ток промышленной частоты. Одновременно с ним через эквивалентную емкость отключаемого контура и емкость сети до вакуумного выключателя протекает переходной ток высокой частоты. Частота колебаний данного тока в основном зависит от величины индуктивности кабеля от выключателя до электродвигателя и емкости нагрузки относительно земли.

Так как значение индуктивности мало, то частота колебаний достигает достаточно больших значений (порядка 100 - 500 кГц) [42]. Высокая отключающая способность вакуумного выключателя, позволяющая ему отключать токи со значительной скоростью изменения, делает возможным отключение в моменты времени, соответствующие нулевым значениям переходного тока. В то же время значение тока промышленной частоты не равно нулю, а следовательно, в индуктивности нагрузки остается некоторый запас электромагнитной энергии, которая после погасания дуги заряжает эквивалентную емкость. В результате этого на контактах выключателя снова появляются значительные по величине потенциалы, вновь приводящие к повторному пробоев межэлектродного промежутка и последующему протеканию высокочастотного тока. Данный процесс повторяется до тех пор, пока электрическая прочность промежутка не превысит величину возникающего перенапряжения.

Выражение для фазы, не связанной с землей, вывод которого произведен в приложении 6, позволяет определить, как будет изменяться напряжение на нагрузке от величины тока среза и кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ ($K_{OЗЗ}$) при повторных зажиганиях дуги в вакуумной камере:

$$U_{н.пер}(t) = K_{OЗЗ} U_{ф.м} \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha t} \times \\ \times \left\{ \left(\frac{-i_{св}(0) - \omega K_{OЗЗ} U_{ф.м} \cos(\psi_{11}) C_H - U_{н.св}(0) \alpha_1 C_H}{\omega_{B1} C_H} \right) \sin(\omega_{B1} t) + U_{н.св}(0) \cos(\omega_{B1} t) \right\} \quad (3.12)$$

После нескольких повторных зажиганиях дуги в вакуумной камере выключателя дуга погаснет, напряжение на нагрузке будет определяться выражением (3.10).

Во время горения дуги ОЗЗ емкость поврежденной фазы (C_c) будет зашунтирована дугой. Эквивалентная схема заземления для данной фазы представлена в приложении 6 на рис.П.3.6.

Используя математические операции, приведенные в приложении 6, и принимая во внимание, что $U_1=0$, $U_M=0$, получим следующие выражения для напряжения на нагрузке на фазе, связанной с землей:

$$U_{\text{н.пер.п.}}(t) = e^{\alpha_1 t} \times \left\{ \left(\frac{-i_{\text{св}}(0) - U_{\text{н.св}}(0)\alpha_1 C_H}{\omega_{\text{в1п}} C_H} \right) \sin(\omega_{\text{в1п}} t) + U_{\text{н.св}}(0) \cos(\omega_{\text{в1п}} t) \right\} \quad (3.13)$$

После прекращения повторных зажигания дуги напряжение на нагрузке будет описываться выражением (3.10).

На основе вышеполученных аналитических выражений тока и напряжения было выполнено математическое моделирование КП при отключении вакуумными выключателями сетевых синхронных электродвигателей типа: СДЭУ – 14 – 29 – 6 (520 кВт) и СДЭ – 16 – 46 (1250 кВт) в режиме ОЗЗ.

Перед началом моделирования задаемся уравнением по скорости изменения высокочастотного тока $\frac{di_{2p}}{dt}$ в $500 \frac{A}{\mu s}$ [43]. При превышении этой величины вакуумный выключатель не способен отключить цепь после повторного зажигания.

Установлено [71], что первый электрический пробой межконтактного промежутка в вакуумной дугогасительной камере произойдет, если разность потенциалов между расходящимися контактами составляет 5355 В, что приводит к возникновению дуги между контактами выключателя. После прохождения высокочастотного тока через нулевое значение дуга гаснет и вновь может возникнуть, если разность потенциалов между контактами достигнет значения 10700 В. В третий, четвертый и пятый раз дуга между контактами вакуумного выключателя возникнет, если разность потенциалов между расходящимися контактами соответственно достигнет 21400 В, 42800 В, 85600 В.

При моделировании КП учитывались не только условия возникновения повторных зажигания дуги в вакуумной дугогасительной камере выключателя, но и влияние расстояния от электродвигателя до места ОЗЗ, а также влияние величины добавочной емкости на зажимах электродвигателя.

Моделирование КП с учетом повторных зажигания дуги выполнялось в два этапа.

На первом и втором этапах соответственно рассматривались переходные процессы, которые возникают на фазах статорной обмотки электродвигателя, связанной и не связанной с землей.

Рассмотрим результаты математического моделирования КП на первом этапе.

На рис. 3.8 приведены результаты математического моделирования КП при неселективном отключении электродвигателя на холостом ходу в режиме ОЗЗ в зависимости от расстояния между местом ОЗЗ и электродвигателем.

На рис. 3.8 а приведены результаты процесса отключения электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, расположенного в непосредственной близости к месту ОЗЗ ($L_{\text{каб}} < 100 \text{ м}$). При величине среза тока, равной 14,1 А, в отключаемом контуре возникают свободные затухающие колебания электромагнитной энергии с частотой 63,8 кГц. Через $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ после погасания дуги в межконтактном промежутке напряжение в выключателе превысило уровень восстанавливающейся электрической прочности вакуумной дугогасительной камеры, в результате чего возникает первое повторное зажигание дуги (напряжение пробоя 6355 В). Вследствие этого в контуре, образованном элементами электрической сети ОЗЗ, L_c , R_c , QF , C_n , происходит разряд емкости C_n через место ОЗЗ, вызывавшее появление переходного тока $i_{2\text{св.п}}$ с частотой колебаний 384 кГц. Максимальная амплитуда тока достигает 68,6 А. За время первого полупериода трехфазного тока ($i_{2\text{св.п}}$) равное $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ емкость C_n успевает разрядиться практически до нуля. Дуга гаснет и снова вызывает свободные колебания тока и напряжения на нагрузке. Значение напряжения на нагрузке за время $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ достигает 10700 В, что приводит ко второму повторному зажиганию дуги. Частота колебаний переходного тока ($i_{2\text{св.п}}$) не меняется. Максимальная амплитуда тока ($i_{2\text{св.п}}$) возрастает в 2 раза и достигает значения 137,2 А. И снова через $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ после начала переходного процесса, связанного с разрядом емкости, C_n вновь разрядится практически до нуля, происходит очередной срез тока. Значение напряжения на нагрузке возрастает и через $1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ достигает значения 21400 В, это в третий раз приводит к повторному зажиганию дуги.

Амплитуда переходного тока ($i_{2,cb,п}$) возрастает и достигает значения 243 А. За время $1,3 \cdot 10^{-6}$ с емкость C_H успевает вновь разрядиться до нуля. Дуга гаснет и снова происходит срез тока. За время $3,5 \cdot 10^{-6}$ с напряжение на нагрузке достигает значения 42800 В, что снова приводит к очередному зажиганию дуги в вакуумной камере. В последнем случае за время горения дуги, равное $1,3 \cdot 10^{-6}$ с, емкость C_H не успевает разрядиться до нуля. Остаточное напряжение на емкости C_H составляет 286 В, и при очередном срезе тока значение восстановившегося напряжения на нагрузке достигает 43986 В, что не приводит к появлению повторного зажигания дуги, т.к. напряжение пробоя составляет 85600 В. На нагрузке возникают затухающие колебания тока и напряжения.

Максимальная кратность перенапряжения достигает значения, равного $K_{п} = 7,33$, что практически не отличается от аналогичного показателя $K_{п} = 7,28$, значение которого было получено при моделировании коммутационных перенапряжений без повторных зажиганий дуги.

С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 500 м (рис. 3.8 б) индуктивность L_c возрастает в 5 раз, что приводит к снижению частоты переходного тока ($i_{2cbп}$) до 171740 Гц. В этом случае результирующее индуктивное сопротивление возрастет в 2,24 раза. Результирующее активное сопротивление R_c до места ОЗЗ будем считать практически постоянным, т.к. с увеличением расстояния увеличивается продольное активное сопротивление, но с уменьшением частоты снижается поверхностный эффект в проводнике. Следовательно, полное сопротивление до места ОЗЗ возрастает. Это приводит к тому, что за время горения дуги в вакуумной камере емкость C_H не будет успевать разряжаться до нуля. На емкости C_H будет сохраняться определенное остаточное напряжение $U(0)$, а с очередным срезом тока величина остаточного напряжения будет возрастать, что в конечном итоге приведет к более высокому росту напряжения на нагрузке.

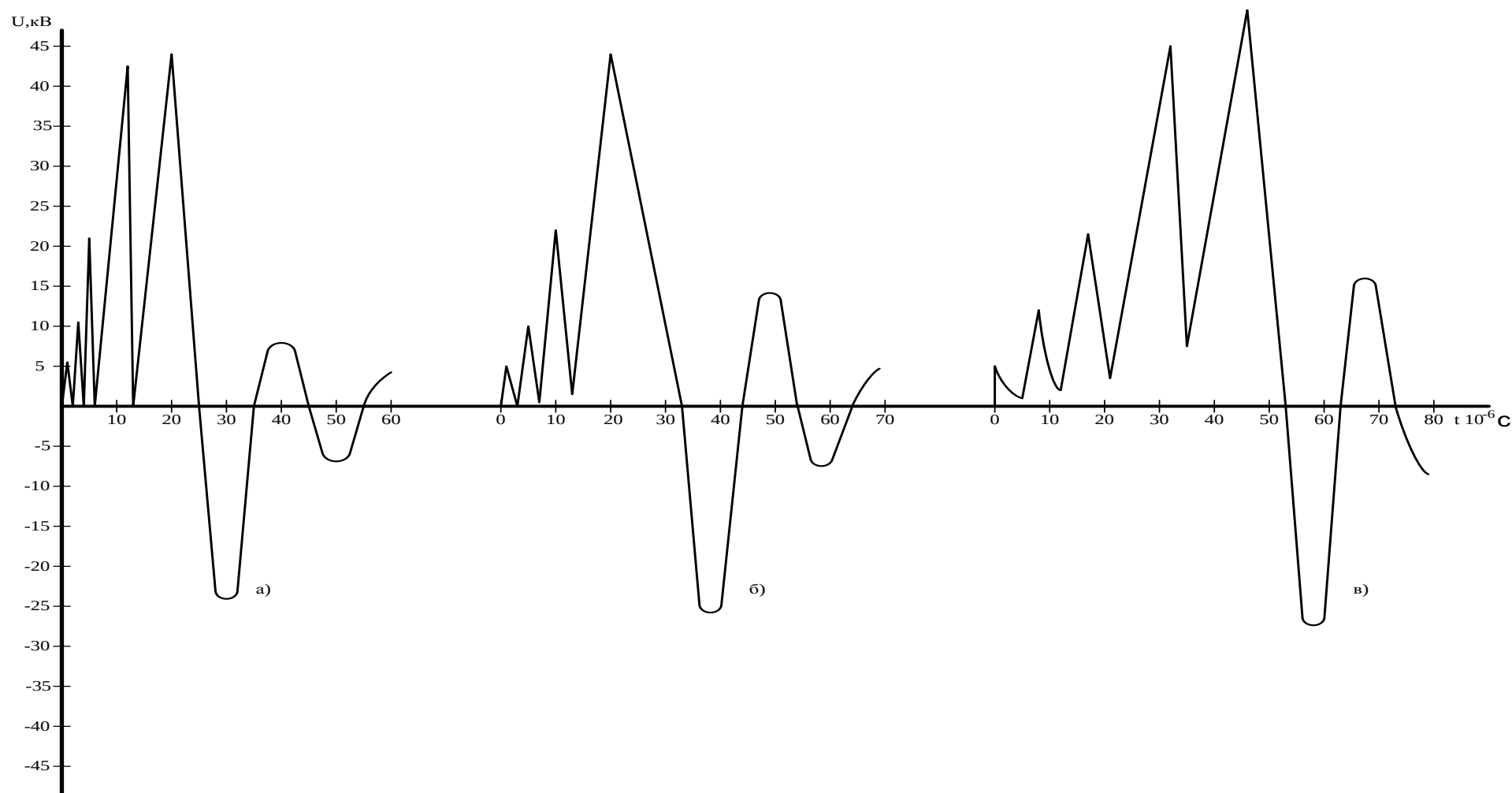


Рисунок 3.8 – Коммутационные перенапряжения на фазе, связанной с землей, при неселективном отключении электродвигателя СДЭУ-14-29-6 в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А: а) расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ – 100 м; б) расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ – 500 м; в) расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ – 1000 м.

Исследования показали (рис.3.8 б), что при первом повторном зажигании дуги остаточное напряжение на емкости C_H составило 386 В, а при втором, третьем и четвертом повторных зажиганиях дуги остаточное напряжение соответственно будет равно 783 В, 1560 В и 3400 В. В конечном итоге максимальное напряжение на нагрузке достигает значения 47100 В, следовательно, кратность перенапряжений будет равна 7,85. С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 1000 м частота переходного тока снижается до 121440 Гц. Процесс разряда емкости C_H через место ОЗЗ становится еще более медленным (рис. 3.8 в). Это приводит к более высокому росту остаточного напряжения на емкости C_H , так при первом, втором, третьем и четвертым повторных зажиганиях дуги в вакуумной камере остаточное напряжение на емкости C_H соответственно увеличивается до следующих значений 873 В, 1624 В, 3580 В и 7150 В. Максимальное напряжение на нагрузке достигает значения 50900 В. В этом случае кратность перенапряжений равна 8,48.

Таким образом, увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ приводит к росту кратности перенапряжения на фазе статорной обмотки, связанной с землей.

Однако с увеличением расстояния скорость нарастания напряжения в коммутационном импульсе снижается. Если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составило 100 м, 500 м и 1000 м, то скорость нарастания напряжения соответственно равна 2200 В/мкс, 1624 В/мкс и 1083 В/мкс. Это связано с тем, что с увеличением расстояния возрастает время первой фазы переходного процесса, связанного с повторным зажиганием. Один за счет времени протекания переходного тока $i_{2свп}$. Для переходных процессов, представленных на рис.3.8 а; б, время первой фазы переходного процесса $U_H(t)$ соответственно равно $20 \cdot 10^{-6}$ с, $29 \cdot 10^{-6}$ с и $47 \cdot 10^{-6}$ с, а общее время переходного процесса соответственно составляет $115 \cdot 10^{-6}$ с, $134 \cdot 10^{-6}$ с и $163 \cdot 10^{-6}$ с.

Рассмотрим влияние увеличения емкости C_H , за счет подключения добавочной C_d к зажимам электродвигателя, на величину и характер КП.

На рис. 3.9 показаны переходные процессы напряжения на зажимах статорной обмотки, связанной с землей, в случае неселективного отключения электродвигателя СДЭУ-14-29-6 в режиме ОЗЗ, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 100 м и 1000 м.

Если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100 м, математическое моделирование показало, что подключение добавочной емкости, равной 0,05 мкФ, к статорной обмотке электродвигателя СДЭУ-14-29-6 приводит к снижению числа повторных зажигания дуги в вакуумной камере в два раза. Максимальное напряжение на нагрузке снижается до 15640 В. Кратность перенапряжения не превышает 2,6. Время первой фазы переходного процесса возрастает до $0,15 \cdot 10^{-3}$ с, а скорость нарастания напряжения соответственно снижается до 104 В/мкс. Частота переходного тока $i_{2\text{свп}}$ составляет 78212 кГц. Максимальное значение переходного тока достигает значения 718 А, а скорость изменения переходного тока не превышает 225 А/мкс.

С ростом величины добавочной емкости до 0,15 мкФ наблюдается только одно повторное зажигание дуги. Напряжение на нагрузке не превышает значения 10 кВ. Кратность перенапряжений снижается до 1,66. Время первой фазы переходного процесса составляет $0,09 \cdot 10^{-3}$ с. Скорость нарастания напряжения возрастает до 111,1 В/мкс. Частота переходного тока снижается до 45000 Гц. Максимальное значение тока составляет 627 А, при этом скорость изменения переходного тока снижается до 113,1 А/мкс.

Если величина добавочной емкости достигает значения 0,25 мкФ, то процесс отключения электродвигателя происходит без повторных зажигания дуги. В этом случае максимальное значение напряжения на нагрузке не превышает 4500 В, а скорость нарастания напряжения увеличивается до 45 В/мкс. С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 1000 м, при условии, что к зажимам электродвигателя подключена добавочная емкость 0,05 мкФ, количество повторных зажигания дуги в вакуумной камере не изменяется.

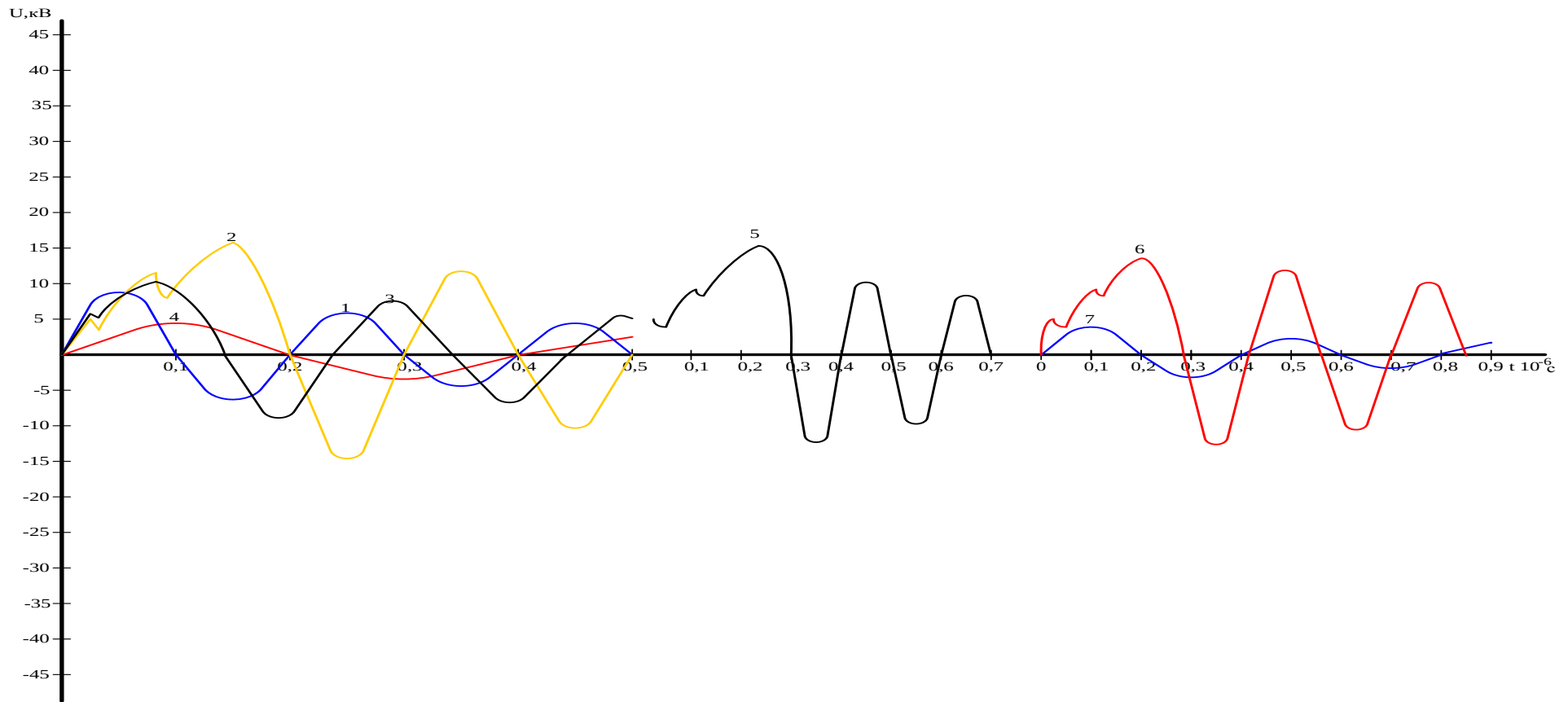


Рисунок 3.9 – Коммутационные перенапряжения на фазе, связанной с землей, при неселективном отключении электродвигателя СДЭУ-14-29-6 в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ – 100 м: 1. $C_d=0,05$ мкФ, без учета повторных зажигания дуги; 2. $C_d = 0,05$ мкФ, с учетом повторных зажигания дуги; 3. $C_d = 0,15$ мкФ, с учетом повторных зажигания дуги; 4. $C_d = 0,25$ мкФ, с учетом повторных зажигания дуги; 5. $C_d=0,05$ мкФ; 6. $C_d=0,15$ мкФ; 7. $C_d=0,25$ мкФ.

Процесс разряда емкости C_H замедляется, что приводит к росту максимального напряжения на нагрузке до 17200 В. Кратность перенапряжений возрастает с 2,6 до 2,87. Время первой фазы переходного процесса увеличивается на $0,1 \cdot 10^{-6}$ с. Скорость нарастания напряжения снижается со 104 В/мкс до 68,8 В/мкс. Частота переходного тока $i_{2\text{свп}}$ равна 24700 Гц. Максимальное значение переходного тока составляет 227 А, а скорость изменения переходного тока также снижается и составляет 22,4 А/мкс.

Увеличение добавочной емкости до значения 0,15 мкФ не приводит к снижению числа повторных зажигания дуги в вакуумной камере. Количество повторных зажигания по-прежнему равно двум. Максимальное значение напряжения на нагрузке снизилось с 17200 В до 15860 В, однако увеличилось в 1,58 раза по сравнению с вариантом, когда расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляло 100 м. Длительность первой фазы переходного процесса практически не изменилась и составила $0,22 \cdot 10^{-3}$ с. Частота переходного тока снизилась с 24700 Гц до 14200 Гц, что привело к снижению индуктивного сопротивления до места ОЗЗ в 1,74 раза. Максимальное значение тока возросло до значения 394 А, однако скорость изменения переходного тока не изменилась и осталась на уровне 22,4 А/мкс.

С увеличением значения добавочной емкости до величины 0,25 мкФ повторное зажигание дуги в вакуумной камере не возникает.

Моделирование КП при неселективном отключении синхронного электродвигателя СДЭ2-16-46-6 мощностью 1250 кВт показало, что с увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ количество повторных зажигания дуги в вакуумной камере возрастает. Если расстояние составляет 100 м (рис.3.10а), то количество повторных зажигания равно двум, а при расстоянии 1000 м возрастает до трех (рис. 3.10 б).

При этом возрастает кратность КП: если расстояние равно 100 м, то кратность перенапряжений составляет $K_n = 2,52$, с дальнейшим ростом расстояния до 1000 м кратность перенапряжений возрастает до 5,24.

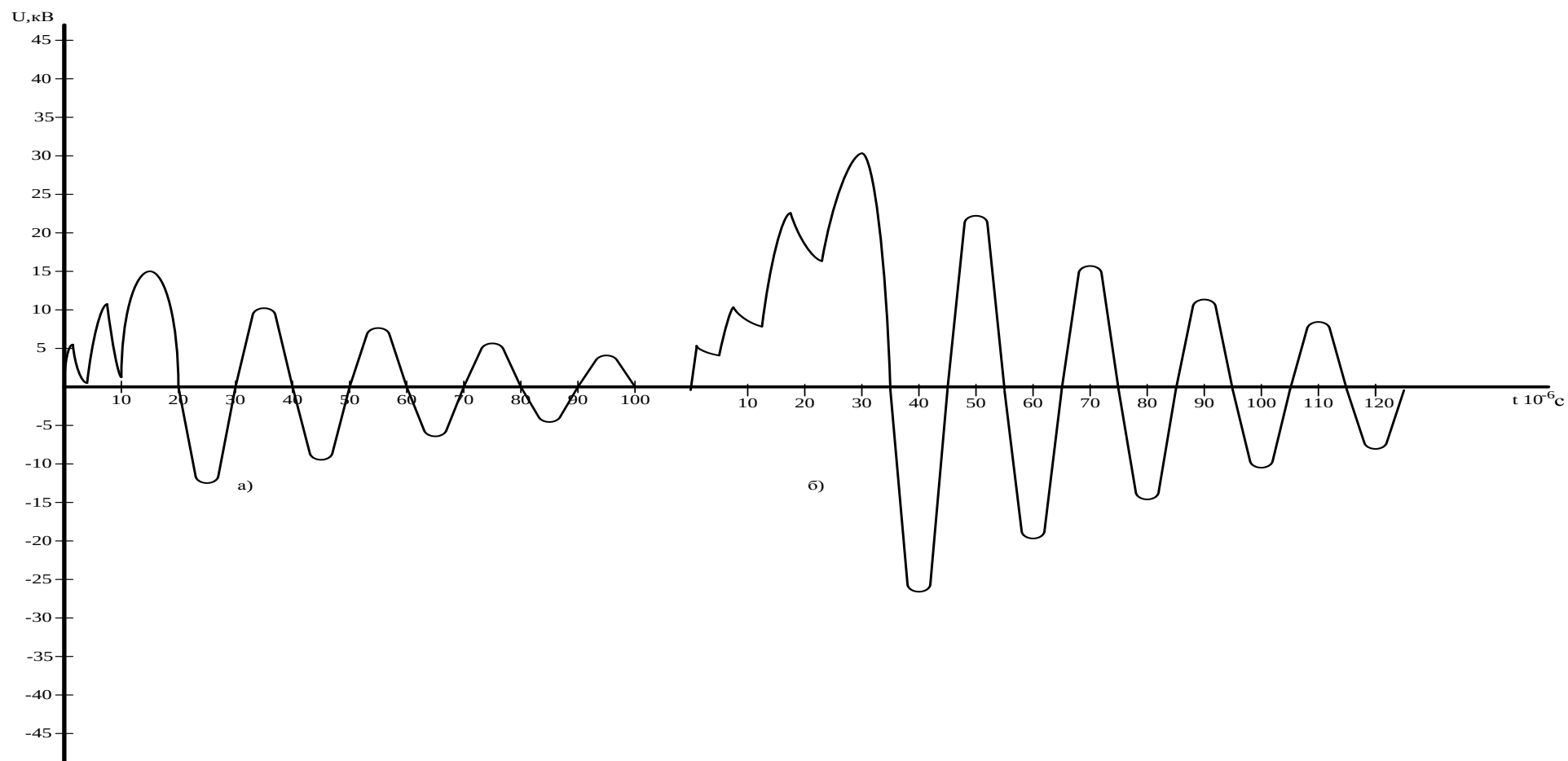


Рисунок 3.10 – Коммутационные перенапряжения при неселективном отключении электродвигателя СДЭУ-16-26-6 в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет: а) 100 м; б) 1000 м.

В табл. 3.4 приведены данные переходных процессов и кратности перенапряжений синхронных электродвигателей СДЭУ-14-29-6 мощностью 520 кВт и СДЭ2-16-46-6 мощностью 1250 кВт в режиме ОЗЗ в зависимости от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ.

Анализ данных табл. 3.4 показывает, что с ростом мощности электродвигателя число повторных зажигания дуги в вакуумной камере снижается и как следствие, снижается кратность КП. Увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ приводит к росту КП, независимо от мощности электродвигателя.

Таким образом, математическое моделирование КП, возникающих на фазе статорной обмотки электродвигателя, связанной с землей, в случае неселективного отключения показало, что с увеличением мощности электродвигателя и величины добавочной емкости на зажимах электродвигателя кратность КП снижается.

Таблица 3.4 – Параметры переходных процессов и кратности перенапряжений при неселективном отключении синхронных электродвигателей СДЭУ-14-29-6 мощностью 520 кВт и СДЭ2-16-46-6 мощностью 1250 кВт в режиме ОЗЗ для различного расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ. Ток среза 14,1 А, $C_{доб} = 0$.

№ П/П	Данные переходного процесса	СДЭУ – 14 – 29 – 6 Р=520 кВт			СДЭ2 – 16 – 46 – 6 Р=1250 кВт		
		100м	500м	1000м	100м	500м	1000м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Число повторных зажигания в вакуумной камере, шт	4	4	4	2	2	3
2	Максимальная амплитуда напряжения на нагрузке, кВ	44	47,1	50,9	15,09	20,93	31,46

1	2	3	4	5	6	7	8
3	Длительность первой фазы переходного процесса, связанной с повторным зажиганием дуги. мкс	20	29	47	14	19,5	30
4	Скорость нарастания переднего фронта волны напряжения на нагрузке, В/мкс	2200	1682	1083	1077,9	1073,3	1084,7
5	Частота свободных колебаний в контуре на нагрузке, Гц	63800	63800	63800	50000	50000	50000
6	Максимальная амплитуда переходного тока, А	486	217	154	273	121	173
7	Кратность перенапряжений, K_n	7,33	7,85	8,48	2,52	3,49	5,24
8	$t_n \cdot 10^{-6}$	1.3	2.9	4.1	2.9	6.55	9.26

Рассмотрим результаты математического моделирования КП второго этапа.

На рис. 3.11 ÷ 3.21 приведены результаты математического моделирования КП на фазе статорной обмотки электродвигателя, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ в зависимости от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, а также кратностью перенапряжения в режиме ОЗЗ.

В качестве модели использован синхронный электродвигатель типа СДЭУ-14-29-6 мощностью 520 кВт. Величина тока среза принималась равной 14,1 А.

Если выполняется условие:

$$f_{\text{ОЗЗ}} \ll f_{\text{св.н}}, \quad (3.14)$$

где: $f_{\text{ОЗЗ}}$ – частота колебаний напряжения на неповрежденной фазе сети в режиме ОЗЗ, Гц;

$f_{\text{св.н}}$ – частота свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки, Гц,

тогда соблюдаются вышеприведенные закономерности.

Увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, при одной и той же кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ, приводит к росту величины КП на зажимах электродвигателя (рис.3.11 и рис.3.12). Однако увеличение кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ, при одной и той же длине между электродвигателем и местом ОЗЗ, приводит к снижению величины КП. Например, КП на зажимах электродвигателя равны 35,5 кВ, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 100 м, а кратность перенапряжения в режиме ОЗЗ равна 1,73 (рис. 3.11 а). С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 1000 м (рис. 3.12 а) величина КП возрастает до 38,5 кВ. Рост кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ с 1,73 до 3,5 приводит к снижению КП на зажимах электродвигателя с 35,5 до 27,5 кВ и с 38,5 до 28 кВ, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ соответственно составляет 100 м (рис. 3.11) и 1000 м (рис. 3.12).

Число повторных зажигания дуги в вакуумной камере зависит не только от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, но и от кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ. С увеличением кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ число повторных зажигания дуги в вакуумной камере снижается. Например, с увеличением кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ с 1,73 до 2,5 и более приводит к сокращению числа повторных зажигания дуги в два раза.

Рассмотрим влияние величины добавочной емкости, подключенной к зажимам электродвигателя, на величину и характер КП, возникающих на фазе статорной обмотки электродвигателя, не связанной с землей.

На рис. 3.13÷3.15 показаны переходные процессы КП, возникающих на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении линии с электродвигателем в режиме металлического (глухого) ОЗЗ ($K_{\text{ОЗЗ}}=1,73$, $f_{\text{ОЗЗ}}=50$ Гц).

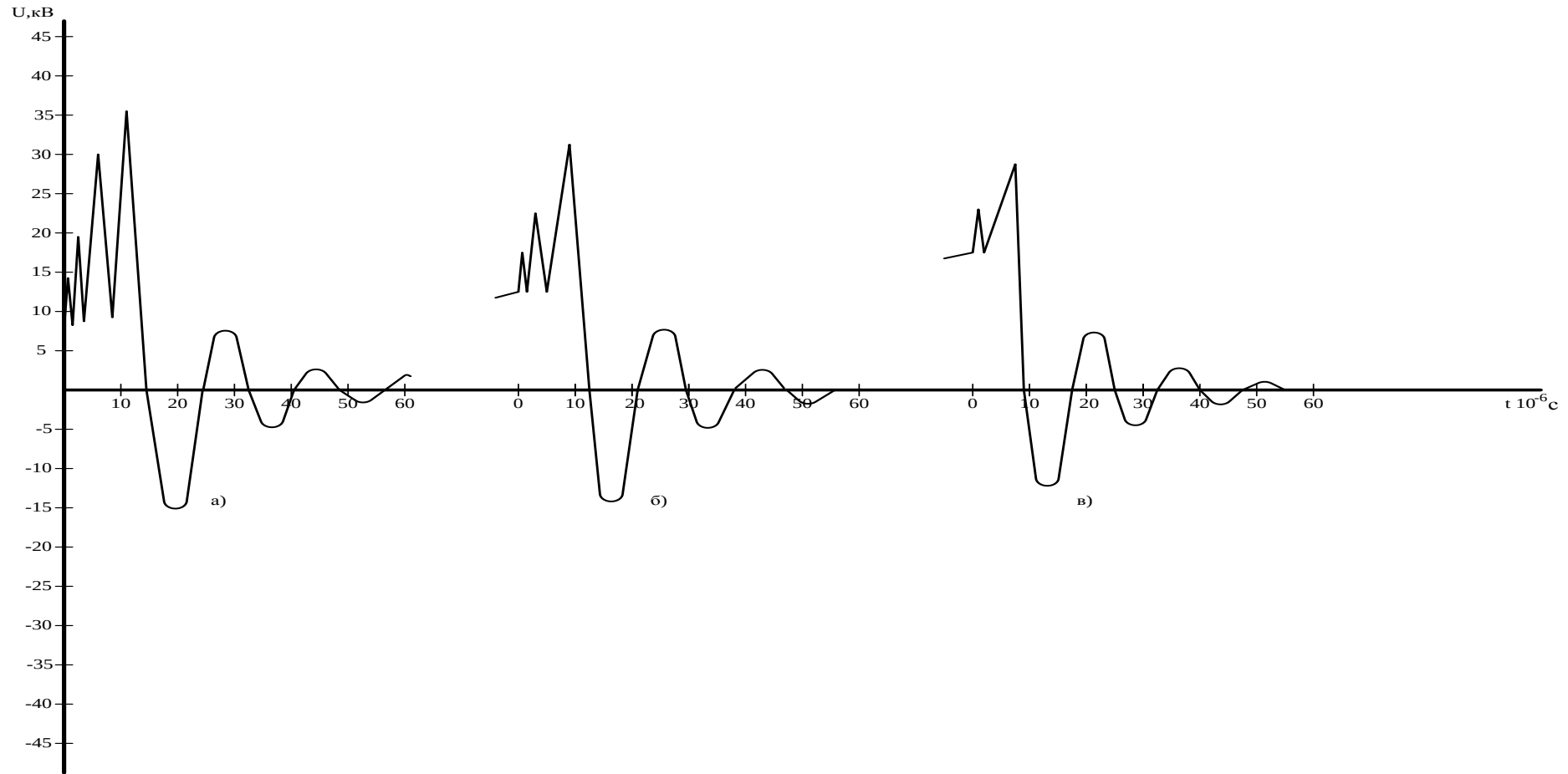


Рисунок 3.11 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 100 м: а) $K_{\text{ОЗЗ}} = 1,73$ – металлическое ОЗЗ, $f_{\text{ОЗЗ}} = 50$ Гц, $f_{\text{св.П}} = 384033$ Гц, $f_{\text{св.Н}} = 63800$ Гц; б) $K_{\text{ОЗЗ}} = 2,5$, $f_{\text{ОЗЗ}} = 2,5$ кГц, $f_{\text{св.П}} = 384033$ Гц, $f_{\text{св.Н}} = 63800$ Гц; в) $K_{\text{ОЗЗ}} = 3,5$, $f = 5$ кГц, $f_{\text{св.П}} = 384033$ Гц, $f_{\text{св.Н}} = 63800$ Гц;

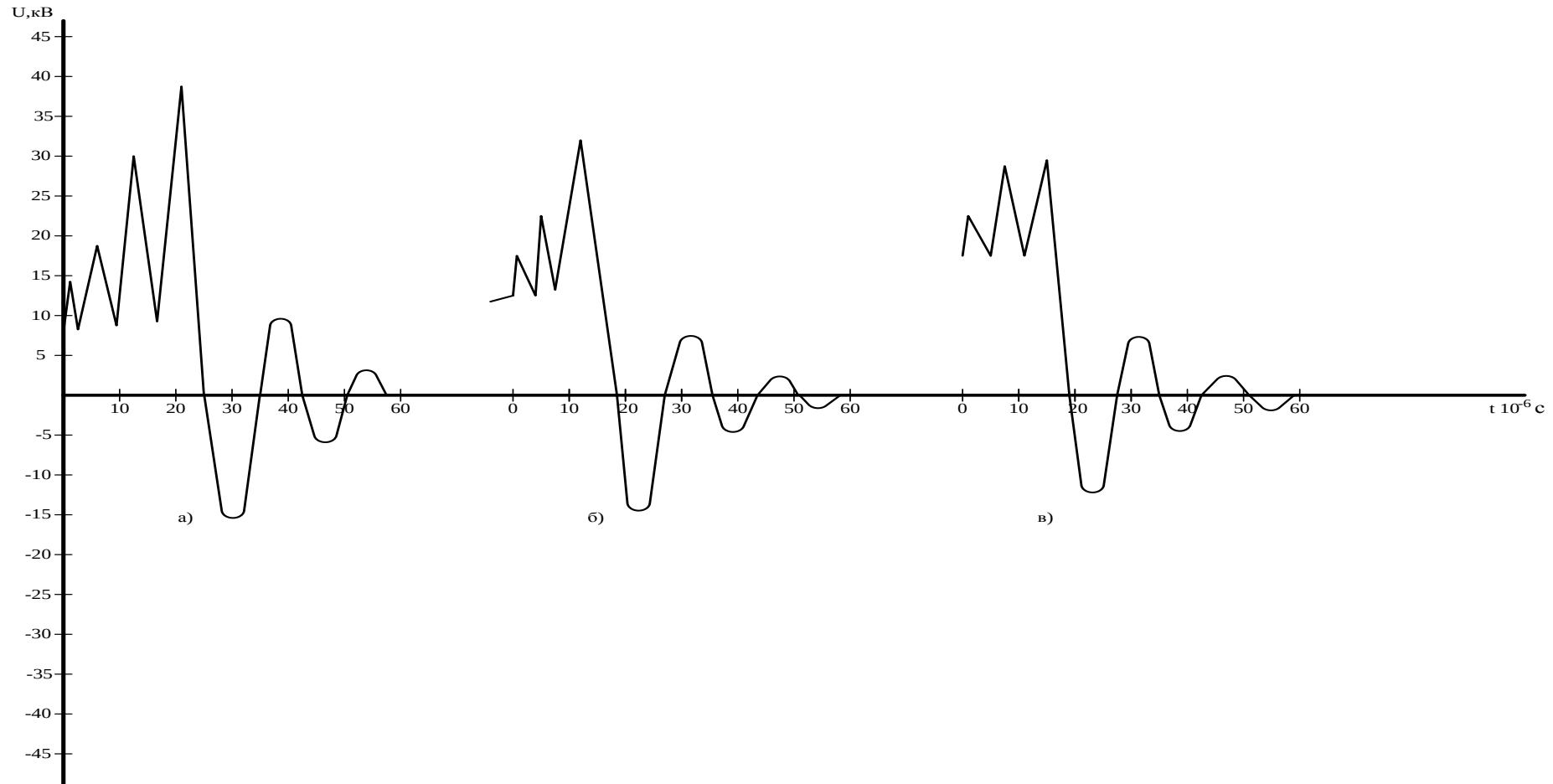


Рисунок 3.12 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 1000 м: а) $K_{\text{ОЗЗ}} = 1,73$ – металлическое ОЗЗ, $f_{\text{ОЗЗ}} = 50$ Гц, $f_{\text{св.п}} = 121440$ Гц, $f_{\text{св.н}} = 63800$ Гц; б) $K_{\text{ОЗЗ}} = 2,5$, $f_{\text{ОЗЗ}} = 2,5$ кГц, $f_{\text{св.п}} = 121440$ Гц, $f_{\text{св.н}} = 63800$ Гц; в) $K_{\text{ОЗЗ}} = 3,5$, $f = 5$ кГц, $f_{\text{св.п}} = 121440$ Гц, $f_{\text{св.н}} = 63800$ Гц;

Увеличение емкости на зажимах электродвигателя до 0,05 мкФ ($f_{\text{св.н}} = 5,27$ кГц) и до 0,15 мкФ ($f_{\text{св.н}} = 3,65$ кГц) соответственно приводит к снижению кратности КП с 5,9 до 4,08 и до 3,17, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100 м. С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 1000 м кратность КП увеличивается с 4,08 до 4,41, если величина емкости равна 0,05 мкФ, и с 3,17 до 4,03, если величина емкости равна 0,15 мкФ. Отметим, что увеличение емкости на зажимах электродвигателя до 0,15 мкФ приводит к сокращению числа повторных зажигания дуги в вакуумной камере в 3 раза, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 100 м, и практически не влияет на количество повторных зажигания, если расстояние составляет 1000 м.

Увеличение емкости до величины 0,25 мкФ ($f_{\text{св.н}} = 2,37$ кГц) полностью устраняет повторное зажигание дуги в вакуумной камере и приводит к снижению кратности КП до 2,08 вне зависимости от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ (рис. 3.15).

Рассмотрим влияние частоты колебаний напряжения на неповрежденной фазе сети ($f_{\text{озз}}$) в режиме ОЗЗ на величину и характер КП.

На рис. 3.16÷3.18 показаны переходные процессы КП в режиме дугового ОЗЗ. Кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ составила $K_{\text{озз}} = 2,5$, а частота колебаний напряжения равна 2,5 кГц. Увеличение емкости до 0,05 мкФ приводит к снижению частоты свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки до 5,27 кГц, и кратность КП уменьшается с 5,33 (рис. 3.11 б) до 2,92 (рис. 3.16 а), если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составило 100 м, и с 5,58 (рис. 3.12, б) до 4,16 (рис. 3.16 б), если расстояние составило 1000 м. Увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ со 100 м до 1000 м приводит к росту КП с 2,92 до 4,16. Количество повторных зажигания дуги в вакуумной камере осталось неизменным

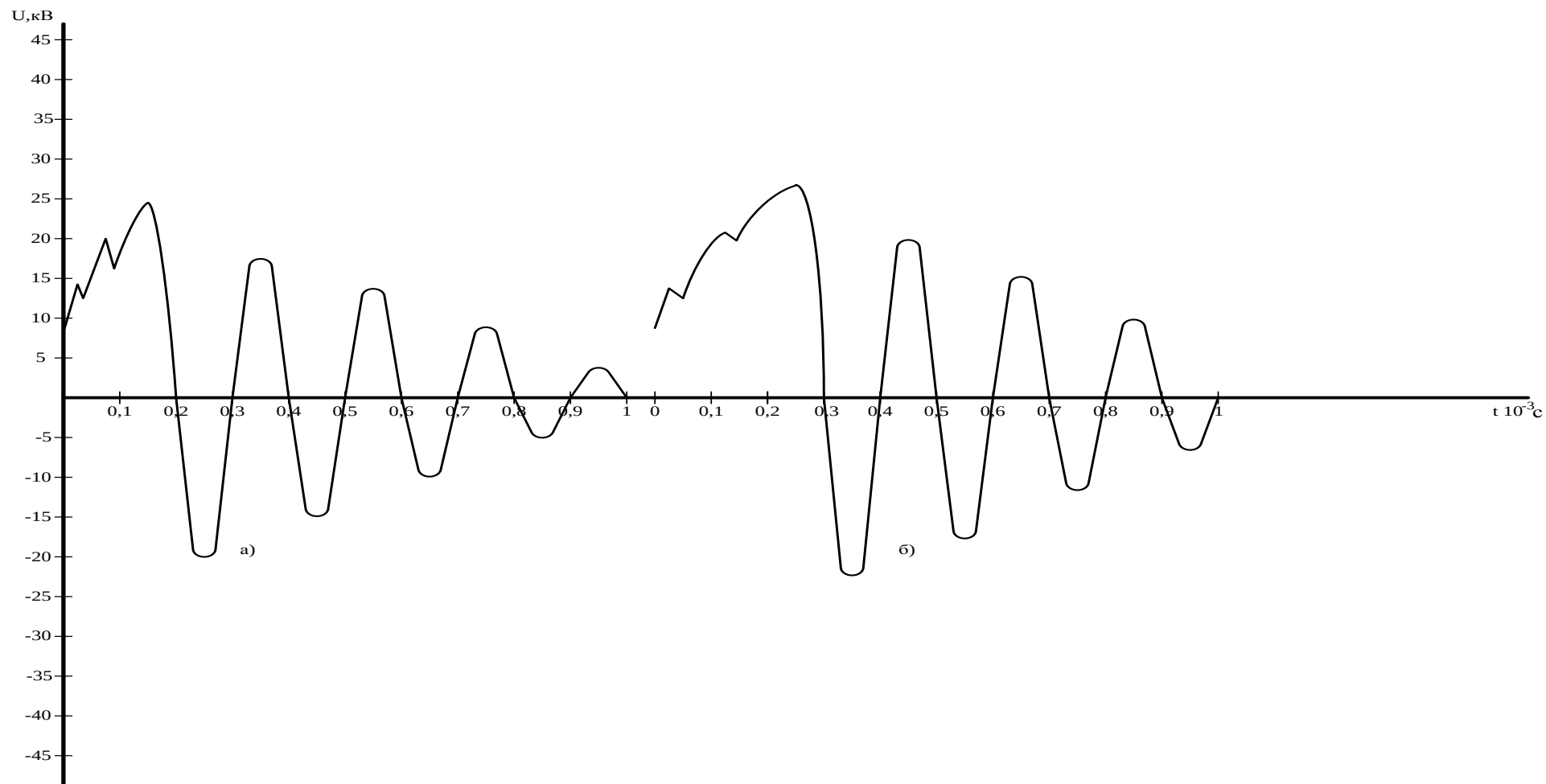


Рисунок 3.13 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{\text{озз}} = 1,73$, $C_{\text{доб}} = 0,05$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

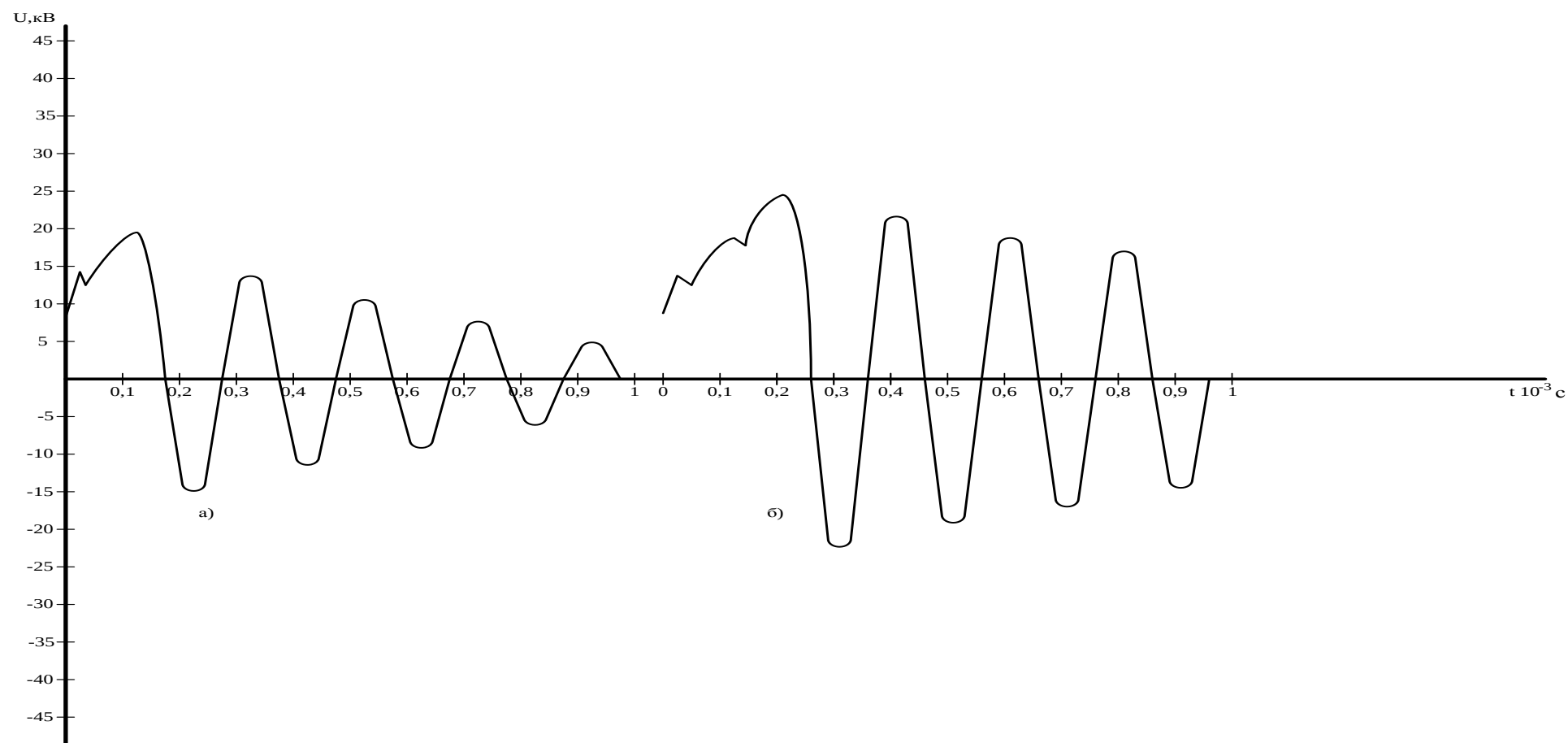


Рисунок 3.14 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{\text{ОЗЗ}} = 1,73$, $C_{\text{доб}} = 0,15$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

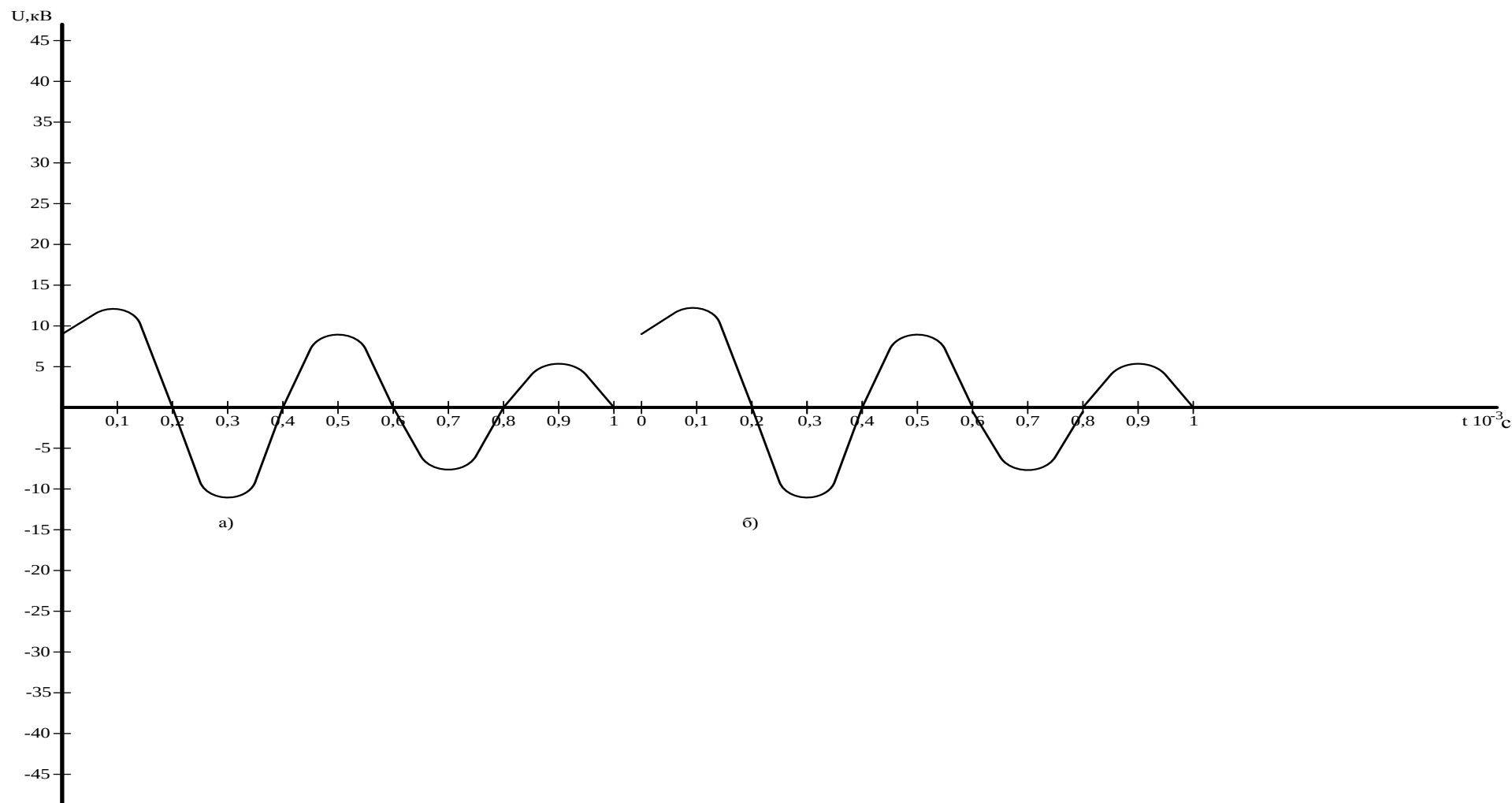


Рисунок 3.15 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{OЗЗ} = 1,73$, $C_{доб} = 0,25$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

и равнялось двум. Дальнейшее увеличение емкости на зажимах электродвигателя до 0,15 мкФ и до 0,25 мкФ привело к дальнейшему снижению частоты свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки соответственно до 3,65 кГц и 2,37 кГц. Кроме этого, произошло более глубокое ограничение амплитуды коммутационного импульса:

- с 32 кВ, $K_{п} = 5,33$ (рис. 3.11 б) до 15,7 кВ, $K_{п} = 2,61$, если $C_{доб} = 0,15$ мкФ, а расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ равно 100 м (рис. 3.17 а);
- с 33,5 кВ, $K_{п} = 5,88$ (рис. 3.12 б) до 16,3 кВ, $K_{п} = 2,72$ (рис. 3.17 б), если $C_{доб} = 0,15$ мкФ, а расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ равно 1000 м;
- с 32 кВ, $K_{п} = 5,33$ (рис. 3.11 б) и с 33 кВ, $K_{п} = 5,88$ (рис. 3.12 б) до 14 кВ, $K_{п} = 2,36$ (рис. 3.18), если $C_{доб} = 0,25$ мкФ;

В последнем случае увеличение сосредоточенной емкости до 0,25 мкФ позволило исключить негативное влияние расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ на величину КП, так как максимальная кратность КП для расстояния 100 м и 1000 м имеет одно и то же значение, равное 2,36.

На рис. 3.19 показаны переходные процессы КП в режиме дугового ОЗЗ: $K_{озз} = 3,5$, $f_{озз} = 5$ кГц при условии, что емкость на зажимах электродвигателя равна 0,05 мкФ, за счет добавочной емкости. В этом случае частота свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки составляет 5,27 кГц. Соблюдается условие (3.14), т.е. увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ приводит к росту кратности КП. Если расстояние составляет 100 м или 1000 м, то кратность КП соответственно равна 3,41 и 4,76. Сопоставление вариантов с добавочной емкостью и без добавочной емкости (рис. 3.11 в; рис. 3.12 в) показывает, что увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя от 0 до 0,05 мкФ за счет добавочной емкости приводит к снижению кратности КП в 1,88 раза, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100 м, и практически не снижает кратность КП, если расстояние равно 1000 м.

Исследования показали, что подобный эффект “неограничения”, а в некоторых случаях “увеличения” кратности КП за счет увеличения емкости на зажимах электродвигателя наблюдается в том случае, если срез тока в вакуумной камере происходит в момент смены полярности напряжения неповрежденной фазы сети в режиме дугового ОЗЗ. В этом случае происходит смена знака у первого члена формулы (3.12). Два члена в формуле (3.12) будут иметь одинаковый знак, т.е. будут складываться, что и приводит к увеличению напряжения на нагрузке $U_{н.пер}(t)$. Подобный эффект усиливается, если не выполняется условие (3.14). Увеличение емкости до 0,15 мкФ, за счет добавочной емкости, на зажимах электродвигателя приводит к тому, что частота свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки снизится до значения 3,65 кГц. Это приводит к несоблюдению условия (3.14). На рис. 3.20 показаны переходные процессы КП для данного случая. Из рис. 3.20а видно, что максимальное значение амплитуды коммутационного импульса равно 24,5 кВ, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100м. Это на 4 кВ выше, чем в предыдущем случае, когда величина добавочной емкости на зажимах электродвигателя была равна 0,05 мкФ. С увеличением расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ до 1000 м (рис. 3.20 б) максимальное значение коммутационного импульса достигает значения 35 кВ, что на 6,5 кВ выше, чем в случае, когда добавочная емкость была равна 0,05 мкФ (рис. 3.19 б). Это говорит о том, что искусственное увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6 до величины 0,15 мкФ и несоблюдение условия (3.14) приводит не к снижению кратности КП в режиме дугового ОЗЗ, а к ее увеличению.

Дальнейшее увеличение емкости на зажимах электродвигателя до 0,25 мкФ за счет добавочной емкости приводит к тому, что частота свободных колебаний электромагнитной энергии в контуре нагрузки снижается до 2,37 кГц. Это вновь приводит к несоблюдению условия (3.14), т.е. не происходит эффективного ограничения амплитуды коммутационного импульса.

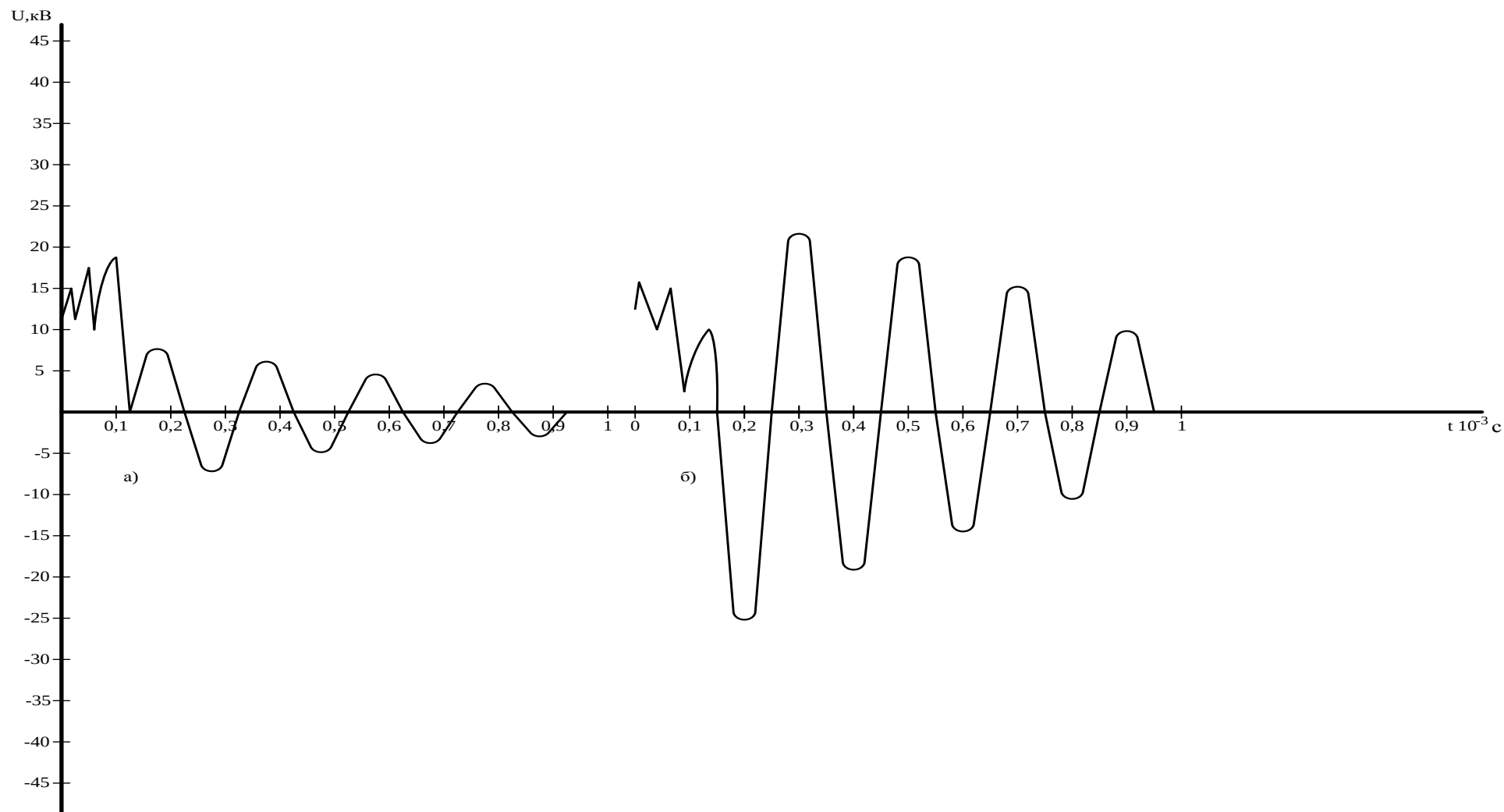


Рисунок 3.16 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{033} = 2,5$, $f_{033} = 2,5$ кГц, $C_{доб} = 0,05$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

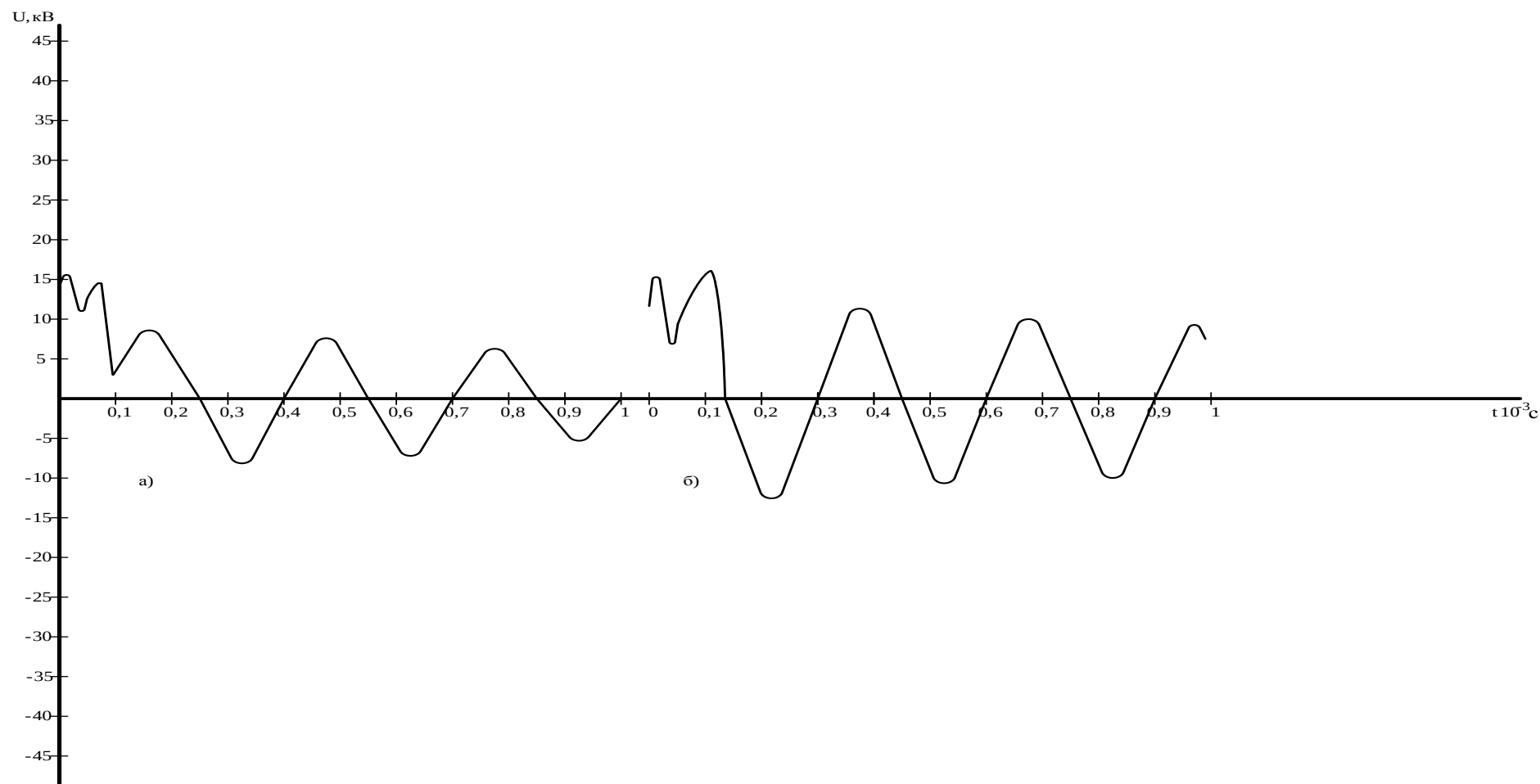


Рисунок 3.17 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{033} = 2,5$, $f_{033} = 2,5$ кГц, $C_{доб} = 0,15$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

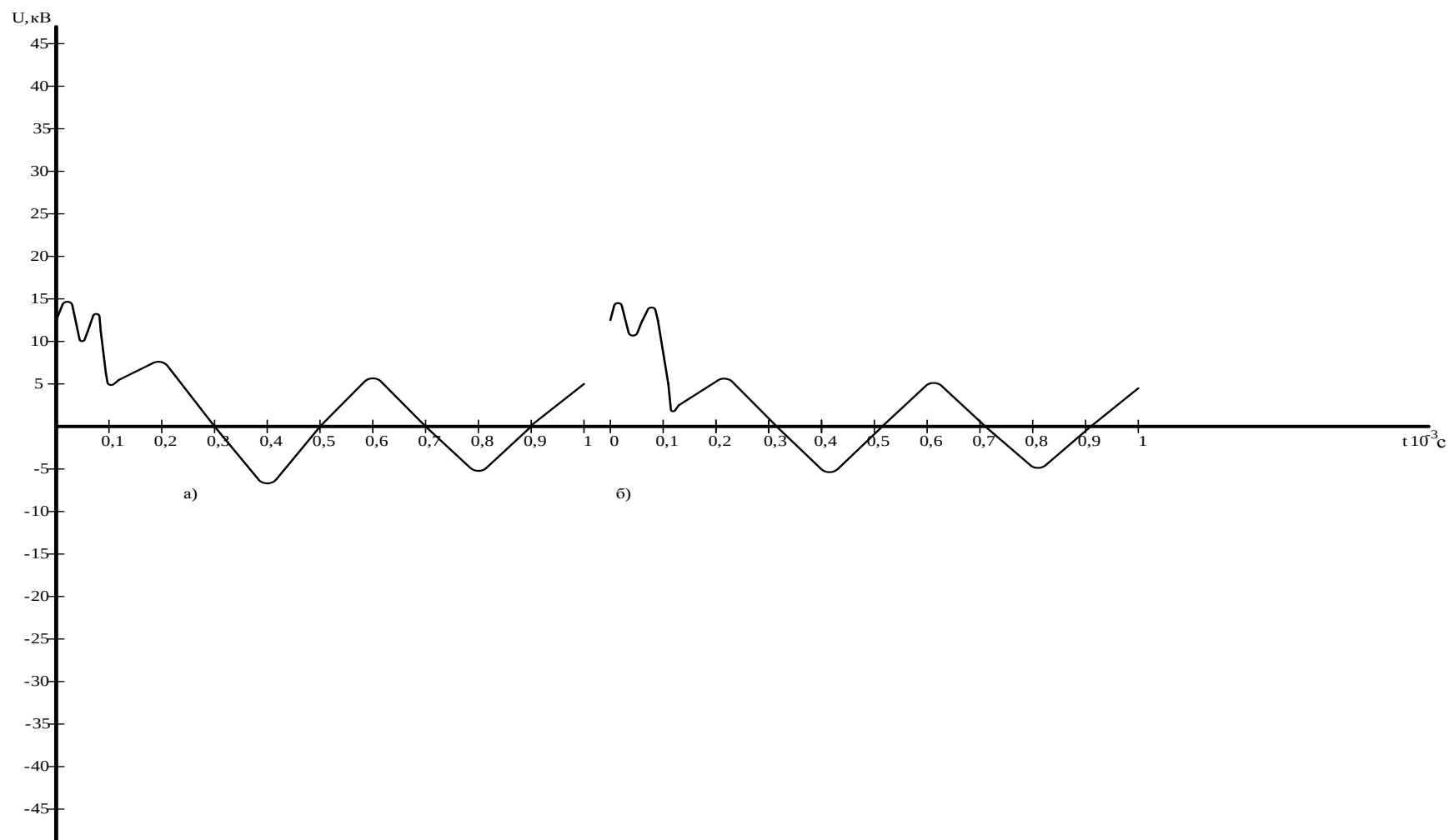


Рисунок 3.18 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{033} = 2,5$, $f_{033} = 2,5$ кГц, $C_{доб} = 0,25$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

Переходный процесс изменения напряжения на нагрузке для данного случая показан на рис. 3.21. Если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100 м, то увеличение емкости на зажимах электродвигателя до 0,25 мкФ приводит к снижению кратности КП с 4,58 до 3,67. Однако увеличивается кратность перенапряжений с 3,42 до 3,67 по сравнению с вариантом, когда емкость на зажимах электродвигателя была равна 0,05 мкФ.

Увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ приводит к росту кратности КП с 3,67 до 4,75, т.е. не наблюдается ликвидация зависимости кратности КП от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, которое наблюдалось для случаев, когда выполнялось условие (3.14).

Таким образом, увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, за счет добавочной емкости, приводит к снижению кратности КП, а при достижении величины, равной 0,25 мкФ, ликвидирует зависимость кратности перенапряжений от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, если соблюдается условие (3.14).

В противном случае увеличение емкости на зажимах электродвигателя не приводит к ограничению КП, а в некоторых случаях ($C_{доб} = 0,15$ мкФ) может вызывать увеличение амплитуды коммутационного импульса.

Если добавочная емкость на зажимах электродвигателя отсутствует, то на величину КП, возникающих на фазе статорной обмотки электродвигателя, не связанной с землей, оказывают существенное влияние следующие факторы: кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ. Увеличение кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ приводит к снижению КП, а увеличение расстояния приводит к росту КП.

В табл. 3.5 приведены основные параметры переходных процессов КП, возникающих на фазе статорной обмотки, не связанной с землей, электродвигателя СДЭУ – 12 – 29 – 6 в случае неселективного отключения его от сети в режиме ОЗЗ в зависимости от расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ и величиной добавочной емкости на зажимах электродвигателя.

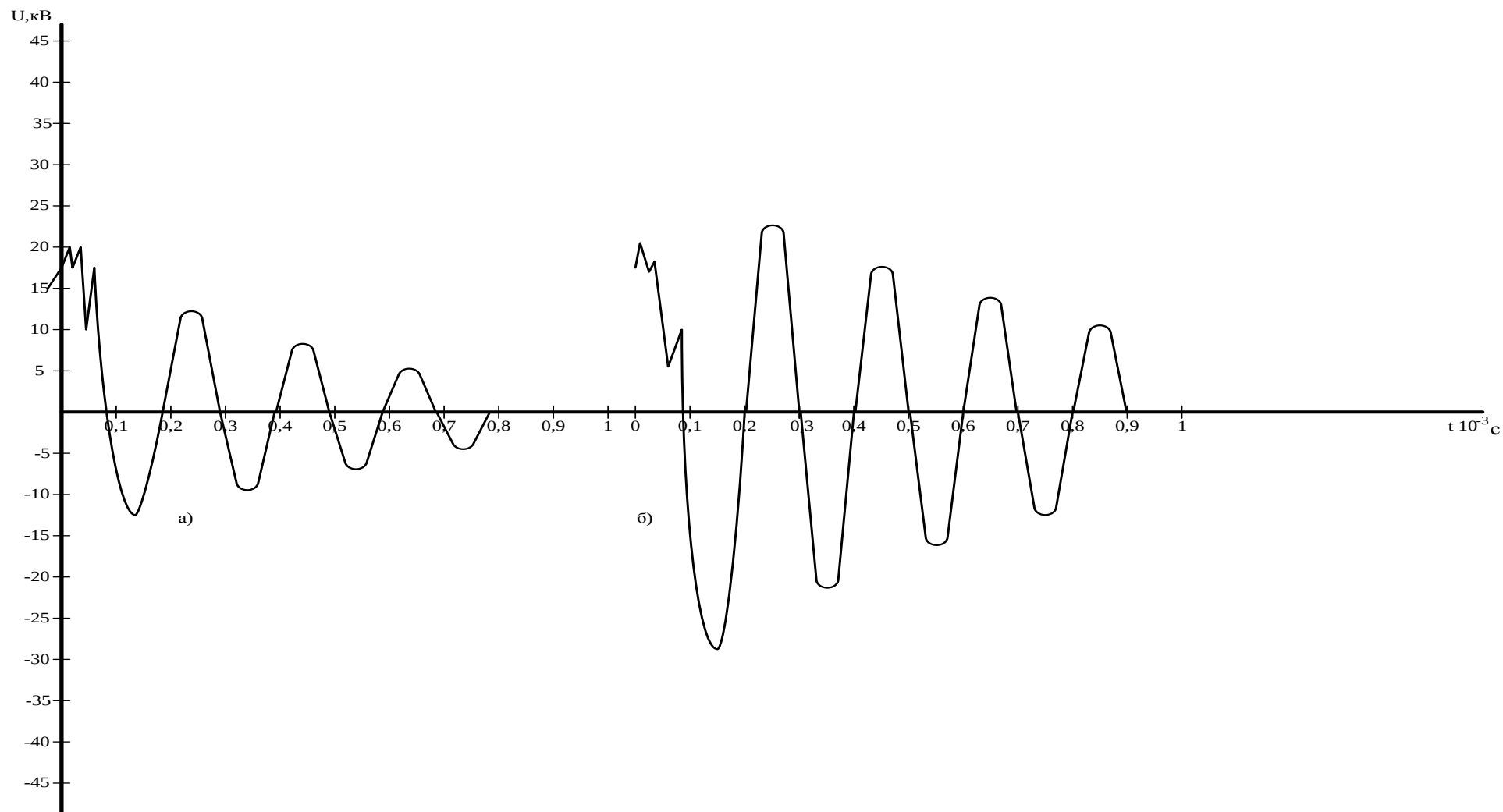


Рисунок 3.19 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{\text{ОЗЗ}} = 3,5$, $f_{\text{ОЗЗ}} = 5$ кГц, $C_{\text{доб}} = 0,05$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

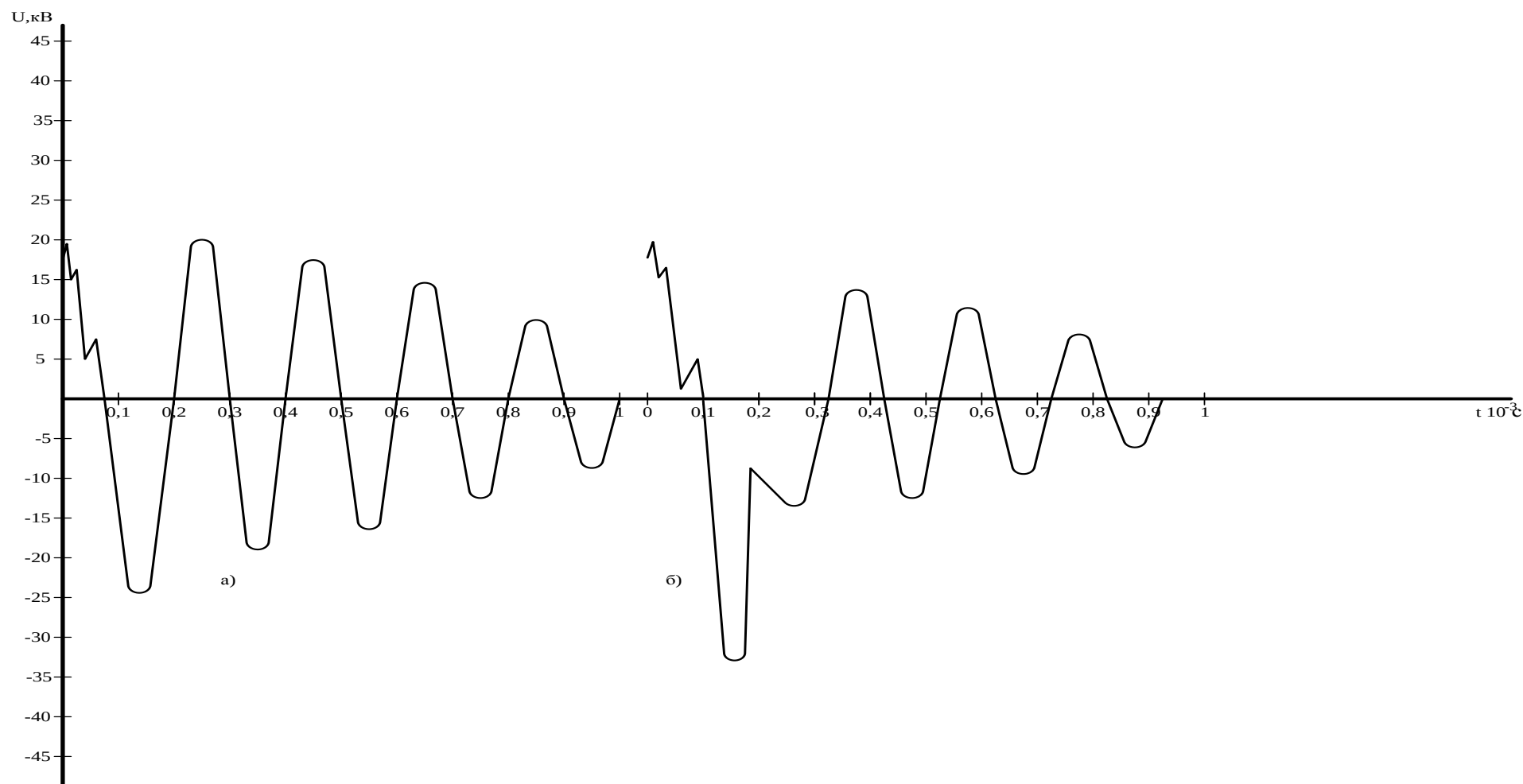


Рисунок 3.20 – Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{\text{ОЗЗ}} = 3,5$, $f_{\text{ОЗЗ}} = 5$ кГц, $C_{\text{доб}} = 0,15$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

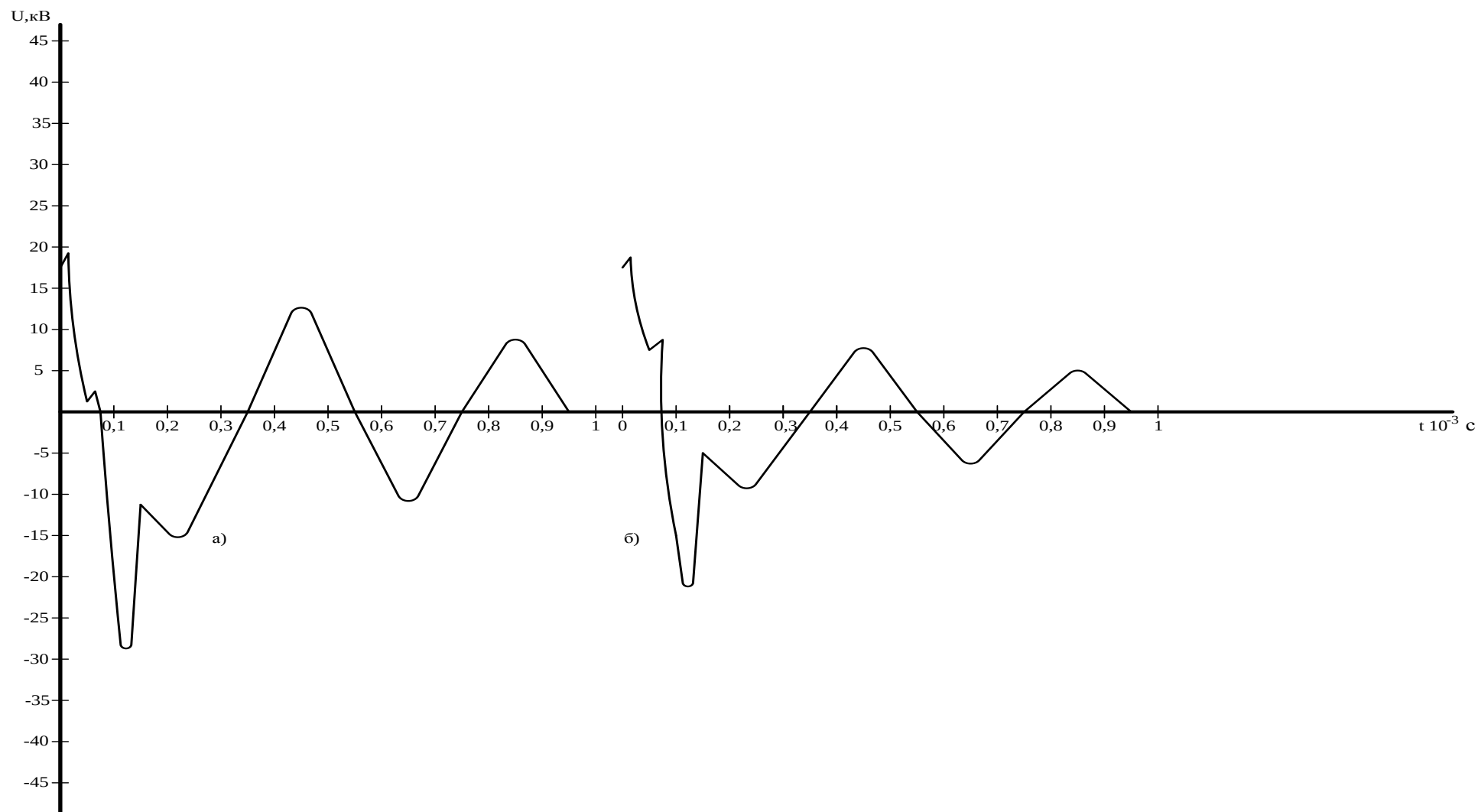


Рисунок 3.21 Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6, не связанной с землей, при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1 А, $K_{033} = 3,5$, $f_{033} = 5$ кГц, $C_{доб} = 0,25$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100 м, б) 1000 м.

Таблица 3.5 – Параметры переходных процессов КП, возникающих на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, которая не связана с землей, в случае неселективного отключения его от сети в режиме ОЗЗ в зависимости от добавочной емкости на зажимах электродвигателя, расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ и кратностью перенапряжений в режиме ОЗЗ.

Доб. емкость, мкФ		0		0,05		0,15		0,25	
1.	Расстояние, м $K_{OЗЗ}$	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000
2. Частота колебания напряжения на неповрежденной фазе, $f_{OЗЗ}$, Гц	1,73	50	50	50	50	50	50	50	50
	2,5	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	3,5	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
3. Частота свободных колебаний электромагнитной энергии в откл. контуре нагрузки, $f_{св.н}$, Гц	1,73	63800	63800	5270	5270	3650	3650	2370	2370
	2,5	63800	63800	5270	5270	3650	3650	2370	2370
	3,5	63800	63800	5270	5270	3650	3650	2370	2370
4. Соблюдения условия $f_{OЗЗ} \ll f_{св.н}$	1,73	да	да	да	да	да	да	да	да
	2,5	да	да	да	да	да	да	нет	нет
	3,5	да	да	нет	нет	нет	нет	нет	нет
5. Число повторных зажигания дуги в вакуумной камере, шт	1,73	3	3	2	2	1	2	0	0
	2,5	2	3	2	2	2	2	2	2
	3,5	1	2	2	3	3	4	3	3

6. Максимальная амплитуда напряжения на нагрузке, кВ	1,73	35,5	38,5	24,5	26,5	19	24,2	12,5	12,5
	2,5	32,0	33,5	17,5	25,0	15,7	10,3	14,0	14,0
	3,5	27,5	28	20,5	28,5	24,5	35,0	22,0	28,5
7. Длительность первой фазы переходного процесса, связанной с повторным зажиганием дуги, мкс	1,73	12	21,5	150	250	120	210	100	100
	2,5	9	14	110	200	165	225	200	230
	3,5	5	14	140	150	150	165	140	150
8. Скорость нарастания переднего фронта волны напряжения на нагрузке, В/мкс	1,73	2958,3	1790,7	163,3	106,0	158,3	115,2	125,0	125,0
	2,5	3555,6	2392,9	159,1	125,0	95,2	72,4	70	60,9
	3,5	5500	2000	146,4	120	163,3	2121,1	157,1	190
9. Кратность коммутационных перенапряжения, K_{Π}	1,73	5,92	6,42	4,08	4,42	3,16	4,03	2,08	2,08
	2,5	5,33	5,58	2,92	4,16	2,62	2,71	2,33	2,33
	3,5	4,58	4,67	3,42	4,75	4,08	5,83	3,67	5,7

3.5 Сравнение теоретических и экспериментальных исследований

Для подтверждения достоверности теоретических исследований были выполнены измерения КП в режиме ОЗЗ на зажимах статорной обмотки двух синхронных электродвигателей, которые не селективно отключались от сети напряжением 6 кВ в режиме ОЗЗ. Первый электродвигатель находится в экс-

плутации на угольном разрезе “Березовский – 1”, а второй на ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”.

На угольном разрезе “Березовский – 1” в сетях 6 кВ был выполнен один эксперимент, в котором имитировалось металлическое однофазное замыкание на землю ($K_{033} = 1,73$), расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляло 980 м (воздушная линия – 870 м; кабельная линия 110 м). В ОАО “Ачинский глиноземный комбинат” в сетях 6 кВ имитировалось дуговое ОЗЗ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составило 95 м в виде кабельной линии.

В первом эксперименте добавочная емкость на зажимах электродвигателя отсутствовала, а во втором эксперименте к зажимам электродвигателя были подключены конденсаторы типа КЭП – 6,6 – 0,25 – 1У2 емкостью 0,25 мкФ. Конденсаторы были собраны по схеме “звезда” с заземленной нейтральной точкой.

Количество опытов в каждом эксперименте не превышало двух. Ограниченное количество опытов было связано с высокой кратностью КП, которые могут возникнуть на зажимах электродвигателя. Искусственное ОЗЗ создавалось на фазе “А”.

В табл. 3.6 приведены результаты экспериментальных исследований, а в табл. 3.7 экспериментальные данные сравниваются с результатами теоретических исследований. Данные табл. 3.7 показывают, что отклонение экспериментальных данных от теоретических исследований не превышает 7,3 %. Это указывает на достаточно высокую достоверность теоретических исследований.

Таблица 3.6 – Результаты измерений КП в режиме ОЗЗ.

№ ПП	Предприятие		Угольный разрез “Березовский – 1”		ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”			
1	Тип выключателя		Вакуумный ВВ/TEL – 10 – 10/1000		ВВТЭ – 10 – 12,5/630			
2	ЛЭП		(АС-70), L=870 м, КГЭ(3*95+1*25), L=110м		АСБ (3*95), L=95 м			
3	Добавочная емкость, мкФ		C _{доб} =0		C _{доб} =0		C _{доб} =0,25	
4	Номер опыта		1	2	1	2	1	2
5	Перенапряжения на фазах сети в режиме ОЗЗ	A	0	0	0	0	0	0
		B	1,73	1,73	2,46	2,5	2,44	1,48
		C	1,73	1,73	2,52	2,48	1,8	2,52
6	Зафиксированные напряжения на фазах статорной обмотки электродвигателя при отключении от сети, кВ	A	49,0	43	42	45	4,3	4,4
		B	37,0	21,0	31,0	8,0	13,5	8,0
		C	12,0	25,0	16,0	29,0	9,5	15,0
7	Кратность перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя	A	8,2	7,2	7,0	7,5	0,7	0,7
		B	6,2	3,5	5,2	1,3	2,3	1,3
		C	2,0	4,2	2,7	4,8	1,6	2,5
8	Максимальная кратность перенапряжений на фазе связанной с землей		8,2		7,5		0,7	
9	Максимальная кратность перенапряжений на фазе не связанной с землей		6,2		5,2		2,5	

Таблица 3.7 – Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических исследований коммутационных перенапряжений на зажимах электродвигателя типа СДЭУ – 14 – 29 – 6 в режиме ОЗЗ

№П/П	Общие критерии эксперимента и теоретических исследований	Максимальная кратность коммутационных перенапряжений, $K_{\text{п}}$				Отклонение результатов, %	
		Теоретические исследования		Экспериментальные исследования			
		Фаза связана с землей	Фаза не связана с землей	Фаза связана с землей	Фаза не связана с землей	Фаза связана с землей	Фаза не связана с землей
1	$C_{\text{доб}}=0$ мкФ, $L \approx 1000$ м, $K_{\text{озз}}=1,73$	8,48	6,42	8,2	6,2	3,4	3,5
2	$C_{\text{доб}}=0$ мкФ, $L \approx 100$ м, $K_{\text{озз}} \approx 2,5$	7,33	5,33	7,5	5,2	2,3	2,5
3	$C_{\text{доб}}=0,25$ мкФ, $L \approx 100$ м, $K_{\text{озз}} \approx 2,5$	0,75	2,33	0,7	2,5	7,1	7,3

Выводы

На основании описанных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. С физической точки зрения максимальные КП в режиме ОЗЗ возникают в случае неселективного отключения линии с двигательной нагрузкой в той фазе, которая была связана с землей в момент горения дуги, т.к. заряд на емкости данной фазы стремится к нулю.
2. Математическое моделирование КП без учета повторных зажигания дуги в вакуумной камере в режиме ОЗЗ подтвердило первый вывод и показало, что на величину и характер КП в режиме ОЗЗ серьезное влияние оказывают следующие факторы: величина присоединенной емкости на зажимах электродвигате-

ля; величина тока среза в вакуумной камере выключателя; мощность электродвигателя; кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ.

3. При неселективном отключении синхронного электродвигателя типа СДЭУ – 14 – 29 – 6 мощностью 520кВт в режиме ОЗЗ кратность КП на фазе, связанной с землей, с изменением добавочной емкости на зажимах электродвигателя от 0 до 0,25 мкФ изменяется с 7,29 до 0,6, при этом частота коммутационного импульса изменяется с 63,8 кГц до 2,37 кГц.

4. В случае неселективного отключения электродвигателя в режиме ОЗЗ увеличение тока среза в вакуумной камере выключателя с 5,66 до 14,1 А приводит к изменению кратности КП на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, которая была связана с землей, с 2,83 до 7,29 при условии, что добавочная емкость на зажимах электродвигателя отсутствует.

5. Рост мощности синхронного электродвигателя с 520 кВт до 1250 кВт приводит к снижению КП на фазе, связанной с землей, с 7,29 до 2,41.

6. С ростом кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ с 1,73 до 3,6 при неселективном отключении электродвигателя кратность КП на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6, не связанной с землей, снижается с 5,83 до 4,58.

7. Математическое моделирование КП, возникающих на зажимах статорной обмотки электродвигателя, связанной с землей, с учетом повторных зажиганий дуги в вакуумной камере при неселективном отключении в режиме ОЗЗ показало, что на величину КП оказывают серьезное влияние величина присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, ток среза, мощность электродвигателя, кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ и расстояние между местом ОЗЗ и электродвигателем.

8. С увеличением расстояния между электродвигателем СДЭУ – 14 – 29 – 6 и местом ОЗЗ со 100 до 1000 м КП на фазе статорной обмотки электродвигателя, связанной с землей, при неселективном отключении, возрастают с 44 кВ до 50,9 кВ (ток среза равен 14,1 А), что соответствует росту кратном КП с 7,33 до 8,48. Число повторных зажиганий дуги в вакуумной камере равно 4.

9. Увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя СДЭУ – 14 – 29 – 6 за счет подключения добавочной емкости от 0,05 мкФ до 0,25 мкФ показало, что КП, возникающие на фазе статорной обмотки электродвигателя, связанной с землей, в случае неселективного отключения в режиме ОЗЗ, соответственно снижаются до 15640 В и до 4500 В, если расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ не превышает 100 м. При добавочной емкости $C_{доб} = 0,25$ мкФ повторные зажигания дуги не возникают.

10. Увеличение мощности электродвигателя или снижение величины тока среза в вакуумной камере выключателя снижает кратность перенапряжений на фазе статорной обмотки, связанной с землей.

11. Математическое моделирование КП, возникающих на фазе статорной обмотки, не связанной с землей, с учетом повторных зажиганий дуги в вакуумной камере при неселективном отключении электродвигателя в режиме ОЗЗ показало, что на величину и характер КП оказывают серьезное влияние не только величина присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, ток среза, мощность электродвигателя, кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ, расстояние между местом ОЗЗ и электродвигателем, но и соотношение между частотой колебаний напряжения на неповрежденной фазе сети в режиме ОЗЗ и частотой свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки.

12. Если соблюдается условие (3.14), то увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, увеличение мощности электродвигателя, рост кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ и снижение тока среза в вакуумной камере выключателя приводят к снижению кратности КП, которые возникают на фазе статорной обмотки, не связанной с землей, в случае неселективного отключения электродвигателя от сети в режиме ОЗЗ.

13. Увеличение расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ способствует росту кратности КП, если величина присоединенной емкости на зажимах электродвигателя менее 0,25 мкФ, однако с увеличением присоединенной ем-

кости до 0,25 мкФ ликвидирует влияние расстояния между электродвигателем и местом ОЗЗ, если выполняется условие (3.14).

14. Несоблюдение условия (3.14) и рост присоединенной емкости на зажимах электродвигателя может привести к увеличению КП на фазе статорной обмотки электродвигателя, не связанной с землей, в случае неселективного отключения электродвигателя от сети в режиме ОЗЗ.

15. Отклонение результатов теоретических исследований от экспериментальных данных не превышает 7,5 %, что указывает на достоверность теоретических исследований.

4. Разработка комплекса мер по снижению однофазных замыканий на землю

Проведен сравнительный анализ эффективности защитных средств и устройств от КП. Разработан универсальный резистивно-емкостной ограни-

читель. Сделан анализ эффективности существующих систем защиты от однофазных замыканий на землю. Научно обосновано совместное использование RC-ограничителя с частичным заземлением нейтрали сети 6–10 кВ через резистор.

Из приведенных исследований и практики следует, что основными причинами возникновения ОЗЗ в сетях 6–10 кВ промышленных предприятий является интенсивное старение изоляции высоковольтных электродвигателей и кабельных линий, а также воздействие на ослабленную изоляцию внутренних перенапряжений, в первую очередь КП, т.к. по их вине возникает 36 % ОЗЗ. Нелегитимная работа защит от ОЗЗ может привести к появлению максимальных КП на зажимах высоковольтных электродвигателей, что приводит к множественным повреждениям в распределительных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий.

Таким образом, для сокращения числа ОЗЗ в сетях 6–10 кВ промышленных предприятий необходимо разработать комплексный метод, который бы позволил эффективно ограничивать внутренние перенапряжения, в первую очередь, коммутационные, и обеспечивать высокую селективность в работе защит от ОЗЗ.

Для решения данной задачи проанализируем эффективность существующих средств защиты от КП с учетом того, что допустимая кратность КП для электродвигателей, трансформаторов и кабельных линий не должна превышать значения 1,8; 2,8 и 2,8 соответственно. В первую очередь проанализируем существующие средства и способы защиты от КП применительно к электродвигателям, т.к. электродвигатели менее устойчивы к КП.

4.1 Анализ существующих устройств защиты от перенапряжений

Как было отмечено выше, при коммутации вакуумными коммутационными аппаратами сетевых электродвигателей в режиме холостого хода возникают перенапряжения, превышающие гарантированную импульсную прочность изоляции электродвигателей, длительно находящихся в эксплуатации. Для дан-

ной категории электрических машин даже незначительное превышение возникающего напряжения является опасным.

Для ограничения КП применительно к высоковольтным двигателям применяют схемные решения и устройства защиты. Рассмотрим некоторые из них.

Для уменьшения величины амплитуды КП при оперативных коммутациях допускается вместо выключателя применять контактор, у которого уровни КП существенно ниже, в том случае, если его контактная система способна отключать токи короткого замыкания. Если вакуумный контактор не может отключить токи короткого замыкания, то возможно использование последовательного включения обоих коммутационных аппаратов. Однако данная конструкция имеет значительные габариты, что является ее существенным недостатком. Другим недостатком являются более высокие капитальные затраты на ремонт и обслуживание данной конструкции, чем у вакуумного выключателя с защитным устройством [63].

Авторы работ [2, 75, 42] считают, что снижения уровня КП на зажимах электродвигателя можно добиться путем увеличения длины кабельной вставки между коммутационным аппаратом и электродвигателем. Принято считать, что за счет увеличения емкости кабеля происходит снижение волнового сопротивления нагрузки, что приводит к снижению КП. С данным способом следует не согласиться, т.к. исследования, выполненные в настоящей работе, указывают на то, что с увеличением длины кабеля и с учетом высокой частоты коммутационного импульса возрастает распределенное продольное сопротивление кабеля. Это приводит к значительному росту перенапряжений на зажимах электродвигателя.

Другим защитным средством является разрядник. Вентильный разрядник состоит из многократного искрового промежутка и последовательно включаемого с ним сопротивления с нелинейной вольт–амперной характеристикой. Надежность функционирования разрядника определяется термостойкостью резистора. Поэтому в производственных условиях они обычно отстраиваются от внутренних перенапряжений, которые возникают в режиме ОЗЗ. В работе [16]

приведены технические данные разрядников, выпускаемых отечественной промышленностью, которые могут быть применены для защиты вращающихся машин.

Сопоставляя данные по оставшимся напряжениям на сопротивлении разрядника с номинальным напряжением сети можно определить предельную кратность КП ($K_{пр}$), которую обеспечат указанные разрядники.

Для разрядника РВРД-10 при величине импульсного тока, равного 3 кА, 5 кА и 10 кА коэффициент кратности КП ($K_{п}$) будет соответственно равен: 2,35, 2,65 и 3,05. Для разрядника РВМ-10 – 2,8, 3,0 и 3,3; РВМ-6 – 2,83, 3,0, 3,3; РВРД-6 – 2,3, 2,66, 3,0.

Из вышеизложенного видно, что для защиты электродвигателя от КП указанные разрядники использовать нельзя, т.к.

$$K_{пр.} > K_{доп.} = 1,8 \quad (4.1)$$

Наибольшее применение по защите изоляции электродвигателей от КП получили нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН) [32, 58, 78].

По сравнению с разрядниками нелинейный ограничитель перенапряжений обладает рядом преимуществ: компактность конструкции, позволяющая размещать ограничитель непосредственно в ячейке высоковольтного выключателя; высокая нелинейность ВАХ сопротивления; отсутствие воздушных промежутков.

Во время эксплуатации на нелинейный ограничитель оказывают негативное влияние различные факторы. Воздействие вредных факторов приводит к сокращению срока службы ограничителя. Например, при наличии на экскаваторах значительных по величине вибраций может привести к механическому разрушению ограничителя перенапряжений [21]. В течение всего срока эксплуатации защитное устройство находится под действием рабочего напряжения. Это в свою очередь приводит к преждевременному старению, нарушению теплового равновесия и, как следствие, к электрическому пробое нелинейного элемента. Также необходимо отметить, что в случае отказа в действии защиты от однофазных замыканий на землю или в случае, когда защита от ОЗЗ дей-

ствуется не на отключение, а на сигнал, ограничитель перенапряжений оказывается под длительным воздействием линейного напряжения соседних фаз, что приведет к его термическому разрушению [39, 40, 59].

Если ОПН выполнить на линейное напряжение, то эффективность ограничения внутренних перенапряжений снижается.

Из-за невозможности обеспечения герметичности ячеек вакуумных выключателей происходит осаждение влаги и пыли на поверхность колонки нелинейного сопротивления. В результате чего происходит наружное перекрытие изоляции. Кроме этого, конструкция нелинейных ограничителей такова, что их практически невозможно разместить в непосредственной близости от объекта защиты [39].

В табл.4.1 приведены технические параметры нелинейных ограничителей, рекомендуемых для защиты высоковольтных электродвигателей от КП. В результате сравнения допустимой кратности КП для электродвигателей с остающимся напряжением на колонках ОПНК-6 и ОПНК-10 видно, что защита является неэффективной. Если зафиксированные максимальные значения не представляют для новых электродвигателей сколько-нибудь серьезной опасности, то для двигателей, находящихся длительное время в эксплуатации, они представляют серьезную угрозу. Кроме того, исследования, проведенные авторами [79], показали, что в случае применения нелинейного ограничителя перенапряжений происходит увеличение длительности переходного процесса перенапряжений. Это обусловлено увеличением числа повторных зажигания дуги. При определенных сочетаниях параметров сети, двигателя, типа нагрузки многократные повторные зажигания могут привести к эскалации перенапряжений. Таким образом, уровень КП, обеспечиваемый нелинейными ограничителями, является недостаточным для двигателей с большим сроком эксплуатации.

Таблица 4.1 – Технические параметры ограничителей перенапряжений, выпускаемые отечественной промышленностью.

Тип ограничителя	Завод-изготовитель	Масса, кг	Габариты НхЛхМ, мм	Срок службы	U _{н.огр} кВ	U _{ост.} кВ	Кратность перенапряжения K _{огр}
ОПН-П1-6П УХЛ1	«ЗЭТО» г. Велкие Луки	3,6	215x230x84	25	6	17,6	2,93
ОПН-П1-10П УХЛ1		5,4	265x230x84	25	10	29,5	2,95
ОПН-РС/TEL-6	«Таврида элек-трик» г. Москва	1,8	130x100x100	25	6	18,9	3,15
ОПН-РС/TEL-10		2,5	190x100x100	25	10	31,5	3,15
ОПН-КС/TEL-6		1,8	120x80x80	25	6	14	2,33
ОПН-КС/TEL-10		2,5	160x80x80	25	10	24,9	2,49
ОПН-6/6,5-10(1) УХЛ2	«Феникс-88» г. Новосибирск	2	270x80x80	25	6	15,2	2,53
ОПН-10/10,5-10(1) УХЛ2		2,5	315x80x80	25	10	23,4	2,34

Более существенное ограничение амплитуд возникающих перенапряжений обеспечивает ограничитель, состоящий из последовательно включенных емкости и активного сопротивления (РС – ограничитель). Резистор уменьшает время протекания высокочастотного тока, снижает вероятность повторных зажигания дуги. Конденсатор срезает амплитуду перенапряжений, уменьшает число повторных зажигания дуги, снижает величину волнового сопротивления отключаемой нагрузки, сглаживает фронт импульса волны перенапряжения. Применение РС-ограничителя приводит к снижению частоты высокочастотного переходного процесса.

Эксплуатация опытных образцов РС-ограничителей показала, что функциональная эффективность РС-ограничителей по сравнению с нелинейными ограничителями выше в 2÷2,5 раза [38, 39].

Однако широкое внедрение на промышленных объектах RC-ограничители не получили. Это связано с тем, что для каждого отдельного электродвигателя требуется индивидуальный RC-ограничитель со своими параметрами.

Авторами [20, 42] разработана методика, в соответствии с которой оптимальные значения параметров RC-ограничителя, исходя из условия невозможности возникновения высокочастотных колебаний коммутируемой цепи, т.е. из условия апериодического характера переходного процесса при повторном зажигании дуги, определяется выражениями:

$$C = \frac{C_S + C_H}{\frac{C_S}{8C_H} - 1},$$

$$R = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{3L_H \cdot C_S^3}{C_H \cdot (C_S + C_H)^3}}, \quad (4.1)$$

где, C и R – емкость и активное сопротивление на фазу ограничителя;

C_S – емкость питающей цепи;

L_H и C_H – индуктивность и емкость коммутируемой нагрузки.

Значение C_S может быть рассчитано по известному значению тока ОЗЗ в рассматриваемой сети, а значение L_H и C_H по каталожным данным коммутируемого электрооборудования.

Расчеты по приведенным формулам показывают, что в зависимости от сочетания значений C_S , L_H и C_H оптимальная емкость C находится в интервале $0,1 \div 10$ мкФ, а оптимальное значение R в интервале $4 \div 120$ Ом.

В качестве примера в табл. 4.2 приведены оптимальные параметры RC-ограничителей для защиты синхронных электродвигателей СДЭУ – 14 – 29, СДЭ – 16 – 46, СДЭ2 – 17 – 57 от коммутационных перенапряжений [42].

Широкий разброс параметров RC-ограничителей в зависимости от типа электродвигателя и параметров схемы электроснабжения электродвигателя не позволяет приступить к промышленному производству RC-ограничителей.

Разработка универсального ограничителя с усредненными параметрами позволит наладить серийное производство RC-ограничителей и тем самым

обеспечить массовое внедрение RC–ограничителей на промышленных объектах.

Таблица 4.2 – Оптимальные параметры защитной резистивно–емкостной цепочки.

Электродвигатель	Мощность, кВт	Параметры RC - ограничителя				Ожидаемая кратность пере- напряжений
		Активное сопротив- ление, Ом		Емкость, мкФ		
		R _{max}	R _{min}	C _{min}	C _{max}	
СДЭУ – 14 – 29	520	85,6	36,8	0,10	0,30	1÷1,6
СДЭ – 16 – 46	1250	71,5	21,7	0,20	0,60	1÷1,6
СДЭ2 – 17 – 57	2500	60	20	0,25	0,80	1÷1,6

4.2 Разработка универсального трехфазного резистивно–емкостного ограничителя перенапряжений и опыт его внедрения

При разработке универсального трехфазного резистивно–емкостного ограничителя перенапряжений необходимо учитывать следующее:

- параметры RC – ограничителя должны быть такими, чтобы кратность перенапряжений на зажимах электродвигателя не превышала допустимого значения, равного 1,8;
- корпус RC–ограничителя должен быть пылевлагонепроницаемым со степенью защиты IP – 54;
- общая конструкция RC–ограничителя должна позволять размещать его в непосредственной близости от объектов защиты;
- RC–ограничитель должен быть одновременно пригоден к эксплуатации в сетях с напряжением 6 и 10 кВ.

За допустимое значение перенапряжения на зажимах электродвигателя принять значение напряжения с учетом допустимого коэффициента кратности КП для электродвигателей, находящихся в эксплуатации 5 лет и более, т.е. $U_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot U_{\text{н}}$, для сети 6 кВ $U_{\text{доп}} = 10,8$ кВ, а для сети 10 кВ $U_{\text{доп}} = 18$ кВ.

Согласно данным табл. 4.2, за усредненные параметры RC–ограничителя

можно принять следующие значения:

$R=50$ Ом, $C=0,25$ мкФ. Очевидно, что для синхронных электродвигателей СДЭУ – 14 – 29, СДЭ – 16 – 46, СДЭ2 – 17 – 57 кратность КП не будет превышать значения 1,6, что ниже допустимого значения.

Более точное значение ожидаемого перенапряжения на зажимах электродвигателя можно оценить по выражению[20]:

$$U_{\max} = \sqrt{U_{\Phi\text{М}}^2 + \left(i_{\text{ср}} \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{Н}}}{C_{\text{Н}}}} \right)^2}, \quad (4.2)$$

где: $U_{\Phi\text{М}}$ – амплитудное значение фазного напряжения сети, В;

$i_{\text{ср}}$ – срез тока, А;

$L_{\text{Н}}, C_{\text{Н}}$ – индуктивность и емкость нагрузки.

Емкость нагрузки будет равна:

$$C_{\text{Н}} = C + C_{\text{д}}, \quad (4.3)$$

где: $C = 0,25$ мкФ – емкость RC–ограничителя;

$C_{\text{д}}$ – емкость статорной обмотки электродвигателя по отношению к земле.

Очевидно, что $C \gg C_{\text{д}}$, следовательно, $C_{\text{Н}} \approx C$.

Согласно исследованиям авторов [56], величина среза тока в современных вакуумных выключателях находится в пределах $2,5 \div 14,1$ А. Поэтому при оценке ожидаемого напряжения на зажимах электродвигателей примем максимальное значение, равное 14,1 А.

В табл. 4.3 приведены значения ожидаемого перенапряжения на зажимах синхронных и асинхронных машин.

Таблица 4.3 – Значения ожидаемого перенапряжения на зажимах высоковольтных электродвигателей.

Тип электродвигателя	Мощность Р, кВт	Индуктивность статорной обмотки при частоте до 5 кГц [23], Гн	Напряжение, кВ	Величина перенапряжения $U_{\max}$, В	Кратность перенапряжения K_{Π}
АЭ-113-4У	250	$100 \cdot 10^{-3}$	6	10187	1,7
СДЭУ-14-29-6	520	$20 \cdot 10^{-3}$	6	6337	1,05
СДЭ2-15-34-6	630	$16 \cdot 10^{-3}$	6	6081	1,01
СДЭ2-16-46-3	1250	$4 \cdot 10^{-3}$	6	5238	0,87

Для проверки эффективности РС–ограничителей были проведены измерения КП при включениях и отключениях высоковольтных электродвигателей экскаваторов, с применением защитных РС–цепочек, с выше принятыми параметрами.

Измерения перенапряжений производились при коммутации вакуумными выключателями ВВТЭ-10-10/630 УХЛ2, ВВТЭ-10-20/630 УХЛ2 холостого хода электродвигателей: АКДЭ-16-10-42 УХЛ2 и АОК-99/70-1 (ЭРШРД-5250 №139); СДЭ-17-69 8Т2 (ЭШ20/90 №37); СДЭ3-15-64 УХЛ2 (ЭШ15/90А №108); СДЭ-14-29-6 УХЛ2 (ЭКГ-4у №58); СДЭ3-15-64 УХЛ2 (ЭШ15/9А №119).

Результаты экспериментальных значений перенапряжений приведены в табл.4.4, из которой видно, что при использовании защитного устройства происходит снижение амплитуды восстанавливающегося напряжения на зажимах электродвигателя до безопасных значений, если расстояние между электродвигателем и РС–ограничителем не превышает 10 м. В противном случае эффективность ограничения коммутационных перенапряжений снижается. Например на экскаваторе ЭШ15/90А №108 РС–ограничитель располагался на расстоянии 10м от электродвигателя СДЭ3-15-64 УХЛ2, при этом максимальная кратность перенапряжения не превышала значения 1,4, а на подобном экскаваторе №119 РС–ограничитель располагался на расстоянии 20 м от электродвигателя аналогичного типа. В этом случае максимальная кратность перенапряжения возросла и достигла значения 1,85, что выше требуемого значения.

Более детальные исследования влияния расстояния между РС–ограничителем и электродвигателем показали, что РС–ограничитель необходи-

мо устанавливать в непосредственной близости от электродвигателя. Максимальное удаление не должно превышать 10м. В этом случае кратность перенапряжений на зажимах электродвигателя не будет превышать значения 1,7.

Необходимость установки РС–ограничителя в непосредственной близости от электродвигателя потребовала разместить базовые элементы (однофазный РС–ограничитель) в специальном пылевлагонепроницаемом корпусе со степенью защиты IP – 54.

Разработанный РС–ограничитель (тип РС – 6,6 – 0,25/50) принят к внедрению и серийно выпускается на предприятии ООО “Рутас” г. Красноярск.

На данное устройство получен патент РФ на полезную модель [51]. Технические данные, внешний вид и места установки приведены в приложении 7.

За период с 2003 г. по 2006 г. было выпущено более 1100 шт. РС–ограничителей, которые использовались для защиты высоковольтных электродвигателей на таких предприятиях, как ОАО “АНПЗ”, ФГУП “ГХК”, ООО “Красноярский цемент”, так же на угольных разрезах “Бородинский”, “Березовский-1”, “Черемховский”, “Азейский”, “Мугунский”, “Тулунский”, “Междуреченский”. Для защиты силовых трансформаторов РС–ограничители используются на ОАО “КрАЗ” и ОАО “САЗ”.

“Нижнетуринский электроаппаратный завод” использует РС–ограничители при выпуске комплексного распределительного устройства типа 2КВЭ-10. В приложении 8 к диссертационной работе приведены документы, отражающие опыт использования РС – ограничителей.

Например, на ОАО “АГК” эксплуатируются 48 РС–ограничителей. Ограничители подключены к зажимам электродвигателей, а также встроены в высоковольтные ячейки распределительных подстанций. Пробой изоляции высоковольтных электродвигателей, оснащенных РС–ограничителями не зафиксирован. Общее количество повреждений электродвигателей снизилось в два раза, а количество пробоев изоляции разделок высоковольтных кабелей снизилось в пять раз. Экономический эффект от применения РС–ограничителей в сырьевом цехе ОАО “АГК” составил 2729288,6 руб. и достигнут за счет сокращения за-

трат на ремонты электродвигателей.

4.3 Анализ эффективности защит от однофазных замыканий на землю

Анализ аварийности в распределительных сетях 6-10кВ промышленных предприятий показал, что преобладающим видом повреждений в системах электроснабжения напряжением 6-10 кВ являются ОЗЗ.

Длительное существование ОЗЗ в распределительных сетях промышленных предприятий характеризуется повышенной опасностью поражения людей и повреждением электроустановок. Наибольшее обострение данная проблема получила на горнодобывающих предприятиях, т. к. на долю ОЗЗ приходится около 76 % всех аварий в электроустановках и распределительных сетях напряжением 6-10 кВ.

Единственным средством ограничения длительности существования ОЗЗ в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ является защита от ОЗЗ, которая в соответствии с Едиными правилами безопасности (ЕПБ) и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) должна устанавливаться на всех линиях напряжением выше 1000 В, отходящих от подстанций или распределительных устройств и питающих как передвижные, так и стационарные электроустановки. На горных предприятиях, в частности, на угольных разрезах Красноярского края, эксплуатируются двухступенчатые системы защиты от ОЗЗ. Первая ступень защиты устанавливается в передвижных приключательных пунктах, действует без выдержки времени и отключает электроустановку вместе с кабельной линией. Вторая ступень устанавливается в ячейке фидерного выключателя, действует с выдержкой времени, равной 0,1 с, и отключает отходящую линию.

Таблица 4.4 – Результаты измерений перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей при использовании RC – ограничителя с параметрами $R = 50 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$.

Тип технологического оборудования	Электродвигатель	Коммутационный аппарат	Кабель связывающий RC – ограничитель и электродвигатель	Параметры перенапряжений			
				Включение		Отключение	
				$K_{\text{мах}}$	$K_{\text{ср}}$	$K_{\text{мах}}$	$K_{\text{ср}}$
ЭШ20/90 №37 Разрез “Сафроновский”	СДЭ-17-69 8Т2 Р=2500 кВт, 6 кВ сетевой	ВВТЭ-10-20/630	КГЭ 3х95+1х25 L=10м	1,06	1,02	1,2	1,05
ЭШ-15/90А №108 Разрез “Черемховский”	СДЭЗ-15-64 УХЛ2 Р=2000 кВт, 6 кВ сетевой	ВВТЭ-10-20/630	КГЭ 3х95+1х25 L=10м	1,08	1,04	1,38	1,14
ЭКГ-4У № 58 Разрез “Азейский”	АЭ-113-4 Р=250 кВт, 6 кВ сетевой	ВВТЭ-10-10/630	КШВГ 3х35+1х10 L=10м	1,07	1,03	1,68	1,28
ЭРШРД-5250 №139 Разрез “Березовский-1”	АКДЭ-16-10-42 УХЛ2 Р=500 кВт, 10 кВ	ВВТЭ-10-10/630	КГЭ 3х35+1х10 L=10м	1,04	1,02	1,54	1,18
ЭРШРД-5250 №139 Разрез “Березовский-1”	АОК-99/70-1 Р=500 кВт, 10 кВ	ВВТЭ-10-10/630	КГЭ 3х35+1х10 L=10м	1,05	1,02	1,48	1,16
ЭШ15/90А №119 Разрез “Черемховский”	СДЭЗ-15-64 УХЛ2 Р=2000кВт, 6кВ сетевой	ВВТЭ-10-20/630	КГЭ 3х95+1х25 L=20м	1,09	1,04	1,85	1,31

Первая ступень защиты выполняется на базе токовых устройств типа РТЗ-50, РТЗ-51, реагирующих на величину тока нулевой последовательности или направленных устройств тип ЗЗП -1м, РЗН-3, УРЗН и т. д., реагирующих на величину и знак мощности нулевой последовательности. Вторая ступень защиты выполняется на базе направленных устройств.

В Российской Федерации и за рубежом для оценки эффективности функционирования системы защиты от ОЗЗ широко применяется обобщенный статистический показатель ее работы, называемый коэффициентом правильных действий [72].

$$\eta = \frac{n_c}{n_c + n_{o.c} + n_{л.с}} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

где n_c , $n_{o.c}$, $n_{л.с}$ – число срабатываний соответственно правильных отказов и ложных.

Сумма $n_c + n_{o.c}$ представляет собой число замыканий на защищаемом присоединении или число требуемых срабатываний защиты. Сумма $n_{o.c} + n_{л.с}$ составляет число отказов функционирования системы.

Отказ в срабатывании защиты при ОЗЗ на защищаемом объекте может произойти из-за большого переходного сопротивления в месте ОЗЗ, из-за повреждения (отказа) устройства защиты или из-за отказа исполнительного органа, в роли которых выступают высоковольтные масляные или вакуумные выключатели [28, 43, 53, 54]. Причинами отказов могут быть дефекты, допущенные при ремонтах и наладке, нарушения правил и норм эксплуатации, естественные процессы изнашивания и старения, а также завышенный выбор уставок устройств защиты.

Ложные срабатывания защиты обусловлены несовершенством принципа действия и структур существующих устройств, заниженным выбором уставок, ошибками при наладке и настройке устройств, а также пониженной помехозащищенностью устройств от воздействия различных факторов, связанных, например, с КП в сети, неодновременностью включения контактов силовых выключателей защищаемых объектов, затяжными пусками мощных двигателей переменного

тока, естественной асимметрией параметров изоляции сети по отношению к земле [10, 65].

На рис.4.1 показаны графики изменения коэффициента правильных действий существующих двухступенчатых систем защиты от ОЗЗ на угольных разрезах в зависимости от времени года. Существующие двухступенчатые системы защиты от ОЗЗ разбиты на 4 группы. К первой и второй группам относятся системы, которые эксплуатируются с масляными выключателями. Первая ступень защиты выполнена на базе токовых устройств, для первой группы, во второй группе первая ступень защиты выполнена на базе направленных устройств. К третьей и четвертой группам относятся системы, эксплуатируемые с вакуумными выключателями, причем в третьей и четвертой группах первая ступень защиты соответственно выполнена на базе токовых и направленных устройств.

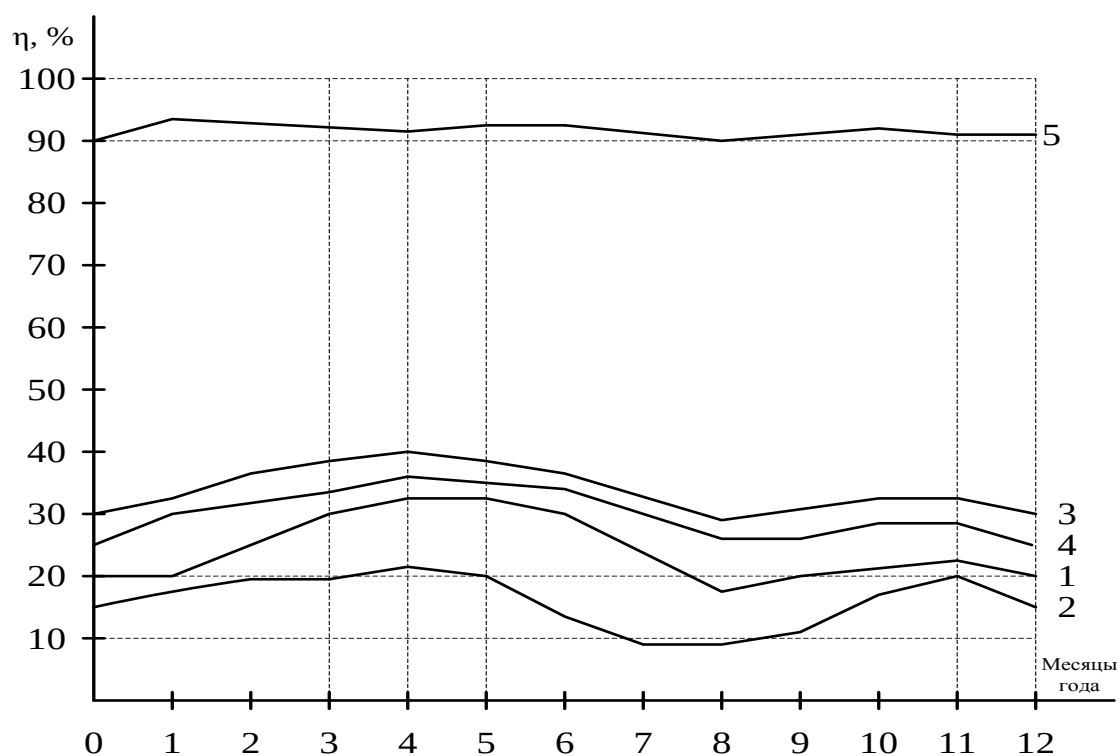


Рисунок 4.1 – Графики изменения коэффициента правильных действий(η) существующих систем защит от ОЗЗ: 1, 2, 3, 4 графики соответствуют 1, 2, 3, 4 группам систем защит, 5 график соответствует двухступенчатой токовой системе с добавочным активным током.

Анализ графиков (1-4) показывает, что использование в качестве исполнительного органа вакуумных выключателей позволяет повысить эффективность

системы защиты от ОЗЗ в среднем в 1,8 раза. Это связано с тем, что вакуумные выключатели в 4,2 раза реже отказывают в работе, чем масляные выключатели [56, 73]. Однако широкое внедрение вакуумных выключателей приводит к увеличению числа ОЗЗ за счет воздействия на изоляцию оборудования КП [63, 64]. Использование в качестве первой ступени системы защиты от ОЗЗ направленных устройств приводит к снижению эффективности системы в среднем в 1,4 раза. Это связано с тем, что направленные устройства, в особенности ЗЗП-1м и РЗН-3, обладают низкой помехоустойчивостью и сильно реагируют на переходные процессы, которые возникают как в момент ОЗЗ, так и после отключения поврежденного участка [40].

Из вышеприведенного видно, что наиболее эффективными системами защиты от ОЗЗ являются системы, относящиеся к 3 группе, однако, коэффициент правильных действий не превышает 45 %. Низкое значение правильных действий обусловлено резкими изменениями тока ОЗЗ не только в течение года, но и иногда в течение одной рабочей смены, что затрудняет правильно выбрать уставку устройства защиты [13].

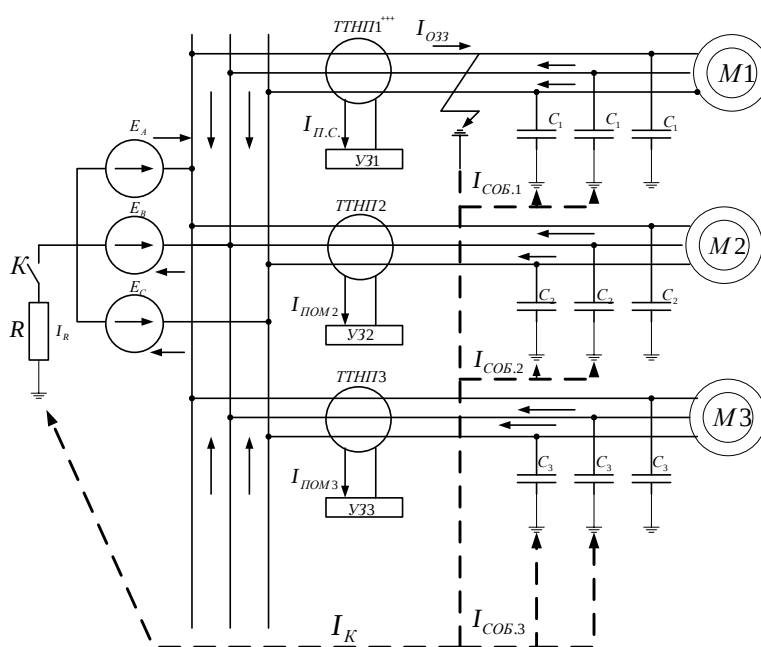


Рисунок 4.2 – Токораспределение в режиме ОЗЗ для трехлинейной схемы электроснабжения с изолированной нейтралью (ключ K разомкнут) и с нейтралью, заземленной через резистор (ключ K замкнут).

ТТНП – трансформатор тока нулевой последовательности;

УЗ – устройство защиты от ОЗЗ

На рис. 4.2 показано токораспределение в режиме ОЗЗ для упрощенной трехлинейной схемы электроснабжения с изолированной нейтралью (ключ К разомкнут) и с нейтралью, заземленной через резистор (ключ К замкнут). Данная схема позволит выяснить, как влияет число подключенных линий на работу защиты от ОЗЗ. Для четкости рассуждений примем допущение, что все три линии аналогичны между собой.

Предположим, что в сети с изолированной нейтралью в фазе А первой линии произошло замыкание на землю, следовательно, ток ОЗЗ будет равен:

$$I_{OЗЗ} = I_{cob.1} + I_{cob.2} + I_{cob.3} = nI_{cob} \quad (4.5)$$

где $n = 3$ - число подключенных линий;

$$I_{cob} = I_{cob.1} = I_{cob.2} = I_{cob.3}$$

Величина полезного сигнала ($I_{п.с}$), на которую должно среагировать устройство защиты первой линии, определяется как разность между током ОЗЗ и собственным емкостным током защищаемой линии, т. е.

$$I_{п.с} = I_{OЗЗ} - I_{cob},$$

принимая во внимание выражение (4.5)

$$I_{п.с} = I_{cob}(n-1). \quad (4.6)$$

В то же время на устройство защиты второй и третьей линии будут действовать сигналы помех $I_{пом.2}$, $I_{пом.3}$, которые обусловлены собственными емкостными токами линий:

$$I_{пом} = I_{пом.2} = I_{пом.3} = I_{cob}, \quad (4.7)$$

На данные сигналы защита не должна реагировать, т.е. токовая уставка защиты ($I_{уз.}$) должна удовлетворять условию:

$$I_{п.с} > I_{уз.} > I_{пом}. \quad (4.8)$$

С учетом выражений (4.6) и (4.7) выражение (4.8) примет следующий вид:

$$(n-1)I_{cob} > I_{уз.} > I_{пом}. \quad (4.9)$$

Полученное выражение указывает на то, что, если к секции шин подстанции будет подключено более двух линий ($n \geq 3$), система защиты от ОЗЗ будет функционировать селективно, т.е. отключать только поврежденную линию, т.к. неравенство (4.9) правомерно:

$$2 I_{cob} > I_{y.z} > I_{cob} \quad (4.10)$$

Если к секции шин подстанции будет подключено менее трех линий ($n \leq 2$), то в системе защиты от ОЗЗ будет наблюдаться отказ, т.к. неравенство (4.9) неправомерно:

$$\begin{aligned} I_{cob} > I_{y.z} > I_{cob}, n=2 \\ 0 > I_{y.z} > I_{cob}, n=1. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Говоря другими словами, отказ в срабатывании защиты происходит из-за того, что токовая уставка защиты становится больше величины полезного сигнала.

С помощью неравенства (4.9) можно объяснить не только отказы в функционировании систем защиты от ОЗЗ, но и ложную работу. Для этой цели неравенство (4.9) необходимо преобразовать с учетом того, что в момент возникновения ОЗЗ наблюдаются пятикратные броски собственных емкостных токов в неповрежденных линиях, т.е.

$$I_{ном.} = 5I_{cob}. \quad (4.12)$$

С учетом выражения (4.12) неравенство (4.9) примет вид:

$$I_{cob} \cdot (n-1) > I_{y.z} > 5I_{cob}. \quad (4.13)$$

Данное неравенство указывает на то, что, если к секции шин подстанции будет подключено менее семи линий ($n < 7$), защита от ОЗЗ будет работать ложно, т.е. в момент ОЗЗ будет отключаться не только поврежденная линия, но и часть неповрежденных линий. Это происходит потому, что токовая уставка защиты должна быть меньше величины полезного сигнала:

$$I_{n.c} = I_{cob} \cdot (n-1) = 5I_{cob} > I_{y.z} \quad (4.14)$$

и быть больше величины сигнала помехи:

$$I_{ном.} = 5I_{cob} < I_{y.z}$$

Если в качестве коммутационного аппарата используется вакуумный выключатель, а в роли нагрузки выступает электродвигатель, то ложное срабатывание защиты может привести к множественным повреждениям в системе электроснабжения.

Анализ аварийности в сетях 6-10 кВ ОАО “АГК” подтвердил данные предположения, т.к. 60 % ОЗЗ сопровождалось множественными повреждениями, при этом срабатывало 2-3 устройства защиты от ОЗЗ.

Из вышесказанного видно, что изменение конфигурации (отключения линий) системы электроснабжения с изолированной нейтралью, завязанной через общую секцию шин, может привести к отказу или к ложной работе защиты от ОЗЗ.

Очевидно, что для устранения вышеперечисленных негативных факторов в работе защиты от ОЗЗ необходимо искусственно увеличить ток ОЗЗ. Наиболее эффективным способом является наложение добавочного активного тока I_a на ток ОЗЗ [22, 34]. В этом случае можно считать, что нейтральная точка системы электроснабжения заземлена через резистор (рис.4.2, ключ К замкнут). Действующее значение тока ОЗЗ возрастает и определяется выражением:

$$I_{OЗЗ} = \sqrt{I_a^2 + (n \cdot I_{cob})^2}, \quad (4.15)$$

где: I_a – искусственно созданная активная составляющая тока ОЗЗ;

$n I_{cob}$ – суммарный емкостной ток системы электроснабжения.

Величина полезного сигнала, на который должна реагировать защита от ОЗЗ, будет равна:

$$I_{n.c} = \sqrt{I_a^2 + (nI_{cob} - I_{cob})^2}, \quad (4.16)$$

Для того чтобы исключить отказы в работе и ложные срабатывания защиты от ОЗЗ, уставка устройства защиты должна выбираться из условий:

$$\sqrt{I_a^2 + (nI_{cob} - I_{cob})^2} > I_{y.з} > 5I_{cob} \quad (4.17)$$

Выражение 4.17 определяет величину добавочного активного тока, которая обеспечит эффективную работу защиты от ОЗЗ в самом неблагоприятном случае. Самым неблагоприятным случаем является случай, когда к секции шин

подстанции подключена одна линия ($n=1$). В этом случае выражение (4.17) примет вид:

$$\begin{aligned} I_a > I_{y.з} > 5I_{cob}, \text{ т.е.} \\ I_a > 5I_{cob}, \end{aligned} \quad (4.18)$$

А с учетом коэффициента чувствительности защиты ($K_u=1,4$) величина добавочного активного тока должна быть больше или равна:

$$\begin{aligned} I_a &\geq K_u 5I_{cob}, \text{ т.е.} \\ I_a &\geq 7I_{cob}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Исследования токов ОЗЗ, проведенные при участии автора за период с 2000-2006 гг., показали, что собственный емкостной ток линии на горных предприятиях не превышает 0,55 А. Исходя из этого, величина добавочного активного тока должна быть больше 9 А, при этом, согласно ПТЭ и ПТБ, общий ток ОЗЗ не должен превышать 30 А для сетей напряжением 6 кВ и 20А для сетей напряжением 10 кВ.

Исследования показали, что в современных условиях ток ОЗЗ на угольных разрезах и на горнорудных карьерах не превышает 4 А [18, 40], а на промышленных предприятиях – 15 А с учетом компенсации. Следовательно, диапазон изменения добавочного активного тока для сетей 6 кВ будет находиться в пределах $25,9 > I_a > 8,4$ А, а для сетей 10 кВ $13,2 > I_a > 8,4$ А.

На основании проведенных исследований автором была предложена опытная двухступенчатая токовая селективная система защиты от ОЗЗ на базе реле РТЗ-50, РТЗ-51, которая предусматривает наложение на ток ОЗЗ добавочного активного тока величиной 10 А. Устройство для создания добавочного активного тока было выполнено на базе 8 трансформаторов НТМИ (10) [66, 81]. Данная система была апробирована на двух подстанциях разреза “Бородинский” в период 2000-2003 г.

График изменения коэффициента правильных действий данной системы защиты от ОЗЗ показан на рис.4.1 (график 5). В течение года коэффициент правильных действий защиты изменился от 90 до 92 %, что указывает на достаточно высокую эффективность данной системы защиты от ОЗЗ.

Более высокой эффективности достигнуть не удалось за счет низкой термической устойчивости трансформаторов НТМИ – 6 в режиме ОЗЗ. Один трансформатор с закороченной вторичной обмоткой, собранной по схеме “треугольник” в режиме ОЗЗ создает добавочный активный ток 1,2 А [66], режим работы кратковременный и не превышает 6-8 с.

Поэтому для дальнейшего повышения эффективности двухступенчатой токовой системы защиты от ОЗЗ необходимо разработать термически устойчивое устройство для создания добавочного активного тока в режиме ОЗЗ.

4.4 Анализ существующих устройств для создания добавочного активного тока в режиме ОЗЗ

В настоящее время для создания активного добавочного тока в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий используются следующие устройства:

трансформатор НТМИ-6(10), высоковольтные бетэловые резисторы и резисторы изготовленные из композиционного материала “ЭКОМ” типа РЗ [13, 34].

Рассмотрим более детально каждое устройство.

Высоковольтная обмотка трансформатора НТМИ-10 непосредственно подключается в трехфазную высоковольтную сеть напряжением 6-10 кВ.

Вторичная обмотка собрана по схеме “открытый треугольник” замкнута накоротко через предохранитель. В режиме ОЗЗ по вторичной обмотке, собранной по схеме “треугольник”, начинает протекать ток величиной 90-100 А, что приводит к сильному намагничиванию магнитопровода трансформатора. В результате индуктивное сопротивление первичной обмотки существенно снижалось. Первичная обмотка обладает в основном активным сопротивлением, что и приводит к протеканию активного тока в нейтральном проводе трансформатора. Время работы трансформатора НТМИ-6 (10) в подобном режиме не превышает 6-8 с, если через указанное время не разомкнуть вторичную обмотку, собранную по схеме “треугольник”, трансформатор выйдет из строя за счет термического разрушения [66].

Поэтому вторичную обмотку, собранную по схеме “треугольник”, замыкают через предохранитель.

Бетэловые резисторы типа РВН-6/10 были разработаны для карьерных сетей 6-10 кВ на предприятии “Энерготехпром” в 1981г.

Конструкция резистора РВН-6/10 имеет небольшие габариты и вес, что является преимуществом данного устройства. Недостаток состоит в том, что время работы резистора в режиме ОЗЗ не должно превышать 30 с, в противном случае наступает термическое разрушение резистора.

По этой причине область применения резистора ограничивалась сетями 6-10 кВ, в которых защита от ОЗЗ работала на отключение.

Опыт эксплуатации резисторов типа РЗ показал, что основная масса резисторов, находящихся в эксплуатации, соответствует техническим характеристикам. Однако в отдельных случаях при температуре окружающей среды более 28° С время эксплуатации резистора в режиме ОЗЗ не превышает 1,5-2 часа. Дальнейшая эксплуатация приводит к перегреву внутренних резисторных блоков [14]. Это указывает на то, что естественной конвенции для охлаждения резистора недостаточно. Кроме этого, устройство имеет достаточно большие габариты и стоимость. Например, резистор на напряжение 10 кВ с номиналом в 500 Ом и мощностью 70 кВт стоит около 600 тыс. руб.

Выполненный анализ показывает, что существующие устройства для создания добавочного активного тока в сетях 6-10 кВ имеют недостаточную термическую устойчивость в режиме ОЗЗ, низкую ремонтпригодность и высокую стоимость. Следовательно, задача, связанная с разработкой недорогого, термически устойчивого, ремонтпригодного устройства для создания добавочного активного тока, остается актуальной.

4.5 Разработка термически устойчивого устройства для создания добавочного активного тока

При разработке устройства необходимо выбрать оптимальное значение добавочного активного тока.

Исследования, выполненные во второй главе, показали, что наложение добавочного активного тока на ток ОЗЗ позволяет снизить кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ и ликвидировать условие возникновения резонанса на зажимах электродвигателя. Анализ эффективности систем защит от ОЗЗ подтвердил, что добавочный активный ток способствует повышению селективности защит от ОЗЗ. Следовательно, оптимальное значение добавочного активного тока можно выбрать, основываясь на следующих критериях: ограничение кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ; ограничение феррорезонансных перенапряжений; ликвидация резонанса на зажимах электродвигателя; снижение ложных, неселективных срабатываний защит от ОЗЗ.

В табл. 4.6 показаны критерии оптимизации и выбранные значения добавочного активного тока по данным критериям.

Таким образом, значения добавочного активного тока, равное 12 А и 10 А, является оптимальным соответственно для сетей 6-10 кВ.

За основу устройства принимаем резистор, выполненный из нихрома. Величина резистора и мощность соответственно для сети 6 и 10 кВ будут равны 300 Ом / 43,2 кВт и 500 Ом / 75 кВт. Резистор набирается из последовательно соединенных базовых элементов, выполненных из нихрома диаметром 1,2 мм, намотанных на асбестобетонную трубу диаметром 100 мм и длиной намотки 1 м. Шаг намотки составил 3 мм. В результате сопротивление базового элемента получилось равным 100 Ом. Для сетей напряжением 6 кВ количество базовых элементов равно 3 шт., а для сетей напряжением 10 кВ – 5 шт. Базовые элементы помещаются в специальный металлический шкаф с принудительным отводом тепла. Принудительный отвод тепла осуществляется двумя вентиляторами четвертой величины. Это позволяет обеспечить устойчивый тепловой режим

устройств в режиме ОЗЗ в течении 12 часов при температуре окружающей среды 40° С.

Управление вентиляторами происходит автоматически: во время протекания тока через резистор сигнал управления снимается со вторичной обмотки трансформатора тока. Трансформатор тока включен последовательно с резистором.

Таблица – 4.6 Критерии оптимизации и выбранные значения добавочного активного тока.

Номер по порядку	Критерии оптимизации	Условие оптимизации	Максимально допустимое значение реактивного тока ОЗЗ, А		Оптимальное значение I_R , А	
			6кВ	10кВ	6кВ	10кВ
1	Ограничение перенапряжений в режиме ОЗЗ					
	до уровня 2,4 U_Φ	$\frac{I_a}{I_c} \geq 0,2$	30	20	6 и более	4 и более
	до уровня 2,3 U_Φ	$\frac{I_a}{I_c} \geq 0,4$	30	20	12 и более	8 и более
2	Ограничение феррорезонансных перенапряжений [16*]					
	до уровня 2,3 U_Φ	$\frac{I_a}{I_c} \geq 0,2$	30	20	6 и более	4 и более
	ликвидация феррорезонансных процессов	$\frac{I_a}{I_c} \geq 0,35$	30	20	10,5 и более	7 и более
3	Ликвидация резонанса на зажимах электродвигателя	$\frac{I_a}{I_c} \geq 0,2$	30	20	6 и более	4 и более
4	Снижение ложных, неселективных срабатываний устройств защиты от ОЗЗ	$I_a > 7I_{cob}$	$I_{c.cob}=1,5$	$I_{c.cob}=1,4$	10,5 и более	9,8 и более
Оптимальное значение добавочного активного тока, А					12	10

Конструкция и внешний вид устройства для сети 10кВ показан в приложении 9. Разработанное устройство запущено в серийное производство в ООО “Рутас” тип УДАТ – 10,5 – 500/75 и внедрено на подстанции ГПП-2 ОАО “АГК”, запатентовано в виде полезной модели [52].

4.6 Комплекс мер по снижению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий

Комплексный подход к снижению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ промышленных предприятий основан на выше выполненных исследованиях и разработках.

Для эффективного снижения числа ОЗЗ в сетях 6-10кВ промышленных предприятий необходимо решить как минимум четыре задачи:

1. Ограничить коммутационные перенапряжения на зажимах высоковольтных электродвигателей до уровня $1,8U_H$;
2. Ограничить перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня $2,2 U_{ФМ}$, что в пересчете на номинальное напряжение составляет $1,8U_H$;
3. Ликвидировать условия возникновения феррорезонансных и резонансных режимов;
4. Создать условия для селективной работы токовых устройств защиты от ОЗЗ как наиболее эффективных и надежных устройств.

Решение первой задачи осуществляется за счет использования универсальных RC–ограничителей типа RC – 6,6 – 0,25/50, которые располагаются в непосредственной близости от электродвигателя и подключаются к его зажимам.

Решение второй, третьей и четвертой задачи осуществлено за счет наложения добавочного активного тока на ток ОЗЗ, т.е. за счет заземления нейтрали сети через резистор. Устройство необходимо устанавливать в узлах электрических нагрузок, т.е. на ГПП или РП.

Другими словами, система, основанная на совместной эксплуатации устройства для создания добавочного активного тока с универсальными RC–ограничителями подключенными к электродвигателям, позволит значительно сократить число ОЗЗ в сетях 6-10кВ промышленных предприятий.

Подобная система была внедрена на ОАО “АГК” в 2004 г. Два устройства для создания добавочного активного тока величиной 12А были установлены на подстанции ГПП-2 и подключены параллельно дугогасящим реакторам типа ЗРДПОМ-400/10. ГПП-2 имеет две секции шин, которые включены на раздельную работу.

До внедрения устройства добавочного активного тока емкостной ток ОЗЗ для первой секции шин ГПП составлял 25А, а для второй секции шин - 22А. Дугогасящие реакторы компенсируют 32А на первой секции шин и 30А на второй, поэтому результирующий ток ОЗЗ по первой и второй секциям шин будет равен -7 А и -8 А. Сеть ГПП-2 будет перекомпенсирована, т.е. токи ОЗЗ имеют индуктивный характер.

После внедрения устройств добавочного активного тока дугогасящие реакторы были настроены в режим, близкий к резонансу. Разбалансировка в сторону недокомпенсации составила 5%, т.е. реактивный ток ОЗЗ по первой и второй секции шин ГПП-2 не превышал 1,2А и 1А и имел емкостной характер. Результирующий ток ОЗЗ с учетом добавочного активного тока ($I_a=12A$) для первой и второй секции шин ГПП-2 не превышал значение 12,1А.

Опыт эксплуатации предложенной системы за период с 2004 по 2006 г. показал, что электродвигатели, оснащенные РС-ограничителями, не выходят из строя. Общее количество аварийных выходов электродвигателей снизилось в два раза по сравнению с 2003 г., а количество пробоев изоляции кабельных линий сократилось в пять раз. За указанный период ложной работы токовых защит от ОЗЗ зафиксировано не было. Общее количество ОЗЗ в сети 10 кВ в 2005 г. снизилось в 4,4 раза. Указанные цифры взяты из отзыва главного энергетика предприятия “Глиноземсервис” компании “Русал”, который отвечает за эксплуатацию и техническое перевооружение электрохозяйства на ОАО “АГК” (приложение 8).

Таким образом, разработанный комплексный подход снижения ОЗЗ доказал свою эффективность и жизнедеятельность.

4.7 Расчет экономического эффекта от внедрения комплекса мер по снижению ОЗЗ

Экономический эффект (Ξ) от внедрения комплексной системы снижающей ОЗЗ, оценивается по величине снижения ущерба от вынужденного простоя технологического оборудования за счет выхода из строя высоковольтных электродвигателей и кабельной линии.

$$\Xi = Z_d + Z_k + Z_y - Z_{zy} + \text{НЗП, тыс. руб.}, \quad (4.20)$$

где Z_d – затраты на ремонт двигателя, тыс. руб.;

Z_k – затраты на ремонт кабельной линии, тыс. руб.;

Z_y – затраты на установку электродвигателя (включающие зарплату ремонтной бригады и социальные отчисления), тыс. руб.;

Z_{zy} – затраты на приобретение комплектующих, монтаж и наладку, тыс. руб.;

НЗП – незаконченное производство, тыс.руб.

Стоимость незаконченного производства можно определить по следующему выражению:

$$\text{НЗП} = 0,83 Q_m \cdot T_{np} \cdot C_{ед.пр.}, \quad (4.21)$$

где: Q_m – производительность технологического оборудования, Т/ч;

T_{np} – время простоя, связанное с ремонтом (заменой) электродвигателя или кабельной линии, ч;

$C_{ед.пр.}$ – стоимость единицы продукции, руб..

Результаты расчета экономического эффекта выполнены на примере сырьевого цеха ОАО “АГК”.

В течение 2005 г. в сырьевом цехе в результате КП вышло из строя 8 электродвигателей. Четырем из них при пробое одной секции обмотки статора был произведен текущий ремонт по месту установки (поврежденные секции были исключены из схемы), а четырем потребовался капитальный ремонт в условиях электроремонтного цеха (ЭРЦ). Согласно калькуляции работ, ЭРЦ на подобный ремонт требуется 1.268,6 ч/час. При стоимости услуг ЭРЦ одного ч/часа в

175,25 руб. затраты на капитальный ремонт электродвигателей сырьевого цеха в 2005г. составили:

$$З_{\text{з.}} = 4 \cdot 1.268,6 \cdot 175,25 = 889.288,6 \text{ (руб.)}$$

Так как текущий ремонт по месту установки после повреждения секций обмоток статора произведен методом исключения из работы поврежденных секций, это приводит к ухудшению технических данных электродвигателя, а при повторных повреждениях – не только к обязательному капитальному ремонту, но и к полной его замене. Стоимость одного подобного электродвигателя по коммерческим проработкам ЗАО «Завод Крупных Электрических Машин» (ЗАО «ЗКЭМ») составляет от 5.200.000 руб. и выше в зависимости от мощности электродвигателя, степени его защиты и формы исполнения. С учетом состояния имеющегося парка высоковольтных электродвигателей сырьевому цеху ОАО «АГК» ежегодно необходимо планово менять не менее 1 электродвигателя. По состоянию на 1.01.2006 года в сырьевом цехе на высоковольтные электродвигатели, необходимо дополнительно установить 28 РС-ограничителей. Затраты на приобретение, монтаж и наладку 28 РС-ограничителей и двух устройств создания добавочного активного тока составят:

$$З_{\text{з.}} = 120000 \cdot 28 + 2 \cdot 300000 = 3960000 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на ежегодный капитальный ремонт электродвигателей и капитальные вложения на приобретения одного нового электродвигателя составят:

$$K_c = 889288,6 + 5200000 = 6089288,6 \text{ руб.}$$

По данным планово-экономического отдела в 2005 г. ущерб от вынужденных простоев технологического оборудования, связанный с заменой электродвигателей и их ремонтом, составил 9632900 руб.. Следовательно, ежегодный экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = 6089288,6 + 9632900 - 3960000 = 11762188,6 \text{ руб.}$$

Выводы

1. Допустимая величина КП для высоковольтных электродвигателей не должна превышать значения $1,8 U_n$, т.е. не более 10,8 кВ для сетей напряжением 6 кВ и 18 кВ для сетей напряжением 10 кВ.
2. Существующие средства защит от КП для электродвигателей: вентильные разрядники (РВРД-6) и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПНК-6, ОПНК-10) – не обеспечивают требуемый уровень ограничения КП, кроме того, нелинейные ограничители перенапряжений термически не устойчивы в режиме ОЗЗ, следовательно, не могут использоваться для защиты электродвигателя.
3. Наиболее эффективным средством ограничения КП является универсальный трехфазный RC–ограничитель, т.к. осуществляет ограничение КП до $1,7U_n$, что ниже допустимого значения. Кроме этого, усредненные параметры RC – ограничителя ($R=50$ Ом, $C=0,25$ мкФ) позволяют наладить серийное производство, а корпус устройства со степенью защиты IP – 54 позволяет размещать RC–ограничители в непосредственной близости от объекта защиты. Максимальное удаление не должно превышать 10 м.
4. Наложение добавочного активного тока величиной 12 и 10 А на ток ОЗЗ соответственно в сетях напряжением 6 кВ и 10 кВ позволяет ликвидировать феррорезонансные и резонансные перенапряжения, добиться селективной работы токовых защит от ОЗЗ, ограничить перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня $1,8U_n$, т.е. до допустимого значения.
5. Существующие средства создания добавочного активного тока (трансформаторы НТМИ-10, бетэловые резисторы и резисторы типа РЗ) имеют недостаточную термическую устойчивость. Это снижает время работы устройств в режиме ОЗЗ (трансформаторы – 6с, бетэловые резисторы – 30 с, резисторы РЗ – 1,5 ч), что приводит к снижению эффективности ограничения перенапряжений в режиме ОЗЗ,

срыву селективности в работе токовых защит и невозможности полностью ликвидировать феррорезонансные и резонансные явления в сетях 6-10 кВ.

6. Разработанное в настоящей работе устройство для создания добавочного активного тока, является термически устойчивым, т.к. предусмотрен принудительный отвод тепла, недорогим, так как выполнен из простых и дешевых материалов. Время работы устройства в режиме ОЗЗ при температуре окружающей среды 40° С составляет 12 ч.
7. Комплексный подход к снижению ОЗЗ, основанный на совместной работе устройства для создания добавочного активного тока и РС – ограничителей, подключенных к электродвигателям, позволяет эффективно ограничивать коммутационные перенапряжения, перенапряжения в режиме ОЗЗ, ликвидировать условие возникновения феррорезонансных и резонансных явлений в сетях 6-10 кВ, добиться высокой селективности токовых защит от ОЗЗ, что позволяет резко сократить число ОЗЗ в сетях 6-10кВ.
8. Внедрение комплекса мер по снижению ОЗЗ на ГПП-2 ОАО “АГК” в период 2004-2005 г. позволило в 2005 г. снизить число ОЗЗ в 4,4 раза по сравнению с 2003 г.

Заключение

В процессе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Анализ эксплуатации распределительных сетей 6-10 кВ на горно – металлургических предприятиях в современных условиях показал, что на долю ОЗЗ приходится 66 % от общего числа аварийных отключений.
2. Основными причинами возникновения ОЗЗ являются КП и перенапряжения, возникающие в режиме ОЗЗ, на их долю соответственно приходится 38,5 % и 33 % аварийных отключений.
3. Длина и сечение кабельной линии, связывающей включатель и электродвигатель, оказывают существенное влияние на величину КП, если электродвигатель коммутируется масляным выключателем, и не оказывает практически ни какого влияния, если электродвигатель коммутируется вакуумным выключателем.
4. Экспериментальные исследования показали, что с ростом мощности электродвигателей максимальная кратность перенапряжений на зажимах электродвигателя снижается, так при использовании вакуумных выключателей зафиксированы следующие максимальные кратности перенапряжений для синхронных электродвигателей: 7,4; 7; 6,5; 6,2; 5,5; 5,2; 3,4; 2,5, мощность которых соответственно составляла 315, 400, 500, 630, 1000, 1250, 2500, 6300 кВт; а для асинхронных электродвигателей аналогичной мощности максимальная кратность перенапряжений соответственно равна 6,4; 6,2; 6; 5,8; 5,3; 5,2; 4; 3. При использовании масляных выключателей максимальная кратность перенапряжений для вышеуказанных синхронных электродвигателей равна: 4,8; 4,6; 4,5; 4,3; 3,8; 3,6; 2,4; 1,6, а для асинхронных электродвигателей соответственно составила: 4,6; 4,4; 4,25; 4,1; 3,7; 3,6; 2,9; 2,5.

5. Обработка экспериментальных значений КП методами математической статистики позволила разработать инженерную методику оценки КП в любой точке системы “выключатель – кабель – электродвигатель”, не прибегая к методам математического моделирования и к экспериментальным измерениям.
6. При выполнении экспериментальных исследований установлено, что кратность перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ для сети 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью при емкостном токе ОЗЗ до 5 А не превышает 2,1. Если величина тока ОЗЗ находится в диапазоне 5÷50 А, то кратность перенапряжения находится в пределе 2,2÷3,0. С увеличением емкостного тока свыше 50 А кратность перенапряжения не превышает 2,5. Для сети с компенсированной нейтралью кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ может быть снижена до 1,7÷1,8, если разбалансировка реактора не превышает 5 %, в противном случае кратность перенапряжения возрастает и становится соизмеримой с кратностью перенапряжений для сети с изолированной нейтралью.
7. При заземлении нейтрали сети 6 – 10 кВ на землю через резистор можно снизить кратность перенапряжений до 2,0, если выполняется условие $I_a/I_c \geq 0,2$, а при выполнении условия $I_a/I_c \geq 0,6$ кратность перенапряжений снижается до 1,7÷1,8. Дальнейшее увеличение добавочного активного тока практически не приводит к снижению кратности перенапряжений.
8. Экспериментальные исследования показали, что максимальные значения КП, превышающие напряжение сети в 8 раз, могут возникать в режиме ОЗЗ в неповрежденной линии с двигательной нагрузкой в той фазе, в которой существует ОЗЗ, в случае отключения данной линии от сети вакуумным выключателем.
9. Математическое моделирование КП в режиме ОЗЗ в сети с двигательной нагрузкой подтвердило экспериментальные исследования и

показало, что на величину КП, возникающих в фазе, связанной с землей, влияют следующие факторы: повторные зажигания дуги в вакуумной камере, величина присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, ток среза, мощность электродвигателя и расстояние между местом ОЗЗ и электродвигателем. Установлено, что рост мощности электродвигателя, увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя и уменьшение тока среза приводят к снижению уровня КП, а увеличение расстояния между местом ОЗЗ и электродвигателем увеличивает число повторных зажиганий дуги в вакуумной камере, и как следствие, повышает уровень КП.

10. Математическое моделирование КП, возникающих на фазе статорной обмотки, не связанной с землей, с учетом повторных зажиганий дуги в вакуумной камере при неселективном отключении электродвигателя в режиме ОЗЗ показало, что на величину и характер КП оказывают серьезное влияние не только величина присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, ток среза, мощность электродвигателя, кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ, расстояния между местом ОЗЗ и электродвигателем, но и соотношение между частотой колебаний напряжения ($f_{\text{ОЗЗ}}$) на неповрежденной фазе сети в режиме ОЗЗ и частотой свободных колебаний электромагнитной энергии в отключаемом контуре нагрузки ($f_{\text{св}}$). Если $f_{\text{ОЗЗ}} \leq f_{\text{св}}$, то соблюдаются закономерности изложенные в предыдущем выводе, а если $f_{\text{ОЗЗ}} > f_{\text{св}}$, то увеличение присоединенной емкости приведет к росту кратности КП.

11. Наиболее эффективным средством ограничения КП является универсальный трехфазный RC-ограничитель, т.к. осуществляет ограничение КП до $1,7U_n$, что не представляет опасности для изоляции электродвигателя. Кроме этого, усредненные параметры RC-ограничителя ($R=50 \text{ Ом}$, $C=0,25 \text{ мкФ}$) позволяют наладить серийное производство ограничителя RC – 6,6 – 0,25/50, а корпус устройства

со степенью защиты IP – 54 позволяет размещать RC–ограничители в непосредственной близости от объекта защиты, при этом максимальное удаление не должно превышать 10 м.

12. Наложение добавочного активного тока величиной 12 и 10 на ток ОЗЗ соответственно в сетях напряжением 6 кВ и 10 кВ позволяет ликвидировать феррорезонансные и резонансные перенапряжения, добиться селективной работы токовых защит от ОЗЗ, ограничить перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня $1,8U_n$ не представляющих серьезной опасности как для изоляции электродвигателей, так и для изоляции кабельных линий, т.к. допустимая кратность перенапряжений для указанных объектов соответственно составляла $1,8U_n$ и $2,8U_n$.
13. Разработанное в настоящей работе устройство для создания добавочного активного тока типа УДАТ – 10,5 – 500/75 выпускается в ООО “Рутас” как опытно – промышленная партия и является термически устойчивым, т.к. предусмотрен принудительный отвод тепла, и недорогим, так как выполнен из простых и дешевых материалов. Время работы устройства в режиме ОЗЗ при температуре окружающей среды 40°C составляет 12 ч.
14. Комплексный подход к снижению ОЗЗ, основанный на совместной работе устройства для создания добавочного активного тока и RC – ограничителей, подключенных к зажимам электродвигателей, позволяет эффективно ограничивать КП, перенапряжения в режиме ОЗЗ, ликвидировать условие возникновения феррорезонансных и резонансных явлений в сетях 6-10 кВ, добиться высокой селективности токовых защит от ОЗЗ, что позволит сократить число ОЗЗ в сетях 6-10кВ. Внедрение комплекса мер по снижению ОЗЗ на ГПП-2 ОАО “АГК” в период 2004-2005 г. позволило в 2005 г. снизить число ОЗЗ в 4,4 раза по сравнению с 2003 г.

Библиографический список

1. Абрамович Б. Перенапряжения и электрическая совместимость оборудования электрических сетей 6 – 35 кВ /Б. Абрамович, С. Кабанов, А. Сергеев, В. Полищук // Новости электротехники. 2002.–№5–С. 22 – 24.
2. Аношин О.А. Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений в электрических сетях 6 – 10 кВ / О.А. Аношин // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 159 – 161.
3. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю /Е. А. Аржанников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
4. Базуткин В.В. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
5. Белкин Г.С. Закономерности среза тока в вакууме / Г.С. Белкин // Электричество. – 1991. – №4. – С.6 – 10.
6. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю / Н.Н. Беляков //Электричество. – 1957. – №5. – С.31 – 36.
7. Бикфорд Д.П. Моделирование на цифровых ЭВМ процесса неявного среза тока в вакуумных выключателях / Д.П. Бикфорд // Elektric Applications. – 1979. – №4. – С.125 – 131.
8. Брянцев А.М. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10кВ / А.М. Брянцев, Б.И.Базилев, В.В Базуткин, А.Г. Донгополов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 97 – 109.
9. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г.В. Буткевич.– М.: Высшая школа, 1967. – 163 с.

10. Бухтояров В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
11. Вакуумное отключение – обзор проблем / Seizer A. // Инфорэлектро. – № 43964. – 27 с. – IEEE Trans., 1972. V.1A – 8. – № 6 – р. 707 – 717.
12. Вакуумные дуги: Пер с англ. / Под. ред. Дж. Лаффети. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
13. Виштибеев А.В. Эффективность резистивного заземления нейтрали в кабельных электрических сетях 6-10 кВ / А.В. Виштибеев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Тр.П Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 84 – 94.
14. Воздвиженский В.А. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В.А. Воздвиженский, А.Ф. Гончаров, В.Б. Козлов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
15. Воздвиженский В.А. Срез тока в вакуумном выключателе / В.А. Воздвиженский // Электричество. – 1973. – №6. – С.57 – 61.
16. Гандулин Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 – 35кВ / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халимов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
17. Гольдберг О.Д. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность электродвигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Комлев, Н.И. Суворов [и др.] // Электротехника. – 1968. – №5. – С.14 – 18.
18. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистики / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1975. – 333 с.
19. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика/ В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1998. – 479 с.
20. Гончаров А.Ф. Повышение эффективности применения РС – ограничителей коммутационных перенапряжений / А.Ф. Гончаров, В.Н. Язев, В.В. Павлов [и др.] // Информационно – аналитический сборник – “Красноярскэнергонадзор”. – 2002. – №2. – С. 81 – 84.

21. Гончаров А.Ф. Выбор защитных емкостей для высоковольтных двигателей экскаваторов с учетом тока однофазного замыкания на землю / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1986. – №11. – С.26 – 29.
22. Гончаров А.Ф. Влияние РС – защиты от коммутационных перенапряжений на условие электробезопасности / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, С.В. Кузьмин, Ю.М. Попов // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1989. – №8. – С.32 – 36.
23. Гончаров А.Ф. Анализ результатов измерения перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей экскаваторов / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн, Ю.Н. Попов [и др.] // Электротехника. – 1986. – №9. - С.13 – 16.
24. Даки Н.В. Режимы заземления нейтрали сетей 6-10 кВ ОАО “Газпром / Н.В. Даки, С.В. Великий, А.А. Челазнов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.13 – 22.
25. Дергилев М.П. Перенапряжения в сетях 6-10 кВ с двигательной нагрузкой при разных способах заземления нейтрали / М.П. Дергилев, В.К. Обабков // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.106 – 112.
26. Джуварлы Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сетях с изолированной нейтралью / Ч.М. Джуварлы // Электричество. – 1953. – №6. – С.18 – 27.
27. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах / А.И. Долгинов. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 126 с.
28. Евдокунин Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин. – С. – Петербург: Изд-во Сизова М.П., 2002. – 147 с.
29. Евдокунин Г.А. О методических указаниях по применению нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6 – 35 кВ / Г.А. Евдокунин, С.С.

- Титенков // Ограничители перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.162 – 165.
30. Жуковский Ю.Л. Повышение надежности и эффективности систем электроснабжения с автоматическим секционированием на стороне 6 (10) кВ: Автореф. дис...канд.техн.наук. – Санкт – Петербург, 2006. – 22 с. – В над-заг.: Санкт – Петербург гос. горн. ин-т. Г.В. Плеханова (техн. ун-ет).
31. Заболотников А.П. Выбор ограничителей перенапряжений для сетей 6 – 35 кВ / А.П. Заболотников // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.177 – 183.
32. Заболотников А.П. Анализ повреждений ограничителей перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в “Кузбасэнерго” / А.П. Заболотников, Л.И. Сарин, Б.И. Тагильцев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.175 – 177.
33. Зевеке Г.В. Основы теории цепей: Учеб. пособие для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1965. – 450 с.
34. Ильиных М.В. Внедрение резисторов в сети собственных нужд ТЭЦ – 3 ОАО “Саратовэнерго” / М.В. Ильиных, Л. И. Сарин, Д.Б. Дагаев, И.И. Хуртов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.40 – 45.
35. Каганов З.Г. Внутренние воздействия перенапряжений и другие воздействия на витковую изоляцию электродвигателей. Испытание витковой изоляции электрических машин / З.Г. Каганов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
36. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах / З.Г. каганов. – М.: Энергия, 1970. – 209 с.

37. Корицкий Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
38. Кузнецов Н.Д. Перенапряжения при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями / Н.Д. Кузнецов, И.Л. Дегтярев // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.142 – 146.
39. Кузьмин С.В. Проблемы перенапряжений при использовании вакуумных коммутационных аппаратов / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, Р.А. Майнагашев, Б.С. Заварыкин, И.В. Краснова // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных материалов и золота: Материалы международной научно – практической конференции / Под. ред. В.В. Кравцова: ГУЦМиЗ, – Красноярск, 2006. – С.283 – 287.
40. Кузьмин С.В. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ угольных разрезов / С.В. Кузьмин, А.И. Кожин // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С.183 – 187.
41. Кузьмин С.В. Анализ аварийности внутренних перенапряжений в сетях 6-10кВ промышленных предприятий Красноярского края / С.В. Кузьмин, В.Г. Тарнопольский, А.Ф. Гончаров [и др.] // Информационно – аналитический сборник “Красноярскэнергонадзор”, 2001 – №3. – С.32 – 40.
42. Куликовский В.С. Защита высоковольтных электродвигателей экскаваторов от коммутационных перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Красноярск, 2002 – 26 с. – В надзад: Краснояр. гос. техн. ун-т.
43. Куликовский И.С. Зависимость режимов работы вакуумных выключателей от свойств вакуумной дуги, последующих явлений, вакуумной изоляции и параметров коммутируемой цепи. Возможности использования вакуума в электрических сетях / И.С. Куликовский // Обзор материалов 17

- научного симпозиума “Электрические разряды и электрическая изоляция в вакууме”. – Познань, 1980. – 29 с.
44. Лифачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лифачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
45. Методика сбора и обработки статистической информации о надежности шахтного электрооборудования / Под ред. Р.Г. Беккера: ИГД им Скочинского, 1975. – 96с.
46. Немеш М. Коэффициент перенапряжений при однофазном замыкании в распределительных сетях с нейтралью, заземленной через ограничительный резистор / М. Немеш, Д. Вэкару, Ш. Аренстайн. – Энергетика (СРР). – 1982. – №1. – С.13 – 16.
47. Обабков В.К. Еще раз о компенсации емкостных токов в сетях 6 – 35 кВ / В.К. Обабков // Энергетика. – 2002. – №2. – С.32 – 36.
48. Обабков В.К. Устройства автокомпенсации емкостных и активных составляющих типа УАРК в системах электроснабжения с резонансным заземлением нейтрали / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // Пром. энергетика. – 1989. – №3. – С.17 – 25.
49. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35кВ: Тр тр.ІІІ Всерос. научн. – техн. конф. / Отв. ред. К. П. Кадомская. – Новосибирск, 2004.
50. Озерной М.И. Переходные процессы в участковой электросети при коммутации асинхронных короткозамкнутых электродвигателей / М.И. Озерной, В.М. Фарович // Изв. Вузов – Горный журнал. – 1969. – №3 – С.163 – 168.
51. Пат. №44008 РФ, МПК H0249/04, H01C7/12. Устройство защиты электрооборудования от перенапряжений/ Кузьмин С.В., Береснев В.В, Кузьмин Р.С., Струков А.А. - № 2004116997/22; опубл. 10.02.05 , бюл. №4.

52. Пат. №54254 РФ, МПК H01C7/04. Устройство для заземления нейтрали / Кузьмин С.В., Береснев В.В, Кузьмин Р.С., Струков А.А. - №2005138671/22; опубл. 10.06.06, бюл. №6.
53. Перцев А.А. Повторные пробои двух соединенных последовательно вакуумных дугогасительных камер / А.А. Перцев, Л.А. Рыльская, В.В. Чулков // Электричество. – 1991. – №3. – С.23 – 27.
54. Перцев А.А. Вакуумные дугогасительные камеры для выключателей 35 – 110 кВ / А.А. Перцев, Л.А. Рыльская // Электрическая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения. – 1981. – вып. 8 (121). – С.7 – 10.
55. Половой И.Ф. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения / И.Ф. Половой, Ю.А. Михайлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 152 с.
56. Попов И.А. Вакуумные выключатели / И.А. Попова. – М.: Энергия, 1985. – 200 с.
57. Попов И.Н. Релейная защита основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 246 с.
58. Разгильдеев Г.И. Эксплуатация вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий / Г.И. Разгильдеев, В.В. Курехин. – М.: Недра, 1988. – 102 с.
59. Разработка мероприятий по повышению эффективности применения вакуумных коммутационных аппаратов в карьерных сетях: отчет по НИР 143 – 02, № гос. ре 81066643 / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров, С.Н. Нагарев [и др.] – КИЦМ, 1981. – 52 с.
60. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М.: Наука, 1970. – 536 с.
61. Римап Я.С. Защита шахтных установок сетей от токов короткого замыкания / Я.С. Римап. – М.:Недра, 1985. – 88 с.
62. Рыбкип В.А. Определение волновых параметров и коммутационных перенапряжений при отключении вакуумным выключателем двигателя 6 кВ

- / В.А. Рыбкин, С.С. Чубрик, В.Н. Помыткин // Пром. Энергетика. – 1977. – №11. – С. 41 – 44.
63. Рывкин А.М. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой / А.М. Рывкин, И.А. Лукацкая, А.Л. Буйнов, С.М. Давыдов, В.Д. Леменков // Электрические станции. – 1990. – №1. – С.62 – 68.
64. Рыльская Л.А. Электрическая прочность вакуумной дугогасительной камеры после отключения тока / Л.А. Рыльская, А.А. Перцев // Электротехника. – 1985. – №1. – С.5 – 9.
65. Серов В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, Б.М. Ягудаев. – М.: Наука, 1985. – 136 с.
66. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И.М. Сирота. – Киев: Наукова думка, 1983. – 268 с.
67. Статистическое оценивание / Под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского, М.: Статистика, 1976. – 586 с.
68. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
69. Уинди Б. Кабельные линии высокого напряжения: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 232 с.
70. Цапенко Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей / Е.Ф. Цапенко, Л.И. Сычев, П.Н. Кулешов. – М.: недра, 1988. – 213 с.
71. Шабунов В.А. Разработка схем испытаний выключателя в режиме отключения двигателей высокого напряжения / В.А. Шабунов. – Электротехн. пром – сть. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1984. – вып. 6. – С.12 – 16.
72. Щуцкий В.И. Защита от замыканий на землю в сетях приисков напряжением 6кВ / В.И. Щуцкий, А.А. Буралков, В.С. Смирнов, С.В. Кузьмин, В.М. Соломенцев. – М.: ЦНИИцветмет экономики и информатики, 1990. – 52 с.

73. Электрические и электронные аппараты: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
74. Эпштейн И.Я. Импульсная прочность изоляции экскаваторных электродвигателей / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров, Ю.Н. Попов // Горный журнал. – 1991. – №9. – С. 36 – 39.
75. Эпштейн И.Я. Методика оценки влияния коммутационных аппаратов на эксплуатационную надежность изоляции электрооборудования / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров // Электротехника. – 1990. – №2. – С. 28 – 32.
76. Bloomquist W.C., Owen K.J. High resistance grounded power systems – why not. Pt. 1 – 3/ - In: IEEE Conf. Rec. Annu. Pulp. And Pap. Ind. Techn. Conf., Vancouver, 1975. N.Y., 1975, p. 54 – 62.
77. Bridger B. High resistance grounding/ - IEEE Trans. Industry APPL., 1983, vol. IA – 19, N 1, p. 15 – 21.
78. Gelent B., Schade E., Dullm E. Measurement of particles and vapor density after high Current vacuum arcs by laser techniques // IEEE Trans on Plasma Scienc, 1987. - vol PS -№15. - C.545 - 551.
79. Nassar O.M. Surge protection of motors is it sufficient. - IEEE Trans., 1984, PAS - 103, N 8, p.2181-2185.
80. Ohkawa M, Koike H. Switching surge in vacuum. Switching devices and counter-measures // Toshiba Rev. Int. Ed., 1976. N. 105, p.18 - 25.
81. Wanygary N. Moffatt W. High resistance grounding and selective ground fault protection for major industrial facility. - In: 30th Annu. Petrol, and Chem. Industr. Conf., Deuver (col.), 12-14 Sept., 1983. N.Y., 1983. p. 69-77.

Приложение1

Результаты статистической обработки экспериментальных данных КП

Таблица П1.1

Объект	Разрез: Софроновский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 ; тип дв-ля: СДЭ-14-29-6 УХЛ2; Р=520 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х95+1х25); L=35м; тип экскаватора:Экскаватор ЭКГ-4у.			
Результаты исследований	K(Zi)	3,2; 3,8; 4,4; 4,6;4,3; 5,1; 5,6; 5,9; 2,8; 6,5; 2,3; 2,1; 1,8; 1,9; 6,5; 3,6; 3,9; 5,6; 5,8; 6,3;5,6; 3,2;4,6; 2,9; 2,2; 3,8; 6,5; 3,7; 4,2; 5,7; 5,3; 4,0; 2,1; 1,8; 2,7;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,9604; 0,1444; 0,0484; 0,1764; 0,0144; 0,8464; 2,0164; 2,9584; 1,9044; 5,3824; 3,5344; 4,3264; 5,6644; 5,1984;5,3824; 0,3356;0,0784; 2,0164; 2,6244; 4,4944; 2,0164; 0,9604; 0,1764;1,6384; 3,9204; 0,1444; 5,3824; 0,2304; 0,0004;2,3104; 1,2544; 0,0324; 4,3264;5,6644; 2,1904		
	$\bar{X}$	D	S	V
	4,18	2,3	1,52	0,3632

Таблица П1.2

Объект	Разрез: Бородинский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 ; тип дв-ля: СДСЭ-15-39-6 УХЛ2; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х95+1х25); L=42м; тип экскаватора:ЭКГ-12,5.			
Результаты исследований	K(Zi)	3,7;2,5;4,0;2,4;4,5;3,7; 3,2; 4,9; 2,8; 1,2; 2,6; 5,1; 1,9; 1,7; 3,3; 1,4; 3,2; 1,8; 4,8; 5,2 ;4,9; 5,0; 5,1; 4,6; 1,2; 2,4; 1,3; 2,8; 3,5; 1,7; 2,7; 4,0; 2,6; 4,6; 5,0		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,1764; 0,6084; 0,5184; 0,7744; 1,4884; 0,1764; 0,0064; 2,6244;0,2304; 4,3264; 0,4624; 3,3124; 1,9044; 2,4964; 0,0004; 3,5344; 0,0064; 2,1904; 2,3104; 3,6864; 2,6244; 2,9584; 3,3124; 1,7424; 4,3264; 0,7744; 3,9204;1,3456;0,04840;2,4964;0,3364; 0,5184; 0,4624;1,7424; 3,0976		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,27	1,79	1,34	0,409

Таблица П1.3

Объект	Разрез: Софроновский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 ; тип дв-ля: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; Р=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х120+1х35); L=40м; тип экскаватора:драглайн ЭШ-20/90.			
Результаты исследований	K(Zi)	1,2; 1,6; 1,8; 2,7; 2,3; 2,5; 2,8; 1,9; 2,2; 2 0; 3,4; 3,1; 1,6; 1,4 ;1,3; 2,9; 3,3; 1,4; 2,7; 3,4; 1,5; 2,2; 2,6; 2,4; 2,8; 3,3; 3,4 ; 2,1;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	1,3225; 0,5625; 0,3025; 0,1225; 0,0025; 0,0225; 0,2025; 0,2025; 0,0625; 0,1225; 1,1025; 0,5625; 0,5625; 0,9025; 1,1025; 0,302; 0,9025; 0,9025; 0,1225; 1,1025; 0,7225; 0,0225; 0,0625; 0,0025; 0,2025; 0,9025;1,1025; 0,0625.		
	$\bar{X}$	D	S	V

	2,35	0,503	0,709	0,302

Продолжение приложения 1

Таблица П1.4

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВМП 10-10/630 –УХЛ2 ; тип дв-ля: СДЭ-14-29-6 УХЛ2; Р=520 кВт; п=750об/мин; тип кабельной линии:АСБ(3х95); L=40м;			
Результаты исследований	K(Zi)	3,0; 2,2; 2,6; 3,3; 1,8; 4,5; 1,6; 1,5; 4,0; 1,3; 2,7; 3,3; 3,0; 4,4; 1,6; 2,7; 2,1; 3,9; 1,9; 2,5; 4,5; 3,4; 3,6; 2,7; 3,1;3,9; 4,1; 1,6;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0121; 0,4761; 0,0741; 0,1681; 1,1881; 2,5921; 1,6641; 1,9321; 1,2321; 2,5231; 0,0351; 0,1581; 0,0121; 2,2801; 1,6641; 0,0361; 0,6241; 1,0201; 0,9801; 0,1521; 2,5921; 0,2601; 0,5041; 0,00361; 0,0441; 1,0201; 1,4641; 1,6641		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,89	0,979	0,989	0,342

Таблица П1.5

Объект	Разрез: Черемховский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВМЭ-10-20/630 – УХЛ2 ; тип дв-ля: СДСЭ-15-39-6 УХЛ2; Р=1250 кВт; п=1000об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х95+1х25); L=45м; тип экскаватора:ЭКГ-12,5.			
Результаты исследований	K(Zi)	2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,5; 1,8; 1,4; 3,6; 1,7; 1,2; 3,5; 3,6; 2,9; 1,6; 3,0; 3,4; 1,5; 1,5; 2,7; 2,9; 2,2; 2,4; 2,9; 1,2; 3,4; 1,3;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0169; 0,1089; 0,0729; 0,0729; 0,0169; 0,3249; 0,9604; 1,4884; 2,4964; 1,3689; 1,2769; 1,5129; 0,2809; 0,5929; 0,3969; 1,0609; 0,7569; 0,7569; 0,1089; 0,2809; 0,0289; 0,0009; 0,2809; 1,3689; 1,0609; 1,1449		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,37	0,714	0,845	0,356

Таблица П1.6

Объект	Разрез:Черемховский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВМП 10-20/630 – УХЛ6 ; тип дв-ля: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; Р=2500 кВт; п=750об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х120+1х35); L=35м; тип экскаватора:драглайн ЭШ-20/90.			
Результаты исследований	K(Zi)	1,2; 1,6; 2,4; 2,2; 1,8; 2,0; 1,9; 1,6; 1,7; 2,2; 2,0; 2,3; 1,6; 1,5; 1,4; 2,3; 2,0; 1,2; 2,4; 1,3; 1,6; 1,5; 2,2; 1,6; 2,4; 2,1; 1,5;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,3969; 0,0529; 0,3249; 0,1369; 0,0009; 0,0289; 0,0049; 0,0529; 0,0169; 0,1369; 0,0289; 0,2209; 0,0529; 0,1089; 0,1849; 0,2289; 0,0289; 0,3969; 0,3249; 0,2809; 0,0529; 0,1089; 0,1369; 0,0529; 0,3249; 0,0729; 0,1089;		

	$\bar{X}$	D	S	V
	1,83	0,147	0,383	0,209

Продолжение приложения 1

Таблица П1.7

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВМП 6-10/630 –УХЛ6 ; тип дв-ля: СДЭ-14-29-6 УХЛ2; Р=520 кВт; п=750об/мин; тип кабельной линии:АСБ(3х95); L=120м;			
Результаты исследований	K(Zi)	1,8; 2,6; 2,0; 1,3; 1,9; 2,1; 2,5; 1,7; 1,6; 2,1; 2,0; 1,8; 2,6; 1,8; 1,7; 2,4; 1,9; 1,6; 1,9; 2,1; 1,7; 2,5; 1,8; 1,2; 1,6; 2,1;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0169; 0,4489; 0,0049; 0,3969; 0,0009; 0,0289; 0,3249; 0,0529; 0,1089; 0,0289; 0,0049; 0,0169; 0,4489; 0,169; 0,0529; 0,2209; 0,0009; 0,1089; 0,0009; 0,0289; 0,0529; 0,3249; 0,0169; 0,5329; 0,1089; 0,0289		
	$\bar{X}$	D	S	V
	1,93	0,135	0,367	0,19

Таблица П1.8

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 ; тип дв-ля: СДСЭ-15-39-6 УХЛ2; Р=1250 кВт; п=1000об/мин; тип кабельной линии:АСБ(3х95); L=150м;			
Результаты исследований	K(Zi)	3,0; 3,2; 3,3; 3,1;2,5; 4,7;2,3; 4,8; 2,1; 1,9; 2,0; 4,7; 2,6; 2,2; 3,6; 3,8; 2,9; 2,1; 4,8 ;2,8; 1,7; 3,9; 4,8;3,6; 4,0; 4,1;2,8;3,0; 3,8; 3,4;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0625; 0,0025 ; 0,0025; 0,0225; 0,5625; 2,1025; 0,9025; 2,4025; 1,3225; 1,8225; 1,5625; 2,1025; 0,4225; 1,1025; 0,1225; 0,3025; 0,1225;1,3225; 2,4025; 0,2025; 2,4025; 0,4225; 0,1225; 2,4025; 0,1225; 0,5625; 0,7225; 0,2025; 0,0625; 0,3025; 0,0225;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,25	0,9	0,949	0,292

Таблица П1.9

Объект	Разрез: Черемховский, тип вык-ля: ВВТЭ 10-20/630 –УХЛ2 ; тип дв-ля: СДЭ2-17-57-6 УХЛ2; Р=2500 кВт; п=750об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х120+1х35); L=150м; тип экскаватора:драглайн ЭШ-20/90.			
Результаты исследований	K(Zi)	1,2; 1,4; 1,6; 1,1;1,5; 1,6; 1,7; 1,2; 1,3;1,6; 1,9; 1,7; 1,3; 1,4 ;1,6;1,6; 1,2; 1,1; 1,7; 1,7; 1,6; 1,1; 1,2; 1,7; 1,4; 1,3		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,64; 0,36; 0,16; 0,81; 0,25; 0,16; 0,09; 0,64; 0,49; 0,16; 0,04; 0,09; 0,49; 0,36; 0,16; 0,16; 0,64; 0,81; 0,09; 0,09; 0,16; 0,81; 0,64; 0,09; 0,36; 0,49;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,0	0,37	0,608	0,304

Продолжение приложения 1

Таблица П1.10

Объект	Разрез: Березовский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВВ/ТЕЛ-10-10/1000; тип дв-ля: СДСЭ-15-39-6 УХЛ2; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии:КШВГ(3х95+1х25); L=40м; тип экскаватора:Экскаватор ЭКГ-12,5.			
Результаты исследований	K(Zi)	4,8; 3,4; 3,5; 4,6; 2,5; 1,5; 2,3; 4,8; 2,2; 1,4 ; 3,7; 2,1; 3,5; 1,5; 5,1; 4,9; 5,2; 4,7; 4,8; 4,9; 1,2; 2,7; 2,1; 3,0; 3,2; 2,0; 2,4; 4,3; 2,3; 2,1.		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	2,2801;0,0121 ;0,0441;1,7161;0,6241; 3,2041;0,9801;2,2801;1,1881;3,5721;0,1681;1,4161; 0,0441;3,2041;3,2761; 1,7161;3,6481;1,9881;2,2801; 2,5921;4,3681;0,3481; 1,4161;0,0841; 0,0081; 1,6641;0,7921;1,0201;0,9801;1,4161;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,29	1,67	1,29	0,392

Таблица П1.11

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВВТЭ-10-12,5/630 ; тип дв-ля: СДЭ-14-29-6 УХЛ2; Р=520 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии:АСБ(3х95); L=40м;			
Результаты исследований	K(Zi)	2,8; 2,7; 3,2; 4,6; 6,5; 5,2; 4,1; 1,9; 2,8; 4,7; 5,0; 6,2; 6,5; 1,7; 5,8; 4,3; 3,5; 2,9; 3,2 ; 2,7; 1,9; 5,5; 6,5; 2,1; 4,6; 3,9; 5,9; 6,1.		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	1,8769; 2,1609; 0,9409; 0,1849; 2,33; 1,0609; 0,0049; 5,1529; 1,8769; 0,2809; 0,6889; 4,1128; 5,4289 6,1009; 2,6569; 0,0169; 0,4489; 1,6129; 0,9409; 2,1609; 5,1529; 1,7689; 5,4289; 4,2849; 0,1849; 0,0729; 2,9929; 3,7249;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	4,172	2,36	1,54	0,368

Таблица П1.12

Объект	ОАО «КРАЗ», тип вык-ля: ВВТЭ 10-20/630 –УХЛ6 ; тип дв-ля: СД; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии:ААБ(3х95); L=48м.			
Результаты исследований	K(Zi)	3,6; 3,4; 4,8; 4,2; 4,7; 4,7; 6,0; 5,5; 3,2; 6,1; 2,7; 1,7; 2,2; 1,5; 6,1; 4,0; 3,4; 6,0; 5,4; 6,5; 5,3; 3,6; 4,2; 2,5; 2,6; 3,4; 5,3;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,3249;0,59229;0,3969; 0,0009;0,2809;0,2809;3,3489; 1,7689;0,9409; 3,7249; 2,1609; 6,1009; 3,8809; 7,1289; 3,7249; 0,0289; 0,5929; 3,3489;1,5129; 5,4289; 1,2769;0,3249 0,0009; 2,7889;2,4649; 0,5929; 1,2769;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	4,170	2,09	1,45	0,347

Продолжение приложения 1

Таблица П1.13

Объект	ОАО «АНПЗ ВНК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 –УХЛ2 ; тип дв-ля: СД; Р=520 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ(3х95); L=31м; насос Н-147			
Результаты исследований	K(Zi)	2,1; 3,4; 1,5; 4,6; 4,7; 6,3; 4,6; 4,3; 5,9; 4,4; 2,6; 3,5; 5,0; 3,8; 5,0; 6,3; 5,2; 6,2; 4,3; 4,2; 5,9; 2,5; 1,2; 3,7; 1,7; 6,0.		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	4,3681; 0,6241; 7,2361; 0,1681; 0,2601; 4,4521; 0,1681; 0,0121; 2,9241; 0,0441; 2,5281; 0,4761; 0,6561; 0,1521; 0,6561; 4,4521; 1,0201; 4,0401; 0,0121; 0,0001; 2,9241; 2,8561; 8,9401; 0,2401; 6,2001; 3,2761;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	4,19	2,257	1,5	0,359

Таблица П1.14

Объект	ОАО «АНПЗ ВНК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 –УХЛ2 ; тип дв-ля: СД; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ(3х95); L=31м; насос Н-147			
Результаты исследований	K(Zi)	2,1; 3,4; 1,5; 4,6; 4,7; 6,3; 4,6; 4,3; 5,9; 4,4; 2,6; 3,5; 5,0; 3,8; 5,0; 6,3; 5,2; 6,2; 4,3; 4,2; 5,9; 2,5; 1,2; 3,7; 1,7; 6,0.		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	4,3681; 0,6241; 7,2361; 0,1681; 0,2601; 4,4521; 0,1681; 0,0121; 2,9241; 0,0441; 2,5281; 0,4761; 0,6561; 0,1521; 0,6561; 4,4521; 1,0201; 4,0401; 0,0121; 0,0001; 2,9241; 2,8561; 8,9401; 0,2401; 6,2001; 3,2761;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	4,19	2,257	1,5	0,359

Таблица П1.15

Объект	Разрез: Березовский ОАО «СУЭК», тип вык-ля: ВВТЭ 10-12,5/630 ; тип дв-ля: АКДЭ-10-62-10У2; Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: КШВГ(3х95+1х25); L=38м; тип экскаватора: экскаватор ЭРШРП-5250.			
Результаты исследований	K(Zi)	2,4; 2,3; 3,6; 4,8; 1,1; 1,8; 3,2; 3,3; 4,9; 5,0; 5,2; 1,3; 1,2; 3,6; 2,1; 2,7; 5,2; 4,1; 3,9; 1,6; 2,7; 2,3; 4,5; 4,9; 5,1; 1,7; 1,3; 1,8; 2,7; 2,9; 3,3; 4,6; 4,1; 3,8;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,6889; 0,8649; 0,1369; 2,4649; 4,5369; 2,0449; 0,0009; 0,0049; 2,7889; 3,1329; 3,8809; 3,7249; 4,1209; 0,1369; 0,1849; 0,2809; 3,8809; 0,7569; 0,4429; 2,6569; 0,2809; 0,8649; 1,6129 2,7889; 3,4969; 2,3409; 3,7249 ;2,0449 ;0,2809; 0,1089;0,0049; 1,8769; 0,7569; 0,3249;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,24	1,74	1,32	0,408

Продолжение приложения 1

Таблица П1.16

Объект	ОАО «АГК» сырьевой цех, тип вык-ля: ВВТЭ-10-12,5/630 –УХЛ2 ; тип дв-ля: АДО, Р=2500 кВт; п=750об/мин; тип кабельной линии: ААБ(3х120); L=42м;			
Результаты исследований	K(Zi)	2,6;3,8;2,1;1,3;1,9;2,5;2,9;3,2;1,6;1,2;2,7;4,0;3,9;2,8;1,6;2,1;3,9;1,5;2,4; 2,6;3,1;3,4;1,2;4,0;2,6;3,6;4,0;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0081; 1,2321; 0,3481; 1,9321; 0,0361; 0,0441; 0,2601; 1,1881; 2,2201; 0,0001; 1,7161; 1,4641; 0,0121; 1,1881; 0,3481; 1,4641; 1,4161; 0,0841; 0,0081; 0,1681; 0,5041; 2,0201; 1,7161; 0,0081; 0,8281;1,7161;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,69	0,875	0,936	0,348

Таблица П1.17

Объект	Разрез: Березовский , тип вык-ля: ВМП-10 -12,5/630; тип дв-ля: ВАО - 500LB; P=520 кВт; п=1000 об/мин; тип кабельной линии: КГЭ(3х35+1х25), L= 45 м; тип экскаватора: ЭКГ-12,5			
Результаты исследований	K(Zi)	1,8; 1,6; 3,2; 2,6; 2,3; 3,3; 4,2; 3,8; 4,0; 1,2; 1,5; 3,2; 2,6; 3,9; 4,2; 1,1; 2,6; 2,1; 2,9; 3,1; 3,9;2,0; 4,1; 1,6; 1,2; 3,2; 3,3; 2,1		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,8836; 1,2996 ;0,2116 ;0,0196 ;0,1936 ;0,3136 ;2,1316; 1,1236 ;1,5876; 2,3716; 1,5376; 0,2116; 0,0196; 1,3456; 2,1316; 2,6896; 0,0196; 0,4096; 0,0256; 0,1296; 1,3456; 0,5476; 1,8496; 1,2996; 2,3716; 0,2116; 0,3136; 0,4096 ;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,74	1,0002	1	0,365

Таблица П1.18

Объект	ОАО АГК,сырьевой цех тип вык-ля: ВМП-10-20/630 ; тип дв-ля: АКДЭ-16-62-10У2; Р=1250 кВт; п=1000об/мин; тип кабельной линии:АСБ(3х95); L=45м;			
Результаты исследований	K(Zi)	2,8;2,2;2,6;1,4;1,7;3,6;2,9;3,0;1,5;2,7;2,2;2,9;3,4; 1,2;1,3;2,3;3,0;1,6;3,3 1,6;3,5;1,2;3,6;1,8; 2,1; 2,5;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,1764; 0,0324; 0,0484; 0,9604; 0,4624; 1,4884; 0,2704; 0,3844 ;0,7744; 0,1024; 0,0324; 0,2809; 1,0404; 1,3924; 1,1664; 0,0064; 0,3844; 0,6084; 0,8464; 0,6084; 1,2544; 1,3924; 1,4884; 0,3364» 0,0784; 0,0144;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,38	0,625	0,791	0,332

Продолжение приложения 1

Таблица П1.19

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВМП10-20/630-УХЛ2; тип дв-ля: АДО, Р=2500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ(3х120); L=43м;			
Результаты исследований	K(Zi)	1,8;1,7;2,1;2,3;2,6;2,0;2,7;1,3;2,9;2,8;1,1;1,2;2,9;1,9;1,7 2,6;2,1;2,6; 2,3;2,8;1,61,4; 2,9;1,1;2,0;2,1;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0841; 0,1521; 0,0001; 0,0441; 0,2601; 0,0081; 0,3721; 0,6241; 0,6561; 0,5041; 0,9801; 0,7921; 0,6561; 0,0361; 0,1521; 0,1681; 0,0001; 0,2601; 0,0441; 0,5041; 0,2401; 0,4761; 0,6561; 0,9801; 0,0081; 0,0001;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	2,09	0,346	0,588	0,282

Таблица П1.20

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВМП10-20/630-УХЛ2; тип дв-ля: АДО, Р=1250 кВт; n=1000об/мин; тип кабельной линии: АСБ(3х120); L=78м;			
Результаты исследований	K(Zi)	1,6;2,3;1,4;2,0;1,8;1,7;1,9;2,1;1,3;1,6;1,7;1,4;2,3;1,3;1,9;2 ,1;1,6;2,2; 1,8;1,2;1,9;1,8;1,7; 2,0;1,4;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0196; 0,3136; 0,1156; 0,0676; 0,0036 ;0,0016; 0,0256; 0,1156 ;0,1936; 0,0196 ;0,0016; 0,1296; 0,2916; 0,2116; 0,3136; 0,0256; 0,1296 ;0,0196; 0,2116 ;0,0036; 0,2916 ;0,0256; 0,0036; 0,0016; 0,0676; 0,1156;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	1,74	0,092	0,303	0,174

Таблица П1.21

Объект	ОАО АГК, сырьевой цех тип вык-ля: ВВ/TEL10--20/1000 ; тип дв-ля: АОК-90/77; Р=520 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ(3х95); L=150м;			
Результаты исследований	K(Zi)	2,6;3,1;3,2;4,4;4,5;3,6;5,3;1,5;5,1;6,0;2,4;5,2;2,3;1,2;2,3;1,2; 2,7;3,5;3,9; 5,0;5,0;4,7;2,9;1,3;1,7;2,0;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,5329; 0,0529; 0,0169; 1,1449; 1,3689; 0,0729; 3,8809; 3,3489; 3,1329; 7,1289; 0,8649; 3,4969; 1,0609; 4,5369; 1,0609; 4,5369; 0,3969 ;0,0289; 0,3249 ;2,7889; 2,7889; 1,8769; 0,1849; 4,1109; 2,6569; 1,7689;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,323	2,41	1,55	0,466

Таблица П1.22

Объект	ОАО АГК, тип вык-ля: ВВТЭ-10-12,5/630; тип дв-ля: АОК-90/77; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: АСБ(3х95); L=320м;			
Результаты исследований	K(Zi)	3,6;2,1;4,3;3,3;4,8;3,9;5,4;1,4;5,0;2,8;3,6;1,9;5,8;1,1;2,0;1,5;3,5;1,3 5,7;4,2;3,6;2,2;4,1;3,2;4,3;1,7;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0784; 1,4884; 0,9604; 0,0004; 2,1904; 0,3364; 4,3264; 3,6864; 2,8224; 0,2704; 0,0784; 2,0164; 6,1504; 4,9284; 1,7424; 3,3124; 0,0324; 4,0804; 5,6604; 0,7744; 0,0784; 1,2544; 0,6084; 0,0144; 0,9604; 2,6244;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,32	2,02	1,42	0,428

Таблица П1.23

Объект	Разрез: «Бородинский», тип вык-ля: ВВ/TEL-10-20/1000; тип дв-ля: АОК-90/77; Р=500 кВт; n=750об/мин; тип кабельной линии: КГЭ(3х95+1х25); L=320м; ЭРШРД-5250			
Результаты исследований	K(Zi)	3,4;2,3;3,1;3,5;3,6;3,1;4,2;2,6;5,9;3,9;3,1;5,5;1,9;2,2;1,8;1,7;2,3;1,9;3,2; 4,7;5,8;5,4;3,4;1,8;4,2;1,3;		
	$(Z_i - \bar{X})^2$	0,0081; 1,0201; 0,0441; 0,0361; 0,0841; 0,0441 ;0,7921; 0,5041; 6,7081; 0,3481; 0,04041; 4,7961; 1,9881; 1,2321; 2,2801; 2,5921;1,0201; 1,9881; 0,0121; 1,9321; 6,2001; 4,3681; 0,0081;2,2801; 0,7921; 2,9204;		
	$\bar{X}$	D	S	V
	3,31	1,76	1,33	0,401

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

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

Для синхронных электродвигателей сравниваем данные следующих таблиц:

1) табл. П1.1 с табл. П1.4, так как мощности синхронных двигателей составляют 520 кВт; длина кабельной линии изменяется от 35 до 40 м; $S = 95 \text{ мм}^2$;

2) табл. П1.2 с табл. П1.5, так как мощности равны 1250 кВт; длина кабельной линии изменяется от 42 до 45 м; $S = 95 \text{ мм}^2$;

3) табл. П1.3 с табл. П1.6, мощности синхронных двигателей составляют 2500 кВт, длина кабельной линии изменяется от 35 до 40 м; $S = 120 \text{ мм}^2$.

Для асинхронных электродвигателей сравниваем данные следующих таблиц:

1) табл. П1.14 с табл. П1.17, так как мощности асинхронных двигателей составляют 520 кВт; длина кабельной линии изменяется от 40 м до 45 м; $S = 95 \text{ мм}^2$;

2) табл. П1.15 с табл. П1.18, так как мощности равны 1250 кВт; длина кабельной линии изменяется от 38 м до 45 м; $S = 95 \text{ мм}^2$;

3) табл. П1.16 с табл. П1.19, где мощности асинхронных двигателей составляют 2500 кВт, длина кабельной линии изменяются от 42 м до 43 м; $S = 120 \text{ мм}^2$.

В табл. П1.24÷П1.26 используются вакуумные выключатели, а в табл. П1.27÷П1.29 – масляные выключатели.

В табл. П1.1, П1.2, П1.3, П1.14, П1.15, П1.16 приведены данные с использованием вакуумных выключателей, а в табл. П1.4, П1.5, П1.6, П1.17, П1.18, П1.19 приведены данные с использованием масляных выключателей.

Результаты проверки выборок на однородность для синхронных и асинхронных электродвигателей приведены в табл. П1.24 и П1.25 соответственно.

Продолжение приложения 1

Таблица П1.24 – Проверка выборок на однородность для синхронных электродвигателей, коммутируемых вакуумными или масляными выключателями.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл.П1.1 и П1.4	125	2,3	61	83	0,045	Нет
2	Табл.П1.2 и П1.5	95,4	2,51	59	83	0,035	Нет
3	Табл.П1.3 и П1.6	93,6	3,02	53	77	0,025	Нет

Таблица П1.25 – Проверка выборок на однородность для асинхронных электродвигателей, коммутируемых вакуумными или масляными выключателями.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл.П1.1 4 и П1.17	58,9	2,2	61	86	0,03	Нет
2	Табл.П1.1 5 и П1.18	91,8	2,71	58	80	0,04	Нет
3	Табл.П1.1 6 и П1.19	73,2	2,32	51	70	0,04	Нет

Данные табл. П1.24 и П1.25 указывают, что при коммутации однотипных синхронных или асинхронных электродвигателей разными коммутационными аппаратами возникают КП разные по величине и характеру, так как выборки не объединяются, то есть тип коммутационного аппарата оказывает серьезное влияние на величину и характер КП. Сопоставляя математическое ожидание в вышеприведенных таблицах можно сделать вывод о том, что при замене масляных выключателей на вакуумные среднее значение КП в системах

Продолжение приложения 1

электрооборудования синхронных и асинхронных электродвигателей возрастет на 30 – 36 %.

Для определения влияния мощности электродвигателя на величину КП необходимо проверить данные на однородность тех таблиц, у которых однотипные коммутационные аппараты, а длины кабельных линий имеют близкие значения. Следовательно, для синхронных электродвигателей необходимо сравнить следующие таблицы: табл. П1.1 с табл. П1.3, табл. П1.1 с табл. П1.2, табл. П1.2 с табл. П1.3. В рассматриваемых таблицах для коммутации синхронных электродвигателей используются вакуумные выключатели. Также необходимо сравнить табл. П1.4 с табл. П1.5, табл. П1.5 с табл. П1.6 и табл. П1.4 с табл. П1.6, где используются масляные выключатели для коммутации синхронных электродвигателей.

Для асинхронных электродвигателей необходимо сравнить друг с другом данные табл. П1.14, П1.15, П1.16, т.к. для коммутации асинхронных электродвигателей используются вакуумные выключатели, а также данные табл. П1.17, П1.18, П1.19, где используются масляные выключатели. Результаты проверок выборок на однородность для синхронных и асинхронных электродвигателей приведены в табл. П1.26 и П1.27 соответственно.

Таблица П1.26 – Проверка выборок на однородность для синхронных электродвигателей с разной мощностью.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1.1 и П1.3	194	3,96	61	86	0,03	Нет
2	Табл. П1.1 и П1.2	89,7	0,75	67	90	0,045	Нет
3	Табл. П1.2 и П1.3	105	3,32	60	84	0,03	Нет
4	Табл. П1.4 и П1.5	55,3	0,82	52	74	0,04	Нет
5	Табл. П1.5 и П1.6	78	3,58	51	75	0,03	Нет
6	Табл. П1.4 и П1.6	143,1	4,33	53	79	0,03	Нет

Продолжение приложения 1

Таблица П1.27 – Проверка выборок на однородность для асинхронных электродвигателей с разной мощностью.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1.14 и П1.16	194	3,96	61	86	0,03	Нет
2	Табл. П1.14 и П1.15	89,7	0,75	67	90	0,045	Нет
3	Табл. П1.16 и П1.15	105	3,32	60	84	0,03	Нет
4	Табл. П1.17 и П1.15	55,3	0,82	52	74	0,04	Нет
5	Табл. П1.18 и П1.19	78	3,58	51	75	0,03	Нет
6	Табл. П1.17 и П1.19	143,1	4,33	53	79	0,03	Нет

Данные табл. П1.26 и П1.27 показывают, что мощность электродвигателя серьезно влияет на величину и характер КП. С ростом мощности электродвигателя КП снижаются. Снижение величины КП с ростом мощности электродвигателей имеет нелинейный характер. Например, с увеличением мощности асинхронного электродвигателя с 520 до 1250 кВт и с 1250 до 2500 кВт среднее значение перенапряжения снижается соответственно на 22 % и на 28 % при использовании вакуумных выключателей в роли коммутационных аппаратов. При использовании масляных выключателей снижение средних значений перенапряжений для указанных типов электродвигателей соответственно составляет 28 % и 23 %. Для асинхронных электродвигателей снижение средних значений КП с ростом мощности от 500 до 1250 кВт и от 1250 до 2500 кВт соответственно составляют 3 % и 17 %, при использовании вакуумных выключателей. Если использовать масляные выключатели для коммутации указанных выше асинхронных электродвигателей, то перенапряжение снижается соответственно на 13 % и 12 %.

Для определения влияния длины кабельной линии на КП необходимо сравнить данные тех таблиц, в которых мощность электродвигателя, тип

Продолжение приложения 1

кабельной линии и тип коммутационного аппарата одинаковы, а длины кабельных линий – разные. Кроме этого, сечение кабельной линии должно быть одним и тем же. Поэтому необходимо сравнить данные табл. П1.4 и П1.7, в которых мощность синхронных электродвигателей равна 520 кВт, тип выключателя - масляный, сечение 95 мм². В первом случае длина кабельной линии составляет 40, а во втором – 120 м. Сравниваем таблицы П1.8 и П1.2, в которых мощность синхронного электродвигателя 1250 кВт, тип выключателя - вакуумный, длина кабельной линии в первом случае равна 150 м, во втором 42, сечение кабельных линий составляет 95 мм². Также необходимо сравнить данные табл. П1.9 и П1.3, в которых мощность синхронного электродвигателя 2500 кВт и используется масляный выключатель, длина кабельной линии в первом случае равна 150 м, во втором 40 м, сечение - 120 мм². Результаты проверки выборок сведены в табл. П1.28.

Применительно к асинхронным электродвигателям необходимо сравнить данные табл. П1.21 и П1.22, в которых мощность асинхронных двигателей равна 500 кВт, тип выключателя вакуумный, сечение кабельной линии 95 мм². В первом случае длина кабельной линии составляет 150 м, а во втором – 320 м.

Таблица П1.28 – Проверка выборок на однородность для синхронных электродвигателей при различной длине кабельных линий.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	X^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1.4 и П1.7	127,1	4,38	52	76	0,03	Нет
2	Табл. П1.8 и П1.2	2,23	194	63	48	0,93	Да
3	Табл. П1.9 и П1.3	51,8	0,8	52	74	0,04	Нет

Продолжение приложения 1

Далее сравниваем табл. П1.14 и П1.21, в которых мощности асинхронных двигателей составляют 500 кВт, тип выключателя - вакуумный, длина кабельной линии в первом случае равна 40 м, во втором 150, сечение кабельных линий составляет 95 мм². Также необходимо сравнить данные табл. П1.18 и П1.20, в которых мощности двигателей составляют 1250 кВт и используются масляные выключатели, длина кабельной линии в первом случае равна 45 м, во втором 78 м, сечение кабельной линии - 95 мм². Результаты проверки выборок сведены в табл. П1.29.

Таблица П1.29 – Проверка выборок на однородность для асинхронных электродвигателей при различной длине кабельной линии.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	X ²	P{ χ^2 }	
1	Табл. П1.14 и П1.21	0,753	0,216	59	43	0,96	Да
2	Табл. П2.21 и П1.22	0,619	0,445	50	36	0,94	Да
3	Табл. П2.18 и П1.20	98,3	4,17	50	74	0,03	Нет

Данные табл. П1.28 и П1.29 указывают на тот факт, что если в качестве коммутационного аппарата используется масляный выключатель, то длина кабельной линии оказывает существенное влияние на величину КП. С увеличением длины кабельной линии величина КП снижается. Влияние длины кабельной линии на КП происходит практически для всех типов электродвигателей, которые эксплуатируются с масляными выключателями.

В случае использования вакуумных выключателей длина кабельных линий практически не влияет на величину КП на зажимах электродвигателя.

При проведении осциллографирования КП автором были получены результаты, которые показали, что при коммутации электродвигателей

Продолжение приложения 1

вакуумными выключателями частота коммутационного импульса находится в диапазоне 45÷120 кГц. Можно предположить, что в этом случае распределенное продольное сопротивление кабельных линий возрастает. Это приводит к тому, что емкость кабельной линии не оказывается сосредоточенной на зажимах электродвигателя и присоединенная емкость на зажимах электродвигателя ограничивается собственной емкостью статорной обмотки. Емкость статорной обмотки в несколько раз меньше емкости кабельной линии.

Известно [17, что величина напряжения на зажимах электродвигателя после его отключения от электрической сети вакуумным выключателем определяется выражением:

$$U = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где i_0 – срез тока в вакуумной камере выключателя, А;

L – индуктивность статорной обмотки электродвигателя, Гн;

C – присоединенная емкость на зажимах электродвигателя, Ф.

Очевидно, что с уменьшением присоединенной емкости на зажимах электродвигателя напряжение резко возрастает. Это объясняет тот факт, что при замене масляных выключателей на вакуумные максимальное значение коммутационного импульса на зажимах электродвигателя возрастает в 1,5÷3 раза при одной и той же длине кабельной линии между выключателем и электродвигателем.

При отключении электродвигателей от электрической сети масляными выключателями КП возникают за счет виртуального среза тока [17, 43].

Осциллографирование коммутационных перенапряжений при отключении электродвигателей масляными выключателями показало, что частота коммутационного импульса находится в диапазоне 5÷12 кГц, т.е. почти в 10 раз ниже коммутационного импульса, создаваемого вакуумными выключателями. В этом случае распределенное продольное сопротивление кабельной линии имеет незначительную величину.

Продолжение приложения 1

Это приводит к тому, что определенная часть емкости кабеля оказывается сосредоточенной на зажимах электродвигателя, т.е. сосредоточенная емкость возрастает и происходит ограничение величины перенапряжений на зажимах электродвигателя.

Синхронные и асинхронные электродвигатели эксплуатируются в разных сферах производства и приводят в работу разное технологическое оборудование.

Остается открытым вопрос, влияют ли технологические процессы и производственные условия на величину и характер КП. Для решения данного вопроса достаточно проверить выборки для синхронных электродвигателей на однородность, которые приведены в табл. П1.1, П1.11, П1.12, П1.13, и сравнить данные табл. П1.22 и П1.23 для асинхронных электродвигателей.

Для этого необходимо, чтобы выполнялись следующие условия: тип и мощность электродвигателей, длина и сечение кабельных линий были одинаковы, а двигатели коммутировались одинаковыми типами выключателей.

Синхронный электродвигатель, данные которого приведены в табл. П1.1, эксплуатируется на угольном разрезе, а синхронный электродвигатель, данные которого приведены в табл. П1.11, эксплуатируется на Ачинском глиноземном комбинате. В табл. П1.12 приведены данные электродвигателя, эксплуатирующегося на Красноярском алюминиевом заводе, а в табл. П1.13 приведены данные двигателя, эксплуатируемые на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе. В первом случае двигатель установлен на экскаваторе, во втором случае двигатель установлен на дробильной мельнице, в третьем случае двигатель установлен на компрессорной станции, а в четвертом случае на насосной установке.

Асинхронный двигатель, данные которого приведены в табл. П1.22, эксплуатируется на Ачинском глиноземном комбинате, а в табл. П1.23 приведены данные электродвигателя, который эксплуатируется на угольном

Продолжение приложения 1

разрезе “Бородинский”. В табл. П1.30 приведены результаты проверки выборок на однородность.

Таблица П1.30 – Проверка выборок на однородность для электродвигателей, эксплуатируемых на предприятиях с различными технологическими процессами.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1.1 и П1.11	0,635	0,073	61	44	0,95	Да
2	Табл. П1.1 и П1.12	0,798	0,268	60	43	0,95	Да
3	Табл. П1.1 и П1.13	0,758	0,07	59	42	0,95	Да
4	Табл. П1.11 и П1.12	0,149	0,316	53	36	0,96	Да
5	Табл. П1.12 и П1.13	1,15	0,14	52	37	0,94	Да
6	Табл. П1.22 и П1.23	2,46	0,625	59	43	0,94	Да

Данные табл. П1.30 показывают, что производственные условия и технологические процессы не оказывают влияния на КП, так как выборки представленные в табл. П1.1, П1.11, П1.12, П1.13 объединяются в одну генеральную совокупность, также объединяются в одну генеральную совокупность данные табл. П1.22 и П1.23.

В последнее время в литературе [64, 78] часто встречается полемика по вопросу о том, что разные модели вакуумных выключателей создают разные по величине КП при коммутации однотипной индуктивной нагрузки. В частности утверждают, что выключатели, производимые фирмой «Таврида – электрик», создают более низкие КП, чем другие типы выключателей, производимые в нашей стране.

Для установления влияния моделей вакуумных выключателей на КП, проверим выборки, которые представлены в табл. П1.2, П1.10 и П1.22, П1.23 на однородность.

Продолжение приложения 1

. В табл. П1.2 представлен вакуумный выключатель Минусинского производства, который коммутирует синхронный электродвигатель мощностью 1250 кВт, эксплуатируемый на разрезе Бородинский, а в таблице П1.10 представлен вакуумный выключатель производства «Таврида-электрик», коммутирующий аналогичный синхронный электродвигатель, эксплуатируемый на разрезе «Березовский».

В табл. П1.22 и П1.23 соответственно представлены вакуумные выключатели Минусинского производства и выпускаемые фирмой «Таврида - электрик». Вакуумные выключатели коммутируют однотипные асинхронные электродвигатели мощностью 520 кВт, находящиеся в эксплуатации соответственно на ОАО «Ачинский глиноземный комбинат» и на угольном разрезе «Бородинский».

В табл. П1.31 приведены результаты проверки выборок на однородность.

Таблица П1.31 – Проверка выборок на однородность для электродвигателей, коммутация которых осуществляется разными типами вакуумных выключателей.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	R	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1.2 и П1.10П	1,96	0,217	63	46	0,94	Да
2	Табл. П1.22 и П1.23	2,46	0,625	59	43	0,94	Да

Из табл. П1.31 видно, что данные, представленные в табл. П1.2 и П1.10, а также в табл. П1.22 и П1.23, можно объединять, это говорит о том, что модель вакуумных выключателей практически не оказывает влияния на величину и характер КП. Это можно объяснить тем, что импульс КП генерируется в статорной обмотке двигателя, а вакуумный выключатель создает предпосылки для возникновения данного импульса за счет среза тока в вакуумной камере.

Продолжение приложения 1

Установлено [16, 53, 54, 56,], что прерывание дуги в вакуумной камере происходит при расхождении контактов на 1,8 - 2 мм во всех вакуумных камерах, следовательно, и срез тока будет иметь практически одно значение для всех вакуумных камер, которые используются в современных вакуумных выключателях.

Для определения влияния типа электродвигателей переменного тока на величину КП необходимо сравнить данные таблиц, в которых тип электродвигателя разный (синхронный и асинхронный), мощности электродвигателей одинаковы, длины и сечение кабельных линий должны иметь близкие значения, коммутационные аппараты одностипные. Следовательно, сравниваем следующие таблицы: табл. П1.4 с табл. П1.17, табл. П1.5 с табл. П1.18 и табл. П1.6 с табл. П1.19.

В табл. П1.4 и П1.17 мощность электродвигателей равна 500 кВт, в первом случае тип электродвигателя синхронный, во втором – асинхронный. В табл. П1.5 и П1.18 используются соответственно синхронный и асинхронный электродвигатели, мощностью 1250 кВт. В табл. П1.6 и П1.19 используются соответственно синхронный и асинхронный электродвигатели мощностью 2500 кВт. Электродвигатели коммутируются масляными выключателями.

Результаты проверки выборок на однородность приведены в табл.П1.32.

Не объединение выборок указывают на то, что для двигателей переменного тока мощностью менее или более 1250 кВт тип электродвигателя оказывает большое влияние на величину КП. Для электродвигателей мощностью 1250 кВт тип электродвигателя не оказывает существенного влияния на КП, т.к. выборки в этом случае объединились.

Продолжение приложения 1

Таблица П1.32 – Проверка выборок на однородность для разных типов электродвигателей, которые коммутируются масляными выключателями.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. П1. 4 и П1.17	15,5	0,1	54	73	0,048	Нет
2	Табл. П1.5 и П1.18	12	0,34	50	35	0,94	Да
3	Табл.П1. 6 и П1.19	49,7	2,1	51	70	0,049	Нет

Далее рассмотрим влияние типа электродвигателей на КП, где в качестве коммутационного аппарата используется вакуумные выключатели. Как и в предыдущем случае, сравнивались синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 520, 1250 и 2500 кВт. Данные для указанных электродвигателей соответственно приведены в таблицах П1.1 и П1.14; П1.2 и П1.15; П1.3 и П1.16.

Результаты проверки выборок на однородность представлены в табл. П1.33

Таблица П1.33 – Проверка выборок на однородность для разных типов электродвигателей, которые коммутируются вакуумными выключателями.

№	Варианты для сравнения	Критерии					Возможность объединения
		$t_{\bar{x}}$	$t_{\bar{s}}$	r	χ^2	$P\{\chi^2\}$	
1	Табл. 2. 1 и 3. 1	82,66	0,12	69	94	0,04	Нет
2	Табл. 2.2 и 3. 2	2,4	0,16	68	52	0,93	Да
3	Табл.2. 3 и 3. 3	41	1,44	53	74	0,04	Нет

Данные табл. П1.33 показывают, что при использовании вакуумных выключателей сохраняется та же тенденция, что и при использовании масляных выключателей. Видно, что тип электродвигателя серьезно влияет на

Продолжение приложения 1

величину КП, если используются электродвигатели мощностью более или менее 1250 кВт, на это указывает тот факт, что выборки не объединились. При мощности электродвигателей равной 1250 кВт выборки объединились, что говорит о том, что тип электродвигателя не оказывает существенного влияния на величину КП.

Проверка выборок на экстремальность позволяет установить, является ли максимальное значение КП закономерной или случайной величиной за счет ошибок при измерении. В табл. П1.34 и П1.35 приведены результаты проверки выборок на экстремальность соответственно для синхронных и асинхронных электродвигателей.

Таблица П1.34 – Проверка выборок на экстремальность для синхронных электродвигателей.

Параметры	Номера сравниваемых таблиц					
Тип выкл.	Вакуумный	Вакуумный	Вакуумный	Масляный	Масляный	Масляный
№табл.	П1.1	П1.2	П1.3	П1.4	П1.5	П1.6
β_m^+	3,4	3,45	3,1	3,15	3,2	3,1
ξ_m	1,51	1,42	1,47	1,608	1,43	1,49
Сравнение критериев β_m^+, ξ_m	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
$K_{\max}(Z_{\max})$	6,5	5,2	3,4	4,5	3,6	2,4

Данные таблиц П1.34 и П1.35 указывают на то, что максимальные значения КП, приведенные в табл. П1.1÷П1.6 и П1.14÷П1.19, принадлежат к генеральной совокупности, т.е. имеют закономерный характер.

Продолжение приложения 1

Таблица П1.35 – Проверка выборок на экстремальность для асинхронных двигателей.

Параметры	Номера сравниваемых таблиц					
№таблицы	1.14п	1.15п	1.16п	1.17п	1.18п	1.19п
Тип выкл.	Вакуумный	Вакуумный	Вакуумный	Масляный	Масляный	Масляный
β_m^+	3,65	3,45	3,2	3,23	3,15	3,1
ξ_m	1,74	1,46	1,38	1,44	1,52	1,36
Сравнение критериев β_m^+, ξ_m	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$	$\xi_m < \beta_m^+$
Принадлежность к генеральной совокупности	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит	принадлежит
$K_{\max} (Z_{\max})$	6,0	5,2	4,0	4,2	3,6	2,9

Сопоставляя данные табл. П1.34 и П1.35, можно отметить следующие закономерности. Асинхронные и синхронные электродвигатели мощностью 1250 кВт имеют одинаковые максимальные уровни КП. Если мощность электродвигателя менее 1250 кВт, то синхронные электродвигатели создают более высокие уровни КП, чем асинхронные электродвигатели. Однако при мощности электродвигателей более 1250 кВт, асинхронные электродвигатели создают более высокий уровень КП, чем синхронные электродвигатели. Данные закономерности сохраняются как при использовании вакуумных, так и при использовании масляных выключателей.

Приложение 2

Определение среднего значения понижающего коэффициента КП

Таблица П2.1 – Результаты измерений коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения асинхронного электродвигателя типа А4-400УК-6УЗ, Р = 315 кВт, U_н = 6 кВ.

п\п	Тип К.Л.	Сече- ние,мм ²	Длина, м	Масляный выключатель				Вакуумный выключатель				Среднее зна- чение пони- жающего ко- эффициента
				K _{max} =4,6				K _{max} =6,4				
				Вкл		Откл		Вкл		Откл		
				K1	K2	$\frac{K_1}{K_{2.1}}$	$\frac{K_2}{K_{M.2}}$	K1	K2	$\frac{K_1}{K_{2.1}}$	$\frac{K_2}{K_{M.2}}$	
1	СБГ	35	10	1,0	1,0	4,17/1,05	4,38/1,05	1,0	1,0	6,1/1,05	6,4/1	1,05
			100	1,0	1,0	2,35/1,4	3,29/1,4	1,0	1,0	4,57/1,4	6,4/1	1,4
			250	1,0	1,0	1,15/2,0	2,3/2,0	1,0	1,0	3,19/2,0	6,38/1	2,0
			400	1,0	1,0	0,68/2,6	1,77/2,6	1,0	1,0	2,42/2,6	6,3/1,02	2,6
			560	1,0	1,01	0,25/4,28	1,07/4,3	1,0	1,02	1,48/4,29	6,35/1,01	4,29
			650	1,0	1,46	0,18/5,11	0,92/5	1,0	1,47	1,28/5	6,4/1,0	5,04
2	СБГ	50	10	1,0	1,0	4,17/1,05	4,38/1,05	1,0	1,0	6,09/1,05	6,39/1	1,05
			100	1,0	1,0	2,19/1,45	3,17/1,45	1,0	1,0	3,58/1,45	5,2/1,23	1,45
			50	1,0	1,0	1,0/2,14	2,14/2,15	1,0	1,0	2,88/2,15	6,2/1,03	2,15
			400	1,0	1,0	0,57/2,82	1,61/2,86	1,0	1,0	1,51/2,85	4,3/1,49	2,84
			560	1,0	1,1	0,23/4,43	1,02/4,51	1,0	1,1	1,4/4,5	6,3/1,02	4,48
			650	1,0	1,45	0,18/5,06	0,91/5,05	1,0	1,45	0,72/5	3,6/1,78	5,04

3	СБГ	70	10	1,0	1,0	4,02/1,07	4,3/1,07	1,0	1,0	4,3/1,07	4,6/1,39	1,07
			100	1,0	1,0	2,04/1,5	3,07/1,5	1,0	1,0	4,0/1,5	6,0/1,07	1,5
			250	1,0	1,0	0,87/2,3	2,0/2,3	1,0	1,0	2,76/2,3	6,35/1,01	2,3
			400	1,0	1,0	0,49/3,08	1,51/3,05	1,0	1,0	0,92/3,04	2,8/2,29	3,06
			560	1,0	1,15	0,22/4,65	1,0/4,6	1,0	1,16	1,11/4,6	5,1/1,25	4,58
			650	1,0	1,46	0,18/5,11	0,92/5	1,0	1,47	1,12/5	5,6/1,14	5,04
4	СБГ	95	10	1,0	1,0	3,94/1,08	4,26/1,08	1,0	1,0	2,69/1,08	3,12/2,05	1,08
			100	1,0	1,0	1,8/1,6	2,88/1,61	1,0	1,0	4,0/1,6	6,4/1	1,6
			250	1,0	1,0	0,74/2,49	1,84/2,5	1,0	1,0	1,64/2,51	4,11/1,56	2,5
			400	1,0	1,0	0,4/3,38	1,35/3,41	1,0	1,0	1,2/3,43	4,11/1,56	3,41
			560	1,0	1,37	0,19/4,95	0,94/4,9	1,0	1,38	0,68/4,87	3,31/1,93	4,91
			650	1,0	1,47	0,18/5,06	0,91/5,05	1,0	1,47	1,24/5	6,2/1,03	5,04
5	СБГ	120	10	1,0	1,0	3,87/1,09	4,22/1,09	1,0	1,0	4,77/1,09	5,22/1,23	1,09
			100	1,0	1,0	1,67/1,67	2,79/1,65	1,0	1,0	2,5/1,65	4,12/1,55	1,66
			250	1,0	1,0	0,68/2,62	1,78/2,58	1,0	1,0	2,46/2,6	6,4/1,0	2,6
			400	1,0	1,0	0,35/3,6	1,26/3,65	1,0	1,0	0,91/3,65	3,32/1,93	3,63
			560	1,0	1,46	0,18/5,11	0,92/5	1,0	1,47	0,62/5,03	3,12/2,05	5,05
			650	1,0	1,46	0,18/5,06	0,91/5,05	1,0	1,47	1,17/4,99	5,84/1,1	5,03
6	КШВГ	35	10	1,0	1,0	4,09/1,06	4,34/1,05	1,0	1,0	5,97/1,06	6,33/1,01	1,06
			100	1,0	1,0	2,3/1,41	3,24/1,42	1,0	1,0	4,54/1,41	6,4/1,0	1,41
			250	1,0	1,0	1,1/2,04	2,24/2,05	1,0	1,0	2,47/2,06	5,08/1,26	2,05

			400	1,0	1,0	0,69/2,58	1,78/2,58	1,0	1,0	2,42/2,57	6,21/1,03	2,58
			560	1,0	1,0	0,25/4,32	1,08/4,26	1,0	1,01	0,73/4,27	3,12/2,05	4,28
			650	1,0	1,46	0,19/4,89	0,93/4,95	1,0	1,46	1,25/4,96	6,2/1,03	4,93
7	КШВГ	50	10	1,0	1,0	4,13/1,06	4,38/1,05	1,0	1,0	5,47/1,06	5,8/1,1	1,06
			100	1,0	1,0	2,19/1,44	3,15/1,46	1,0	1,0	1,79/1,45	2,6/2,46	1,45
			250	1,0	1,0	0,99/2,17	2,15/2,14	1,0	1,0	1,71/2,16	3,7/1,73	2,16
			400	1,0	1,0	0,57/2,86	1,63/2,82	1,0	1,0	2,13/2,84	6,05/1,06	2,84
			560	1,0	1,09	0,23/4,44	1,02/4,51	1,0	1,09	1,42/4,5	6,39/1,0	4,48
			650	1,0	1,46	0,19/5,95	0,94/4,99	1,0	1,47	1,22/4,92	6,0/1,07	4,92
8	КШВГ	70	10	1,0	1,0	4,02/1,08	4,34/1,06	1,0	1,0	4,44/1,07	4,75/1,35	1,07
			100	1,0	1,0	2,06/1,48	3,05/1,51	1,0	1,0	4,3/1,49	6,4/1,0	1,49
			250	1,0	1,0	0,86/2,33	2,0/2,3	1,0	1,0	2,77/2,28	6,31/1,01	2,3
			400	1,0	1,0	0,5/3,04	1,52/3,03	1,0	1,0	2,1/3,03	6,37/1,0	3,03
			560	1,0	1,16	0,22/4,55	1,0/4,6	1,0	1,16	0,84/4,62	3,88/1,65	4,59
			650	1,0	1,47	0,18/5,17	0,92/5,0	1,0	1,47	1,12/4,94	5,53/1,16	5,02
9	КШВГ	95	10	1,0	1,0	3,94/1,08	4,26/1,08	1,0	1,0	4,55/1,08	4,91/1,3	1,08
			100	1,0	1,0	1,79/1,63	2,91/1,58	1,0	1,0	3,91/1,61	6,3/1,02	1,61
			250	1,0	1,0	0,72/2,51	1,81/2,54	1,0	1,0	2,57/2,48	6,38/1,0	2,51
			400	1,0	1,0	0,4/3,38	1,35/3,41	1,0	1,0	0,9/3,41	3,07/2,08	3,4
			560	1,0	1,35	0,19/4,95	0,94/4,99	1,0	1,36	1,27/4,91	6,24/1,03	4,92
			650	1,0	1,47	0,18/5,11	0,92/5,0	1,0	1,47	0,6/4,95	2,97/2,15	5,02

0	К ШВГ	12 0	10	1,0	1,0	3,87/1,1	4,26/1,08	1,0	1,0	5,87/1,09	6,4/1,0	1,09
			100	1,0	1,0	1,66/1,77	2,77/1,66	1,0	1,0	3,88/1,64	6,37/1,0	1,66
			250	1,0	1,0	0,69/2,55	1,76/2,22	1,0	1,0	2,28/2,61	5,95/1,08	2,59
			400	1,0	1,0	0,35/3,6	1,25/3,65	1,0	1,0	1,17/3,67	4,29/1,49	3,64
			560	1,0	1,46	0,19/4,99	0,93/4,95	1,0	1,46	1,26/5,06	6,37/1,0	4,97
			650	1,0	1,47	0,18/5,11	0,92/5,0	1,0	1,47	0,58/4,98	2,9/2,21	5,03

Продолжение приложения 2

Таблица П2.2 – Результаты измерений коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения синхронного электродвигателя типа СД2-85/40-10, Р = 315 кВт, U_н = 6 кВ.

№ п\п	Тип К.Л.	Сече- ние,мм ²	Длина, м	Масляный выключатель				Вакуумный выключатель				Среднее значе- ние понижаю- щего коэффи- циента
				K _{max} =4,6				K _{max} =6,4				
				Вкл		Откл		Вкл		Откл		
				K1	K2	$\frac{K_1}{K_{2.1}}$	$\frac{K_2}{K_{M.2}}$	K1	K2	$\frac{K_1}{K_{2.1}}$	$\frac{K_2}{K_{M.2}}$	
1	СБГ	35	10	1,0	1,0	4,35/1,05	4,57/1,05	1,0	1,0	6,76/1,05	7,1/1,04	1,05
			100	1,0	1,0	2,45/1,4	3,43/1,4	1,0	1,0	5,18/1,4	7,25/1,02	1,4
			250	1,0	1,0	1,2/2,0	2,4/2,0	1,0	1,0	3,7/2,0	7,4/1,0	2,0
			400	1,0	1,0	0,71/2,61	1,85/2,6	1,0	1,0	1,58/2,6	4,11/1,8	2,6
			560	1,0	1,02	0,26/4,31	1,12/4,3	1,0	1,02	0,86/4,3	3,7/2,0	4,3
			650	1,0	1,47	0,19/5,05	0,96/5	1,0	1,47	1,23/5,02	6,17/1,19	5,02
2	СБГ	50	10	1,0	1,0	4,27/1,06	4,53/1,06	1,0	1,0	5,02/1,06	5,32/1,39	1,06
			100	1,0	1,0	2,28/1,45	3,31/1,45	1,0	1,0	2,32/1,45	3,36/2,2	1,45
			250	1,0	1,0	1,04/2,14	2,23/2,15	1,0	1,0	3,43/2,16	7,4/1,0	2,15
			400	1,0	1,0	0,59/2,86	1,69/2,84	1,0	1,0	1,91/2,85	5,44/1,36	2,85
			560	1,0	1,11	0,24/4,46	1,07/4,49	1,0	1,1	0,95/4,52	4,28/1,73	4,49
			650	1,0	1,46	0,19/5,05	0,96/5,0	1,0	1,47	1,41/5,0	7,05/1,05	5,02
3	СБГ	70	10	1,0	1,0	4,19/1,07	4,49/1,07	1,0	1,0	3,93/1,07	4,2/1,76	1,07

			100	1,0	1,0	2,13/1,5	3,2/1,5	1,0	1,0	4,57/1,5	6,85/1,08	1,5
			250	1,0	1,0	0,91/2,3	2,09/2,3	1,0	1,0	1,4/2,3	3,22/2,3	2,3
			400	1,0	1,0	0,51/3,06	1,56/3,08	1,0	1,0	2,21/3,05	6,73/1,01	3,06
			560	1,0	1,16	0,23/4,44	1,02/4,71	1,0	1,16	1,61/4,6	7,4/1,0	4,58
			650	1,0	1,47	0,2/4,8	0,96/5,0	1,0	1,46	0,74/4,97	3,68/2,01	4,92
4	СБГ	95	10	1,0	1,0	4,12/1,08	4,44/1,08	1,0	1,0	3,55/1,08	3,83/1,93	1,08
			100	1,0	1,0	1,87/1,63	3,04/1,58	1,0	1,0	4,2/1,6	6,73/1,1	1,6
			250	1,0	1,0	0,76/2,5	1,9/2,53	1,0	1,0	1,77/2,49	4,4/1,68	2,51
			400	1,0	1,0	0,41/3,44	1,41/3,4	1,0	1,0	1,99/3,38	6,73/1,01	3,41
			560	1,0	1,38	0,19/5,05	0,96/5,0	1,0	1,37	0,97/4,99	4,84/1,53	5,01
			650	1,0	1,48	0,2/4,8	0,96/5,0	1,0	1,47	1,47/4,99	7,33/1,01	4,93
5	СБГ	120	10	1,0	1,0	4/1,09	4,36/1,09	1,0	1,0	4,69/1,08	5,07/1,46	1,09
			100	1,0	1,0	1,75/1,65	2,89/1,66	1,0	1,0	2,64/1,64	4,33/1,71	1,65
			250	1,0	1,0	0,7/2,61	1,83/2,62	1,0	1,0	1,41/2,59	3,65/2,03	2,61
			400	1,0	1,0	0,36/3,64	1,31/3,66	1,0	1,0	2,0/3,63	7,25/1,02	3,64
			560	1,0	1,47	0,19/5,05	0,96/5,0	1,0	1,47	1,36/5,04	6,85/1,08	5,03
			650	1,0	1,47	0,18/5,22	0,94/5,11	1,0	1,47	1,54/4,8	7,4/1,0	5,05
6	КШ	35	10	1,0	1,0	4,27/1,05	4,49/1,07	1,0	1,0	5,25/1,06	5,56/1,33	1,06

	БГ		100	1,0	1,0	2,5/1,38	3,45/1,39	1,0	1,0	3,5/1,42	4,97/1,49	1,4
			250	1,0	1,0	1,16/2,03	2,36/2,03	1,0	1,0	3,39/2,06	6,98/1,06	2,04
			400	1,0	1,0	0,72/2,58	1,86/2,58	1,0	1,0	2,81/2,61	7,34/1,01	2,59
			560	1,0	1,0	0,26/4,27	1,11/4,32	1,0	1,08	1,0/4,3	4,3/1,72	4,3
			650	1,0	1,47	0,2/5,0	1,0/4,8	1,0	1,46	1,47/5,0	7,34/1,01	4,93
7	КIII БГ	50	10	1,0	1,0	4,23/1,07	4,53/1,06	1,0	1,0	3,67/1,05	3,85/1,92	1,06
			100	1,0	1,0	2,26/1,46	3,31/1,45	1,0	1,0	4,07/1,43	5,87/1,27	1,45
			250	1,0	1,0	1,05/2,15	2,26/2,12	1,0	1,0	2,93/2,14	6,27/1,18	2,14
			400	1,0	1,0	0,59/2,85	1,68/2,86	1,0	1,0	1,89/2,83	5,36/1,38	2,85
			560	1,0	1,1	0,24/4,38	1,05/4,57	1,0	1,08	1,61/4,5	7,25/1,02	4,48
			650	1,0	1,47	0,19/5,05	0,96/5,0	1,0	1,46	1,34/5,02	6,73/1,1	5,02
8	КIII БГ	70	10	1,0	1,0	4,15/1,08	4,49/1,07	1,0	1,0	5,01/1,07	5,36/1,38	1,07
			100	1,0	1,0	2,09/1,51	3,16/1,52	1,0	1,0	4,1/1,48	6,12/1,21	1,51
			250	1,0	1,0	0,92/2,27	2,09/2,3	1,0	1,0	3,18/2,33	7,4/1,0	2,3
			400	1,0	1,0	0,52/3,0	1,56/3,08	1,0	1,0	1,59/3,04	4,84/1,53	3,04
			560	1,0	1,17	0,24/4,46	1,07/4,49	1,0	1,16	1,62/4,52	7,33/1,01	4,49
			650	1,0	1,46	0,19/5,05	0,96/5,0	1,0	1,47	1,38/5,01	6,92/1,07	5,02
9	КIII	95	10	1,0	1,0	4,08/1,08	4,4/1,09	1,0	1,0	3,98/1,08	4,3/1,72	1,08

	БГ		100	1,0	1,0	1,86/1,63	3,04/1,58	1,0	1,0	4,63/1,6	7,4/1,0	1,6
			250	1,0	1,0	0,76/2,5	1,9/2,53	1,0	1,0	2,04/2,49	5,07/1,46	2,51
			400	1,0	1,0	0,42/3,36	1,41/3,4	1,0	1,0	1,91/3,43	6,55/1,13	3,4
			560	1,0	1,36	0,2/4,9	0,98/4,9	1,0	1,38	1,35/5,03	6,79/1,09	4,94
			650	1,0	1,46	0,19/5,11	0,97/4,95	1,0	1,47	1,25/5,02	6,27/1,18	5,03
10	КШ БГ	120	10	1,0	1,0	4,12/1,08	4,44/1,08	1,0	1,0	6,73/1,1	7,4/1,0	1,09
			100	1,0	1,0	1,74/1,66	2,89/1,66	1,0	1,0	2,23/1,64	3,66/2,02	1,65
			250	1,0	1,0	0,7/2,61	1,83/2,62	1,0	1,0	1,86/2,6	4,84/1,53	2,61
			400	1,0	1,0	0,36/3,64	1,31/3,66	1,0	1,0	1,93/3,65	7,05/1,05	3,65
			560	1,0	1,47	0,19/4,95	0,94/5,11	1,0	1,47	1,24/5,02	6,22/1,19	5,03
			650	1,0	1,48	0,19/5,0	0,95/5,05	1,0	1,48	1,37/5,04	6,92/1,07	5,03

Осциллограммы переходных процессов при дуговом ОЗЗ

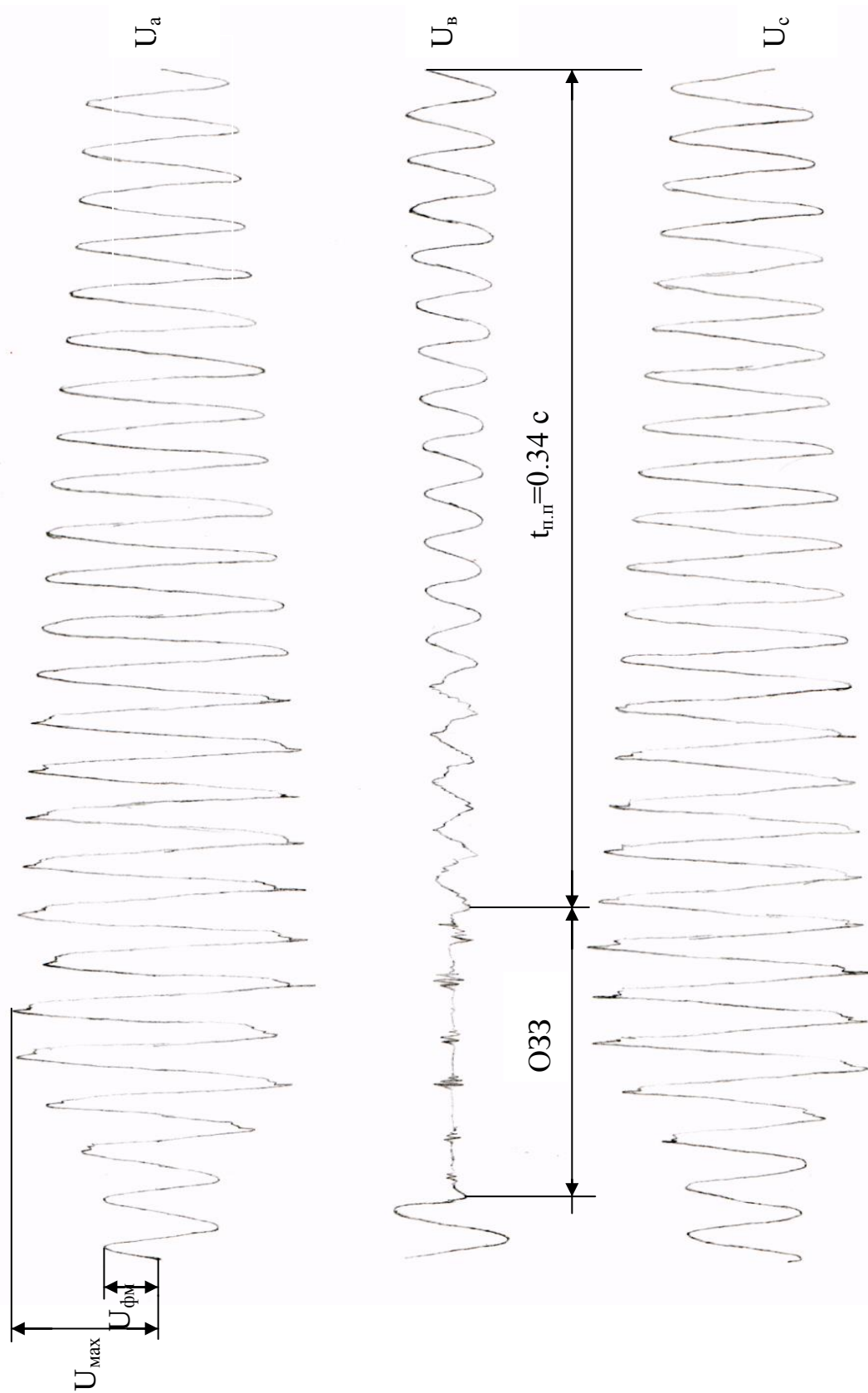


Рисунок ПЗ.1 – Переходный процесс при дуговом ОЗЗ $I_c = 12 \text{ A}$, $I_a = 0 \text{ A}$, $K_{\text{ОЗЗ}} = 2,4$

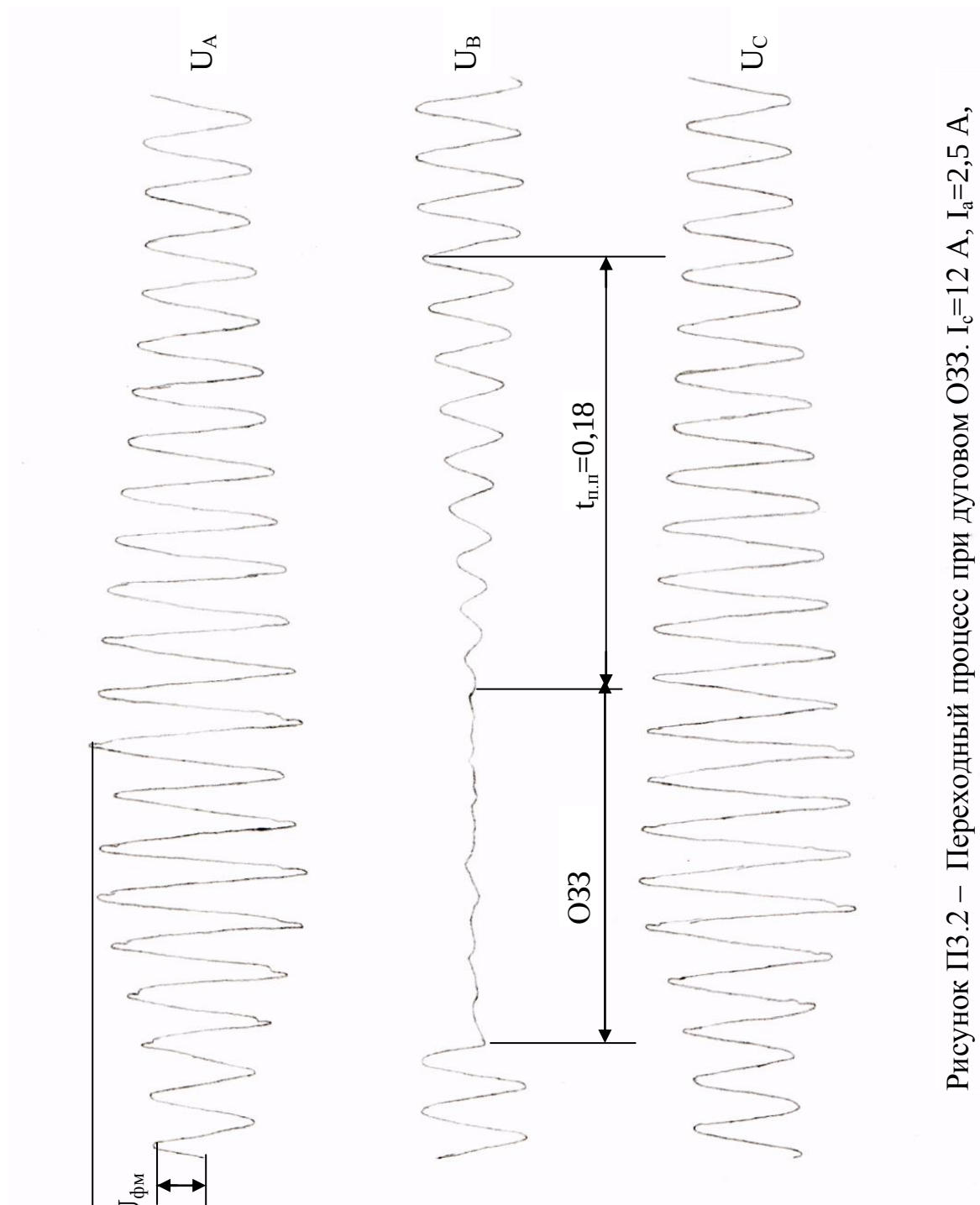


Рисунок ПЗ.2 – Переходный процесс при дуговом ОЗЗ. $I_c = 12 \text{ A}$, $I_a = 2,5 \text{ A}$, $K_{O33} = 1,9$

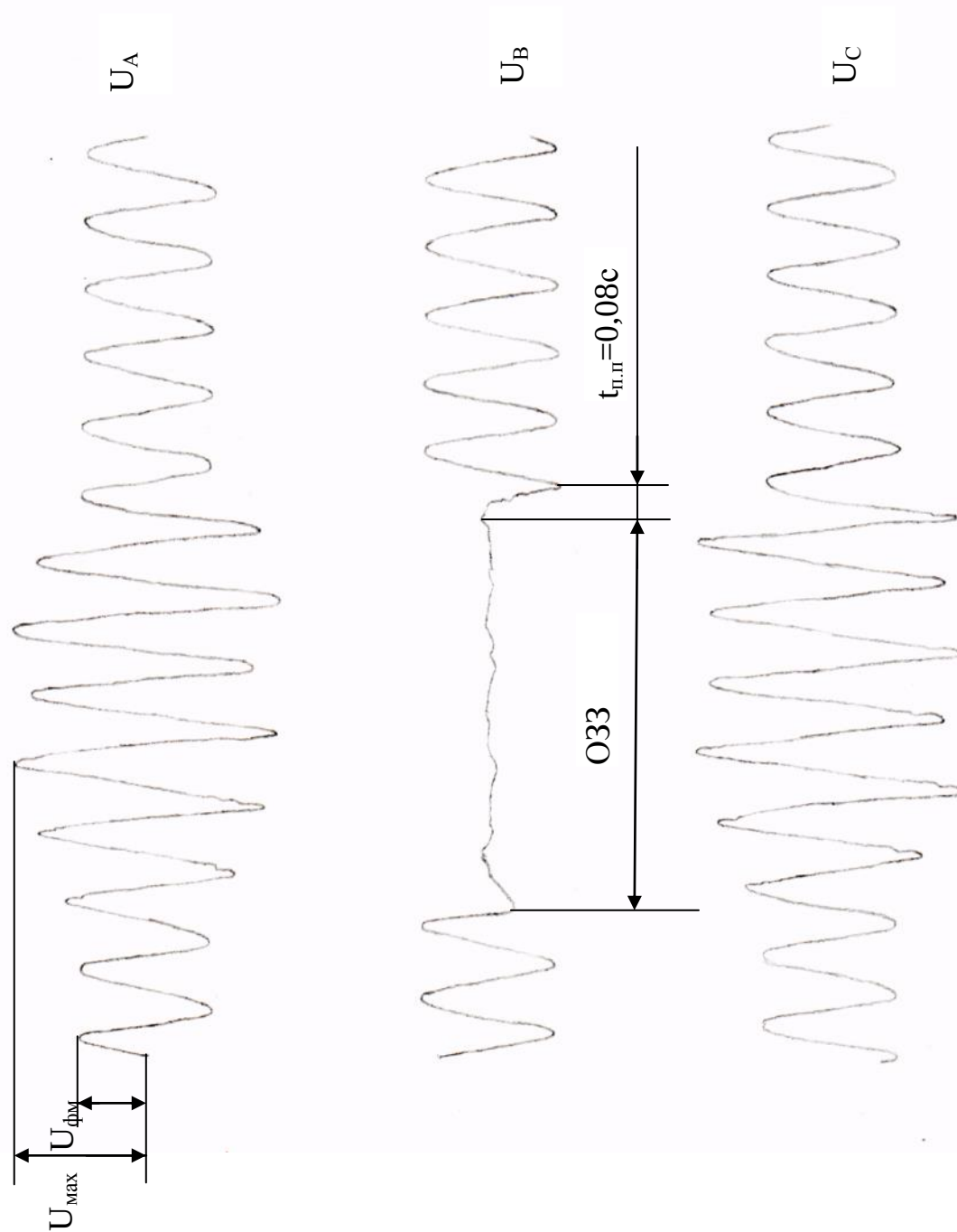


Рисунок ПЗ.3 – Переходный процесс при дуговых ОЗЗ. $I_c=12\text{ A}$, $I_r=7,5\text{ A}$, $K_{\text{ОЗЗ}}=1,8$

Продолжение Приложения 3

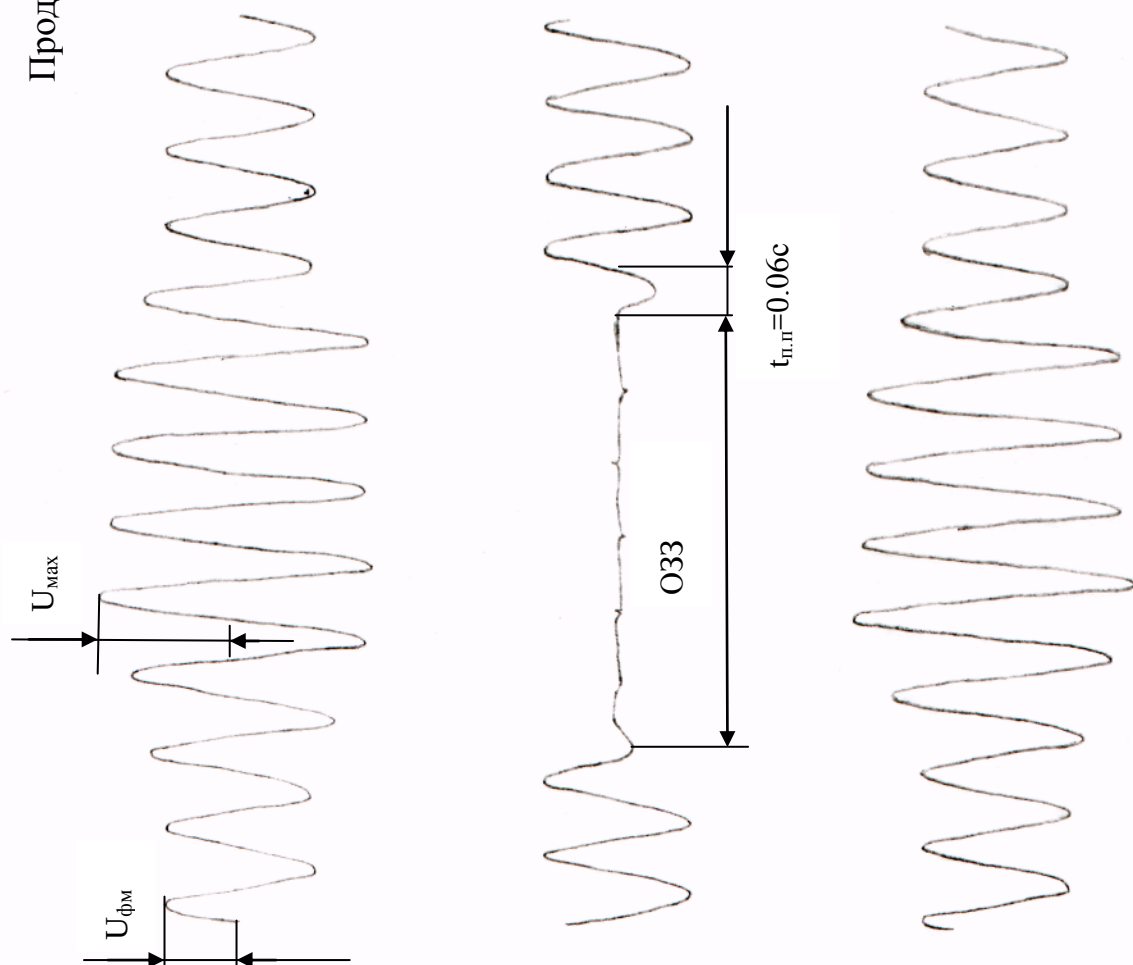


Рисунок ПЗ.4 – Переходный процесс при дуговом O33. $I_c = 12\text{ A}$, $I_a = 12\text{ A}$, $K_{033} = 1,7$

Приложение 4

Осциллограммы переходных процессов при отключении электродвигателя

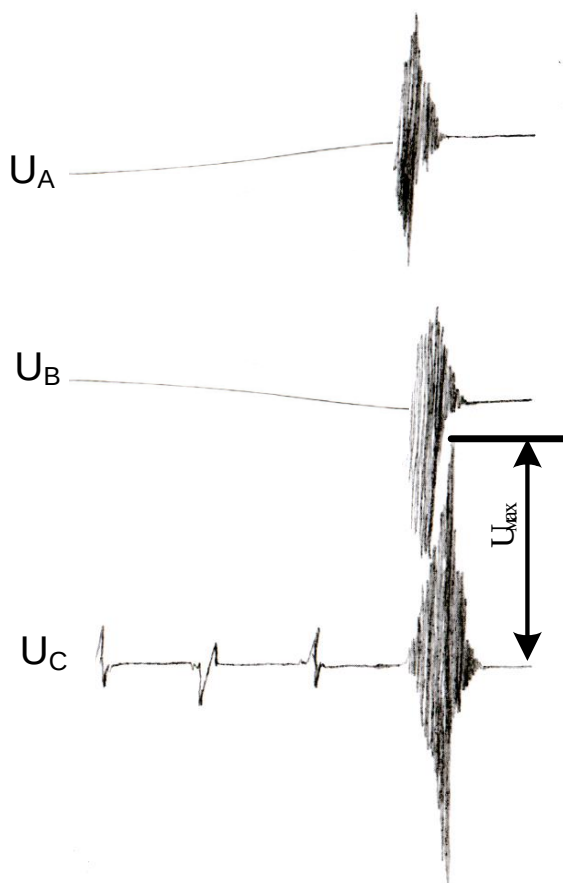


Рисунок П4.1 – Осциллограммы при отключении синхронного двигателя $P = 2000$ кВт в режиме ОЗЗ вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-20/1000 У2, при неселективной работе защит от ОЗЗ. $K_{max} = 4,5$, $f = 80$ кГц.

Продолжение приложения 4

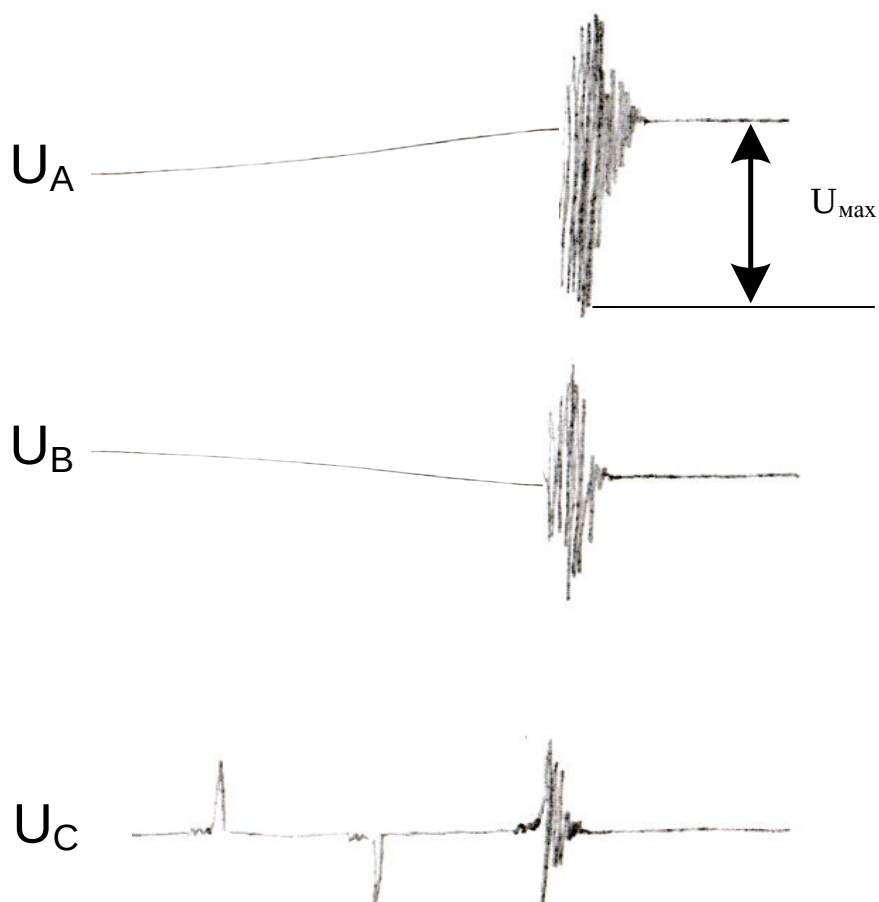


Рисунок П4.2 – Осциллограммы при отключении синхронного двигателя $P = 1200$ кВт в режиме ОЗЗ вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-20/1000 У2, при селективной работе защит от ОЗЗ. $K_{\max} = 2,8$, $f = 80$ кГц.

Приложение 5

Вывод формул 3.10 и 3.11 для напряжений, возникающих на зажимах электродвигателя в режиме ОЗЗ, при отключении его вакуумным выключателем без учета повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя

Схема замещения фазы статорной обмотки электродвигателя связанной с землей, имеет вид, представленный на рис. П5.1.

В момент отключения электродвигателя от сети вакуумным выключателем (QF) одновременно подключается емкость C_H , что позволяет смоделировать эффект шунтирования емкости C_H перемежающейся дугой ОЗЗ, т.к. будет соблюдаться условие $U_C(0_-) = U_C(0_+) = U_H(0) = 0$.

Для данной схемы составляем систему уравнений колебательного $R_H L_H C_H$ – контура [33]:

$$\left. \begin{aligned} U_L + U_R - U_C &= 0 \\ U_R &= i_L \cdot R_H \\ U_L &= L_H \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) \\ i_L &= i_C \\ i_C &= C_H \cdot \left(\frac{dU_C}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

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

$$L_H \frac{di_L}{dt} + i_L R_H = U_C \quad (5.2)$$

откуда, в соответствии с пятым и учетом четвертого уравнений системы (5.1) получаем:

$$i_L = -L_H C_H \frac{d^2 i_L}{dt^2} - R_H C_H \frac{di_L}{dt} \quad (5.3)$$

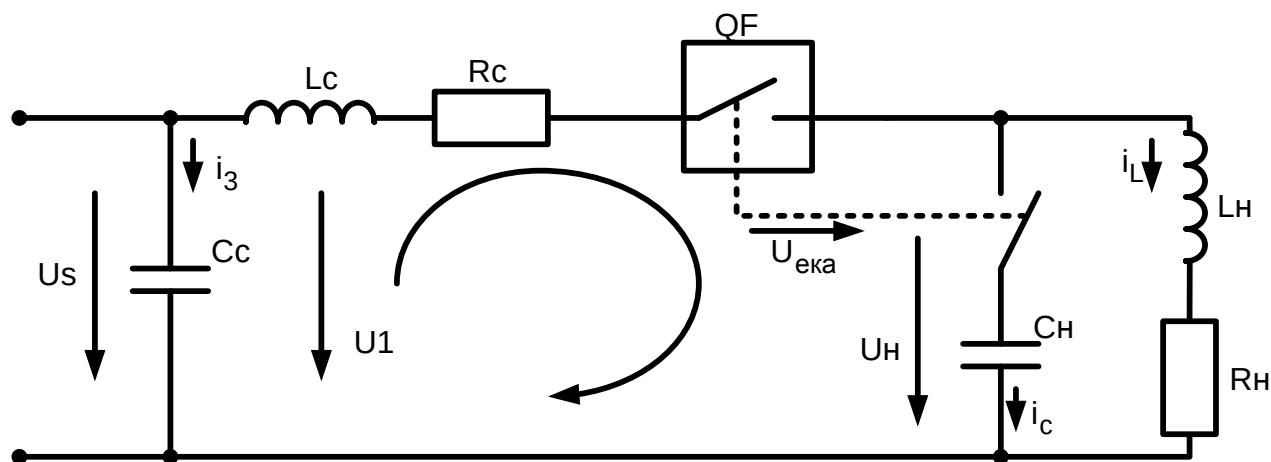


Рисунок П5.1 – Схема замещения статорной обмотки электродвигателя при отключении электродвигателя в режиме дугового ОЗЗ.

Обозначения в схеме: R_H – активное сопротивление, учитывающее потери в стали; L_H – индуктивность рассеяния; C_H – емкость фазной обмотки относительно корпуса электродвигателя; L_c – индуктивность жилы кабеля; C_c – емкость кабеля по отношению к земле ; U_s – напряжение источника питания.

Произведя замену :

$$p = \frac{di_L}{dt}; i_L = 1, \quad (5.4)$$

получим следующее характеристическое уравнение:

$$p^2 L_H C_H + p R_H C_H + 1 = 0 \quad (5.5)$$

Решение данного уравнения показывает, что корни уравнения являются комплексными:

$$p_{1,2} = -\frac{R_H}{2L_H} \pm \sqrt{\left(\frac{R_H}{L_H}\right)^2 - \frac{4}{L_H C_H}}, \quad (5.6)$$

Продолжение приложения 5

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

$\omega_B = \sqrt{\frac{\left(\left(\frac{R_H}{L_H}\right)^2 - Z_C\right)}{4}}$ - частота свободных колебаний.

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

$$i_L = e^{\alpha t} \cdot [B_1 \sin(\omega_B t) + B_2 \cos(\omega_B t)], \quad (5.7)$$

где B_1, B_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;

постоянная интегрирования B_2 :

$$(B_2)_{t=0} = i_L(0) = i_{cp}(0_-) \quad (5.8)$$

где $i_L(0)$ – ток через индуктивность в момент коммутации;

$i_{cp}(0_-)$ – срез тока в вакуумной камере выключателя;

постоянная интегрирования B_1 :

$$B_1 = -i_L(0) + \frac{U_H(0) - \alpha L_{50} i_L(0)}{\omega L_{50}} = -i_L(0) - \frac{\alpha L_{50} i_L(0)}{\omega L_{50}} \quad (5.9)$$

где $U_H = 0$ – напряжение на емкости C_H в момент расхождения контактов, В;

L_{50} – индуктивность фазной обмотки при частоте 50 Гц, Гн.

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

$$i_L = e^{\alpha t} \cdot \left[\left\{ -i_L(0) - \frac{\alpha L_{50} i_L(0)}{\omega L_{50}} \right\} \sin(\omega_B t) + i_L(0_-) \cdot \cos(\omega_B t) \right] \quad (5.10)$$

аналогичным способом определяем напряжение на зажимах электродвигателя.

Продолжение приложения 5

Для этого уравнения системы (5.1) решаем относительно напряжения нагрузки U_H Опуская математические выкладки, получаем следующее уравнение:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} (D_1 \sin(\omega_B t) + D_2 \cos(\omega_B t)) \quad (5.11)$$

Для нахождения постоянных интегрирования составим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_H(t) &= U_{H.CB}(t) \\ -\frac{dU_{H.CB}}{dt} C_H &= i_{C.CB} \\ i_{C.CB} &= i_L(0) = i_{CP} \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

Из системы уравнений (5.12), в момент времени $t=0$, получаем выражение для постоянных интегрирования, В:

$$D_2 = U_H(0), = 0 \quad (5.13)$$

$$D_1 = \frac{\left\{ -\frac{i_{CP}}{C_H} - \alpha D_2 \right\}}{\omega_B} = -\frac{i_{CP}}{C_H \omega_B} \quad (5.14)$$

С учетом найденных значений постоянных интегрирования можно записать следующее выражение $U_{H.CB}(t)$ для фазы, связанной с землей:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left(-\frac{i_{CP}(0_-)}{C_H \omega_B} \right) \cdot \sin(\omega_B t) \right\} \quad (5.15)$$

Для фазы, не связанной с землей, выражение (5.11) будет иметь вид:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left(\frac{-i_{CP}(0_-) - \alpha U_H(0) C_H}{C_H \omega_B} \right) \sin(\omega_B t) + U_H(0) \cos(\omega_B t) \right\} \quad (5.16)$$

Принимая во внимание, что $\alpha = -\frac{R_H}{2L_H}$, а $C_H \cdot U_H(0) = q(0_-)$ выражение

(5.17) примет вид:

$$U_{H.CB}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left(\frac{-i_{CP}(0_-) + \frac{R_H}{2L_H} q(0_-)}{C_H \omega_B} \right) \sin(\omega_B t) + U_H(0) \cos(\omega_B t) \right\} \quad (5.18)$$

Приложение 6

Вывод формул 3.12 и 3.13 для напряжений, возникающих на зажимах электродвигателя в режиме ОЗЗ, при отключении его вакуумным выключателем с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя

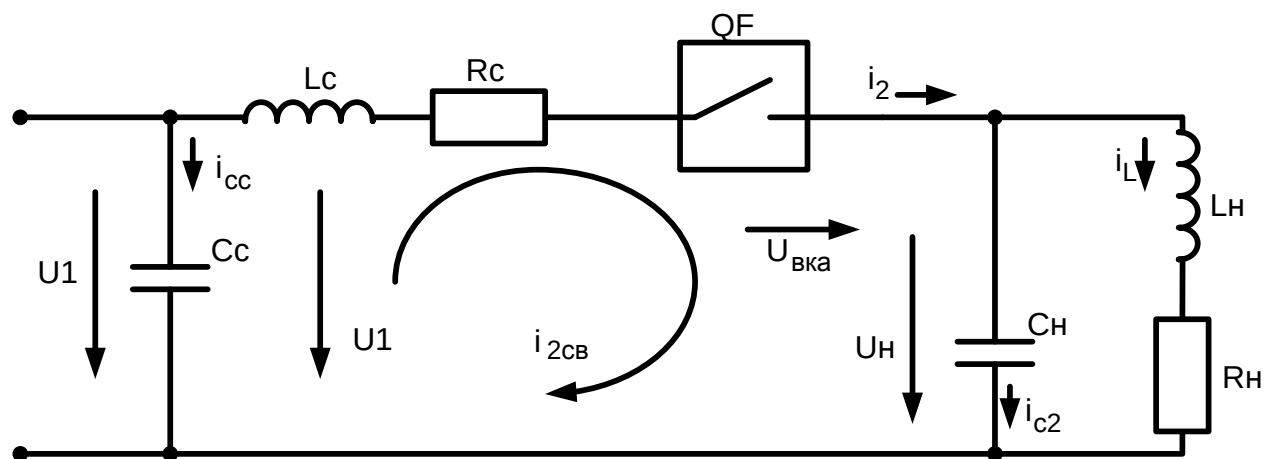


Рисунок П.6.1 – Эквивалентная схема замещения фазы, не связанной с землей, в режиме ОЗЗ для системы “Подстанция – ВВ – кабель - электродвигатель”.

C_c – емкость внешней фазы сети относительно земли, Ф;

C_n – емкость отключаемой нагрузки (включает емкость электродвигателя), Ф;

L_c, L_n – индуктивности нагрузки и кабеля, Гн;

R_c, R_n – активное продольное сопротивления кабеля и нагрузки, Ом;

QF – вакуумный выключатель;

U_1 – напряжение на фазе сети в режиме ОЗЗ.

Для однофазной схемы замещения (рис.П.6.1) составим систему дифференциальных уравнений при условии, что повторный пробой межконтактного промежутка будет происходить в момент горения дуги ОЗЗ:

Продолжение приложения 6

$$\left. \begin{aligned} -U_1 + L_C \frac{di_2}{dt} + R_C i_2 + U_H &= 0 \\ L_H \frac{di_L}{dt} + R_H i_L - U_H &= 0 \\ i_{C2} &= -C_H \frac{dU_H}{dt} \\ i_{CC} &= -C_C \frac{dU_1}{dt} \\ -i_2 + i_L + i_{C2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

После того как произошел пробой промежутка и загорелась дуга в вакуумной камере, в контуре, образованном элементами C_C , L_C , R_C , C_H , возникает переходный процесс уравнивания зарядов емкостей разных по величине и полярности. В результате этого возникает высокочастотный ток, протекающий по замкнутому контуру (рис.П6.2).

Благодаря емкостям C_C и C_H , данный ток i_{2CB} не проникает в контуры нагрузки и источника питания.

Для схемы, представленной на рис.П6.1, записываем уравнение контура:

$$L_C \frac{di_{2CB}}{dt} + R_C i_{2CB} + U_H - U_1 = 0 \quad (6.2)$$

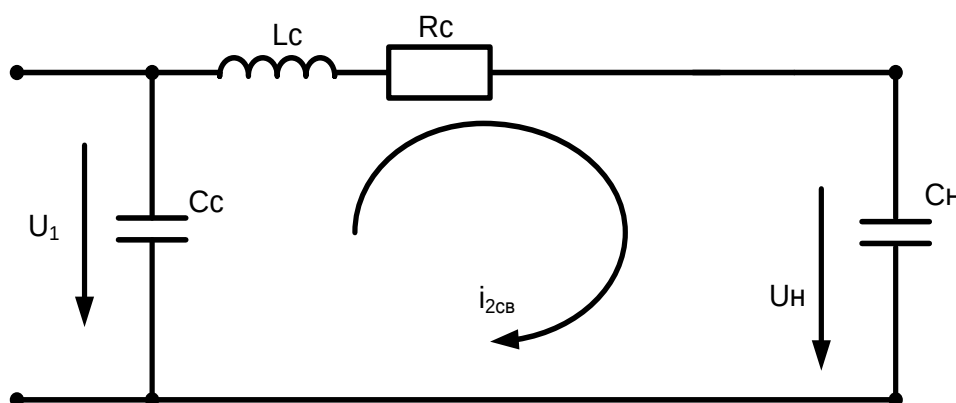


Рисунок П6.2 – Контур протекания высокочастотного тока i_{2CB}

Принимая во внимание, что $U = \frac{1}{C} \int i dt$, перепишем данное уравнение

для тока i_{2CB} :

Продолжение приложения 6

$$L_C \frac{di_{2cb}}{dt} + R_C i_{2cb} + \frac{1}{C_H} \int i_{2cb} dt - \frac{1}{C_C} \int i_{2cb} dt = 0 \quad (6.3)$$

Произведя замену $\frac{d}{dt}$ на p ; $\int$ на $1/p$, получили характеристическое уравнение контура:

$$L_C C_C C_H p^2 + C_H C_C R_C p + (C_H - C_C) = 0 \quad (6.4)$$

Решение данного квадратного уравнения записывается в виде:

$$i_{2cb}(t) = e^{\alpha_1 t} [B_1 \sin(\omega_{B1} t) + B_2 \cos(\omega_{B1} t)] \quad (6.5)$$

где α_1 – коэффициент затухания: $\alpha_1 = -\frac{R_C}{2L_C}$;

ω_{B1} – частота свободных колебаний $\omega_{B1} = \sqrt{\left(\frac{R_C}{2L_C}\right)^2 - \left(\frac{C_H - C_C}{L_C C_H C_C}\right)}$;

$$C_C = \frac{I_{O33}}{3U_\Phi \omega_{50}} \quad (6.6)$$

где U_Φ – действующее значение фазного напряжения;

I_{O33} – ток ОЗЗ.

Возникновение повторного зажигания аналогично процессу включения цепи. Результирующий ток, протекающий через ВКА, можно определить как сумму $i_{2p} = i_{np} + i_{cb}$. Следовательно, постоянные интегрирования определяются из начальных условий с учетом выражения (5.5).

Для нахождения коэффициентов B_1 и B_2 составляем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_{2p}(t) &= i_{np}(t) + i_{cb}(t) \\ \frac{di_{2p}(t)}{dt} &= \frac{di_{np}(t)}{dt} + \frac{di_{cb}(t)}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (6.7)$$

где $i_{np}(t)$ – значение тока, протекающего через ВКА в установившемся режиме;

$i_{2p}(t)$ – результирующее значение высокочастотного тока, протекающего через ВКА.

Вынужденная составляющая результирующего тока:

$$i_{2np}(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_{11} + \varphi), \quad (6.8)$$

Продолжение приложения 6

где I_m – амплитудное значение тока холостого хода, А;

ψ_{11} – начальная фаза, соответствующая моменту повторного зажигания(ПЗ).

Из системы уравнений (6.7) для момента времени, равного 0 (момент ПЗ), получаем выражение для определения постоянных интегрирования:

$$B_1 = \frac{U_1(0) - U_H(0) - L_C I_m \omega \cos(\psi_{11} - \varphi) - \alpha_1 B_2 L_C}{L_C \omega_{B1}};$$

$$B_2 = -I_m \sin(\psi_{11} - \varphi) \quad (6.9)$$

Параллельно с этим процессом в контуре нагрузки протекает другой колебательный процесс.

Ток, протекающий через индуктивный элемент L_H :

$$i_{1пер}(t) = i_{1пр}(t) + i'_{1св}(t) = I_m \sin(\omega_B t + \psi_{11} + \varphi) + e^{\alpha t} \cdot [G_1 \sin(\omega_B t) + G_2 \cos(\omega_B t)] \quad (6.10)$$

где $i_{1пр}$ – принужденная составляющая;

$i'_{1св}$ - свободная составляющая;

G_1, G_2 – постоянные интегрирования тока $i'_{1св}(t)$.

Для определения G_1, G_2 записываем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_{1пер}(t) &= i_{1пр}(t) + i'_{1св}(t) \\ \frac{di_{1пер}(t)}{dt} &= \frac{di_{1пр}(t)}{dt} + \frac{di'_{1св}(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

В момент ПЗ ($t=0$):

$$i_{1пер}(0) = i_{1св}(0-) = e^{\alpha_{ПЗ}} \cdot [G_1 \sin(\omega_B t_{ПЗ}) + G_2 \cos(\omega_B t_{ПЗ})];$$

$$i_{1пр}(0) = I_m \sin(\psi_{11} + \varphi).$$

Полученные начальные значения токов подставляем в уравнение(6.10).

В результате этого получаем следующее выражение:

$$I_m \sin(\psi_{11} + \varphi) + G_2 = e^{\alpha_{ПЗ}} \cdot [G_1 \sin(\omega_B t_{ПЗ}) + G_2 \cos(\omega_B t_{ПЗ})],$$

откуда:

$$G_2 = e^{\alpha_{ПЗ}} \cdot [G_1 \sin(\omega_B t_{ПЗ}) + G_2 \cos(\omega_B t_{ПЗ})] - I_m \sin(\psi_{11} + \varphi). \quad (6.12)$$

Продолжение приложения 6

Для нахождения G_1 определяем первые производные уравнения системы (6.11):

$$\left(\frac{di_{\text{лп}}}{dt} \right)_{t=0} = I_m \omega \cos(\psi_{11} + \varphi);$$

$$\left(\frac{d'i_{\text{св}}}{dt} \right)_{t=0} = \alpha G_2 + G_1 \omega_B.$$

Значение производной $(i_{\text{лп}})'$ определяем через уравнение контура после ПЗ:

$$L_H \frac{di_{\text{лп}}}{dt} + R_H i_{\text{лп}} - U_H = 0 \quad (6.13)$$

откуда $(i_{\text{лп}})$:

$$\frac{di_{\text{лп}}}{dt} = \frac{U_H(0) - R_H i_{\text{лп}}(0)}{L_H}, \quad (6.14)$$

где $U_H(0)$, $i_{\text{лп}}(0)$ – значения напряжения и тока на нагрузке в момент ПЗ.

Приравниваем полученные значения первых производных:

$$\frac{U_H(0) - R_H i_{\text{лп}}(0)}{L_H} = I_m \omega \cos(\psi_{11} + \varphi) + \alpha G_2 + G_1 \omega_B,$$

откуда:

$$G_1 = \frac{U_H(0) - R_H i_{\text{лп}}(0) - L_H I_m \omega \cos(\psi_{11} + \varphi) - \alpha L_H G_2}{L_H \omega_B} \quad (6.15)$$

Переходное напряжение на нагрузке после ПЗ определяем как сумму свободной и принужденной составляющих:

$$U_{\text{н.пер}} = U_{\text{н.пр}} + U_{\text{н.св}}(t). \quad (6.16)$$

Значение напряжения $U_{\text{н.пр}}$ в установившемся режиме:

$$U_{\text{н.пр}}(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_{11}). \quad (6.17)$$

Свободная составляющая:

$$U_{\text{н.св}}(t) = e^{\alpha_1 t} [S_1 \sin(\omega_{B1} t) + S_2 \cos(\omega_{B1} t)]. \quad (6.18)$$

Продолжение приложения 6

С учетом найденных значений составляющих:

$$U_{\text{н.пер}}(t) = U_{\text{н.пр}} \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha_1 t} [S_1 \sin(\omega_{B1} t) + S_2 \cos(\omega_{B1} t)] \quad (6.19)$$

где S_1, S_2 – постоянные интегрирования напряжения $U_{\text{н.св}}(t)$.

Значения постоянных интегрирования определяем из начальных условий.

В первый момент после зажигания дуги ($t=0$) выражения (6.17), (6.18) имеют следующий вид:

$$U_{\text{н.пр}}(0) = U_m \sin(\psi_{11}); \quad U_{\text{н.св}}(0) = S_2; \quad U_{\text{н.пер}}(0) = U_H(0).$$

Значение $\frac{dU_{\text{н.пер}}(t)}{dt}$ определяем исходя из первого закона Кирхгофа:

$$\left(\frac{dU_{\text{н.пер}}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{i_{2\text{пер}} - i_{1\text{пер}}}{C_H};$$

Принимая во внимание, что:

$$i_{1\text{пер}}(0) = -C_H \frac{dU_{\text{н.пер}}}{dt}; \quad i_{2\text{св}}(0) = (0); \quad i_{1\text{пер}}(0) = i_{1\text{св}}(0),$$

получим:

$$\left(\frac{dU_{\text{н.пер}}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{-i_{1\text{св}}(0)}{C_H}; \quad \left(\frac{dU_{\text{н.пр}}}{dt} \right)_{t=0} = U_m \omega \cos(\psi_{11}); \quad \left(\frac{dU_{\text{н.св}}}{dt} \right)_{t=0} = S_1 \omega_{B1} + \alpha_1 S_2$$

Приравниваем полученные значения производных:

$$\frac{-i_{1\text{св}}(0)}{C_H} = U_m \omega \cos(\psi_{11}) + S_1 \omega_{B1} + \alpha_1 S_2 \quad (6.20)$$

Решаем последнее уравнение относительно S_1 :

$$S_1 = -\frac{i_{1\text{св}}(0) - \omega \cdot U_m \cos(\psi_{11}) C_H - S_2 \alpha_1 C_H}{\omega_{B1} C_H}; \quad (6.21)$$

$$S_2 = U_{\text{н.св}}(0) \quad (6.22)$$

С учетом найденных значений S_1, S_2 уравнение напряжения на нагрузке будет:

$$U_{\text{н.пер}}(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha_1 t} \times$$

Продолжение приложения 6

$$\times \left\{ \left(\frac{-i_{cb}(0) - \omega U_m \cos(\psi_{11}) C_H - U_{H.cb}(0) \alpha_1 C_H}{\omega_{B1} C_H} \right) \sin(\omega_{B1} t) + U_{H.cb}(0) \cos(\omega_{B1} t) \right\} \quad (6.23)$$

Принимая во внимание, что

$$U_m = K_{O33} U_{\phi.m}, \quad (6.24)$$

выражение (6.23) примет вид:

$$U_{H.пер}(t) = K_{O33} U_{\phi.m} \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha_1 t} \times \left\{ \left(\frac{-i_{cb}(0) - \omega K_{O33} U_{\phi.m} \cos(\psi_{11}) C_H - S_2 \alpha_1 C_H}{\omega_{B1} C_H} \right) \sin(\omega_{B1} t) + U_{H.cb}(0) \cos(\omega_{B1} t) \right\} \quad (6.25)$$

Во время горения дуги ОЗЗ емкость поврежденной фазы (C_H) будет зашунтирована дугой. Эквивалентная схема заземления для данной фазы представлена на рис. П6.3.

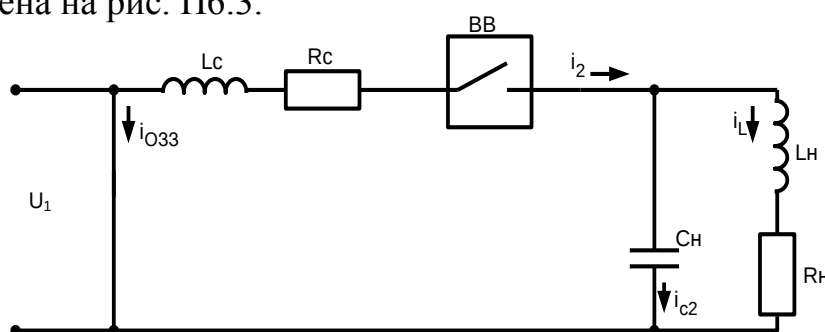


Рисунок П6.3 – Эквивалентная схема замещения фазы, связанной с землей, в режиме ОЗЗ для системы “точка ОЗЗ – кабель – ВВ – кабель – электродвигатель”

Контур протекания высокочастотного тока i_{2cb} показан на рис. П6.4.

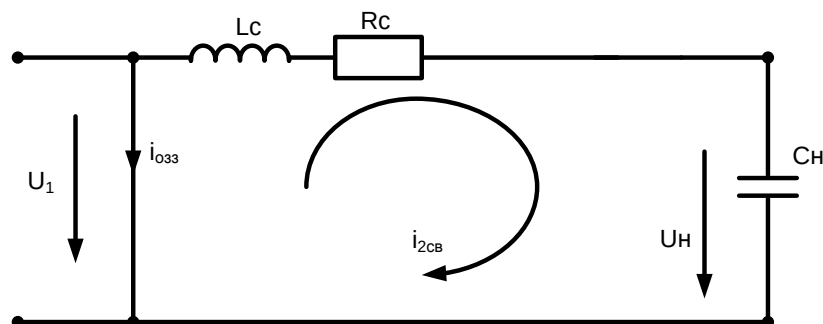


Рисунок П6.4 – Контур протекания высокочастотного тока i_{2cb} .

Продолжение приложения 6

Используя математические операции и принимая во внимание, что $U_1=0$, $U_m=0$ получим следующие выражения для высокочастотного тока $i_{2свп}(t)$:

$$i_{2свп}(t) = e^{\alpha_{1n}t} [B_{1n} \sin(\omega_{B1}t) + B_{2n} \cos(\omega_{B1}t)] \quad (6,26)$$

где α_{1n} – коэффициент затухания; $\alpha_{1n} = -\frac{R_C}{2L_C} = \alpha_1$

ω_{B1n} – частота свободных колебаний; $\omega_{B1n} = \sqrt{\left(\frac{R_C}{2L_C}\right)^2 + \frac{1}{L_C C_H}}$

$$B_{1n} = \frac{U_H(0) - L_C I_m \omega_{50} \cos(\psi_{11} - \varphi) - \alpha_1 B_2 L_C}{L_C \omega_{B1n}};$$

$$B_{2n} = -I_m \sin(\psi_{11} - \varphi)$$

Напряжение на нагрузке для фазы, связанной с землей, можно определить по выражению:

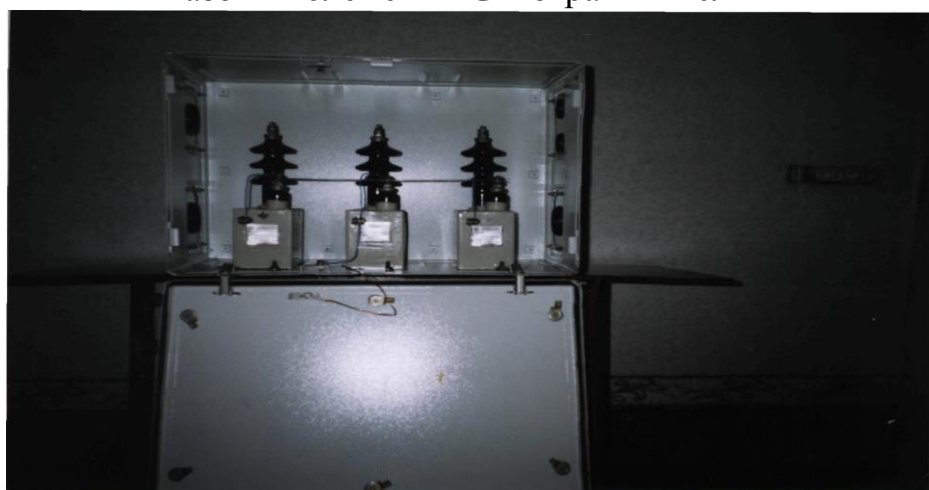
$$U_{н.пер.п}(t) = e^{\alpha_1 t} \times \left\{ \left(\frac{-i_{св}(0) - U_{н.св}(0) \alpha_1 C_H}{\omega_{B1n} C_H} \right) \sin(\omega_{B1n} t) + U_{н.св}(0) \cos(\omega_{B1n} t) \right\}, \quad (6,27)$$

Приложение 7

RC – ограничитель типа RC – 6,6 – 0,25/50



Базовый элемент RC – ограничителя



RC – ограничитель типа RC – 6,6 – 0,25/50



Места установки RC – ограничителя

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 44008

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Патентообладатель(ли): *Кузьмин Сергей Васильевич (RU),
Береснев Виктор Владимирович (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2004116997

Приоритет полезной модели 07 июня 2004 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 10 февраля 2005 г.

Срок действия патента истекает 07 июня 2009 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение приложения 7

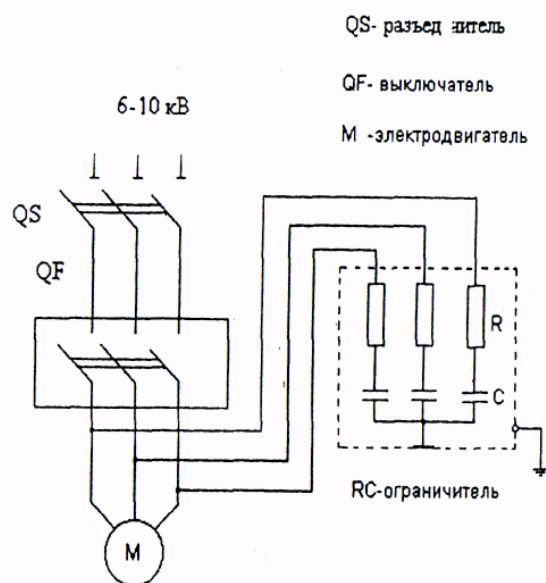
Автор(ы): *Кузьмин Сергей Васильевич (RU), Береснев
Виктор Владимирович (RU), Кузьмин Роман Сергеевич
(RU), Струков Александр Ананьевич (RU)*



RU 44008 U1

Продолжение приложения 7

ООО "Ругас"
660025 г. Красноярск
пер. Вузовский-8
Тел. (3912) 34-79-76
Факс (3912) 34-28-77



Паспорт

Трехфазный резистивно-емкостный ограничитель
коммутационных перенапряжений

Продолжение приложения 7

Назначение

Ограничитель разработан с целью защиты изоляции электрооборудования 6-10 кВ (линии, трансформаторы, электродвигатели) от коммутационных перенапряжений в сетях трехфазного переменного тока частотой 50 Гц.

Применение ограничителей перенапряжений позволяет существенно повысить надежность и безаварийность электрооборудования, снизить внеплановые простои технологического оборудования из-за отказов электроустановок в результате пробоев изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений.

Принцип действия и устройство

Действие устройства основано на ограничении амплитуды перенапряжений: за счет уменьшения волнового сопротивления защищаемого объекта с помощью емкости и устрешения многократных повторных зажигания дуги в выключателе с помощью активного сопротивления.

Состоит ограничитель из трех однофазных RC-цепочек, соединенных в звезду с заземленной нулевой: точкой для сетей с током однофазного замыкания на землю менее 3 А.

Условия применения ограничителей

эксплуатация в районах с умеренным и холодным климатом, в закрытых помещениях и на открытом воздухе, при температуре окружающей среды от -45°C до +55°C;

среднегодовое значение относительной влажности воздуха 30% при температуре +15°C;

окружающая среда невзрывоопасная не содержащая агрессивных газов и паров в концентрациях, снижающих параметры конденсаторов в недопустимых пределах;

высота над уровнем моря до 1400 м;

допустимые вибрации - с ускорением до 3 g в диапазоне частот 0,5-15 кГц;

группа условий эксплуатации М29 по ГОСТ 17516.1-90

Технические параметры

Номинальное напряжение, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	13
Уровень ограничения перенапряжений до	(1,2-1,5)U _н
Габаритные размеры, мм	760x360x 500
Масса, кг	35
Срок службы не менее	25 лет

- Схема соединения RC-цепочек в ограничителе и схема его подключения к защищаемому объекту показаны на рисунке(на примере защиты электродвигателя).

При коротком кабеле (5-50м) между выключателем QF и защищаемым объектом М ограничитель перенапряжений устанавливается непосредственно в высоковольтной ячейке (если позволяют габариты) или возле нее (сверху или сбоку) и подключается высоковольтными проводами или отрезком кабеля к выводам выключателя. При длинном кабеле (сотни метров) ограничитель монтируется непосредственно у защищаемого электрооборудования и подключается к его выводам.

Дата изготовления

Дата испытания

Приложение 8

Отзывы и заключения о работе РС - ограничителей

Открытое акционерное общество
"Ачинский нефтеперерабатывающий завод
Восточной нефтяной компании"
(ОАО "АНПЗ ВНК")



Российская Федерация	662110 Красноярский край	
Большеулуйский район	промзона НПЗ	
ОГРН	1022401153532	
Телетайп:	288415, 288454 - Глобус	ИНН 2443000518 КПП 997150001
Телекс:	288153 WEGA SU	Р/счет 40702810500380000079
Факс:	8 (39 151) 5 03 00	Филиал НБ "ТРАСТ" (ОАО) в г.Красноярск
Коммутатор:	8 (39 151) 4 12 22	К/счет 30101810900000000941, БИК 040407941
E-mail:	SEKR@anpz.ru	Коды ОКПО 05747206 ОКВЭД 23.20

исх. № 24/12

« 01 » 02 2006 г.

ОТЗЫВ

о работе *РС-гасителей перенапряжения*.

На Ачинском НПЗ применяются с 2001г *РС-гасители перенапряжения*, производителя ООО «Рутас». Данные *РС-гасители перенапряжения* установлены на тележке совместно с вакуумным выключателем ВВТЭ-10-630, для коммутации асинхронных электродвигателей наливных насосов. При такой установке, *РС-гасители перенапряжения* защищают от коммутационных перенапряжений кабель и электродвигатель. За время эксплуатации *РС-гасителей перенапряжения* пробоя изоляции ни кабелей, ни обмоток статоров электродвигателей на данных позициях не было. Ранее, до монтажа *РС-гасителей перенапряжения*, на данных позициях были случаи пробоя изоляции на выводных концах обмоток статоров электродвигателей.

Вывод: *РС-гасители* обеспечивают защиту изоляции кабелей и электродвигателей от коммутационных перенапряжений.

Заместитель главного
энергетика ОАО «АНПЗ ВНК»

А.Ю.Разин

**РУСАЛ**

ГЛИНОЗЕМСЕРВИС

ООО «Глиноземсервис»
 Россия, Красноярский край
 662150, г. Ачинск, Южная Промзона,
 квартал IX, строения I
 Тел.: (39151) 3-50-05
 Факс: (39151) 3-50-80
 www.rusal.ru

ОТЗЫВ
о результатах работы трех фазных РС – ограничителей,
производимых предприятием ООО «Рутас» и установленных в сетях 3, 6, 10 кВ
ОАО «АГК»

1. Эффект в результате применения РС – ограничителей на количестве повреждений высоковольтных электродвигателей и электрокабелей.

На основании проведенных исследований в сетях напряжением 3, 6, 10 кВ ОАО «АГК» и в соответствии с выданными рекомендациями для эффективного ограничения внутренних перенапряжений с конца 2003 года на ОАО «АГК» началось внедрение трех фазных РС – ограничителей. За период с 2003 года по 2005 год на ОАО «АГК» было внедрено 48 РС – ограничителей : в сырьевом цехе -19 шт., в цехе гидрохимия – 8 шт., в цехе спекания – 4 шт., в цехе по ремонту и эксплуатации сетей и подстанций -17 шт. Ограничители подключались к зажимам электродвигателей, а также встраивались в высоковольтных ячейках распределительных подстанций.

Эффект от внедрения РС – ограничителей виден на примере сырьевого цеха, где у высоковольтных электродвигателей 10 кВ мощностью от 1840 кВт до 10000 кВт установлено максимальное количество ограничителей. Так, анализ аварийности показывает, что количество отказов (повреждений) на высоковольтных электродвигателях составляло: в 2002 году -17 шт., в 2003 году – 15 шт., в 2004 году – 8 шт., в 2005 году -8 шт., т.е. количество повреждений электродвигателей снизилось приблизительно в 2 раза. Установка РС – ограничителей дало положительный эффект и на снижение количества пробоев изоляции высоковольтных кабелей, что видно из таблицы:

Годы	Количество пробоев изоляции высоковольтных кабелей
До внедрения РС-ограничителей:	
2000	31
2001	22
2002	24
2003	22
После внедрения РС-ограничителей:	
2004	13
2005	5

Продолжение приложения 8

2

В результате внедрения RC – ограничителей число пробоев изоляции высоковольтных кабелей в 2005 году сократилось в 6 раз по отношению к 2000 году.

2. Экономический эффект от внедрения RC-ограничителей (на примере сырьевого цеха).

Экономический эффект от применения RC-ограничителей в сырьевом цехе ОАО «АГК» выражается в экономии средств, которые пошли бы на капитальный ремонт синхронных электродвигателей и плановое приобретение новых. Так в течение 2005г. в сырьевом цехе в результате коммутационных перенапряжений вышло из строя 8 электродвигателей. Четырем из них при пробое одной секции обмотки статора был произведен текущий ремонт по месту установки (поврежденные секции были исключены из схемы), а четырем потребовался капитальный ремонт в условиях электроремонтного цеха (ЭРЦ). Согласно калькуляции работ ЭРЦ на подобный ремонт требуется 1.268,6 ч/час. При стоимости услуг ЭРЦ одного ч/часа в 175,25 руб. затраты на ремонт электродвигателей сырьевого цеха в 2005г. составили:

$$K=4 \times 1.268,6 \times 175,25=889.288,6 \text{ (руб.)}$$

Так как текущий ремонт по месту установки после повреждения секций обмоток статора произведен методом исключения из работы поврежденных секций, что приводит к ухудшению технических данных электродвигателя, а при повторных повреждениях приводит не только к обязательному капитальному ремонту, но и к полной его замене. Стоимость одного подобного электродвигателя по коммерческим проработкам ЗАО «Завод Крупных Электрических Машин» (ЗАО «ЗКЭМ») составляет от 5.200.000 руб. и выше в зависимости от мощности электродвигателя, степени его защиты и формы исполнения. С учетом состояния имеющего парка высоковольтных электродвигателей сырьевого цеха ОАО «АГК» ежегодно необходимо планово менять не менее 1 электродвигателя. По состоянию на 1.01.2006 года в сырьевом цехе на высоковольтные электродвигатели необходимо дополнительно установить 28 RC – ограничителей. Их стоимость (с монтажом и наладкой) составляет:

$$C = 120000 \times 28 = 3360000 \text{ (руб.)}$$

Суммарные затраты на ежегодный ремонт электродвигателей и капитальные вложения на приобретение одного нового электродвигателя составят:

$$K_c=889288,6+5200000=6.089.288,6 \text{ (руб.)}$$

Экономический эффект от внедрения 28-ми RC-ограничителей составит:

$$\Delta_{\Sigma}=6089288,6 - 3360000=2729288,6 \text{ (руб.)}$$

Данная сумма средств будет ежегодно сэкономлена для предприятия в результате использования RC-ограничителей на всех синхронных электродвигателях сырьевого цеха ОАО «АГК».

Главный энергетик



В.Е. Дубин

Продолжение приложения 8

СОГЛАСОВАНО:
Зам. начальника ФГУ
УГЭН по Енисейскому региону
Мартынов Б.Л.
08.04.2003 г.
Начальник промышленной инспекции
ФГУ УГЭН по Енисейскому региону
Тарнопольский В.Г.
08.04.2003 г.

СОГЛАСОВАНО:
Начальник Енисейского
округа Госгортехнадзора
Закревский М.П.
01.04.2003 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по применению резистивно-емкостных RC-ограничителей или гасителей для
защиты электродвигателей и трансформаторов от коммутационных и
дуговых перенапряжений в сетях 6-10 кВ.

Рассмотрев сертификаты соответствия, технические условия на RC-гасители и RC-ограничители, чертежи общих видов, электрические схемы подключения к электродвигателям и трансформаторам, акты внедрения и отзывы предприятий: ОАО «Разрез Бородинский», АО «Разрез Березовский-1», ОАО «Востсибуголь», ОАО «АНПЗ ВНК», а также заключения № 75-Э от 14.08.01 г. и № 87-Э от 14.08.02 г. Федерального государственного унитарного предприятия по безопасности в горной промышленности НЦ ВостНИИ и заключение ОАО «Сибцветметинипроект» № 124\01 от 15.01.2001 г., протокола технического совещания ТЭР управления «Красноярскгосэнергонадзор» и циркуляр Ц-5-98 Э от 30.10.98 г. РАО «ЕЭС России».

Решили:

1. Рекомендовать использование RC-ограничителей и RC-гасителей для защиты электродвигателей и трансформаторов напряжением 6-10 кВ от коммутационных перенапряжений и перенапряжений, возникающих при дуговых однофазных замыканиях на землю.
2. Установка RC-ограничителей и RC-гасителей допускается в фидерных ячейках, если расстояние между электродвигателями (трансформаторами) не превышает 25 м, в противном случае RC-ограничители и RC-гасители устанавливаются в непосредственной близости от электродвигателей и трансформаторов.
3. RC-ограничители и RC-гасители рекомендовать к использованию на машиностроительных, металлургических, нефтеперерабатывающих и мясоперерабатывающих предприятиях Красноярского края.
4. В горной промышленности Красноярского края RC-ограничители и RC-гасители рекомендуем использовать на открытых горных работах (разрезы и карьеры) и на поверхности шахт.

Разработчик и изготовитель RC-ограничителей и RC-гасителей: ООО «Рутас»,
г. Красноярск, 660025, пр-т Красноярский рабочий -95.

С.С.

Приложение 9

Устройство УДАТ – 10,5 – 500/75

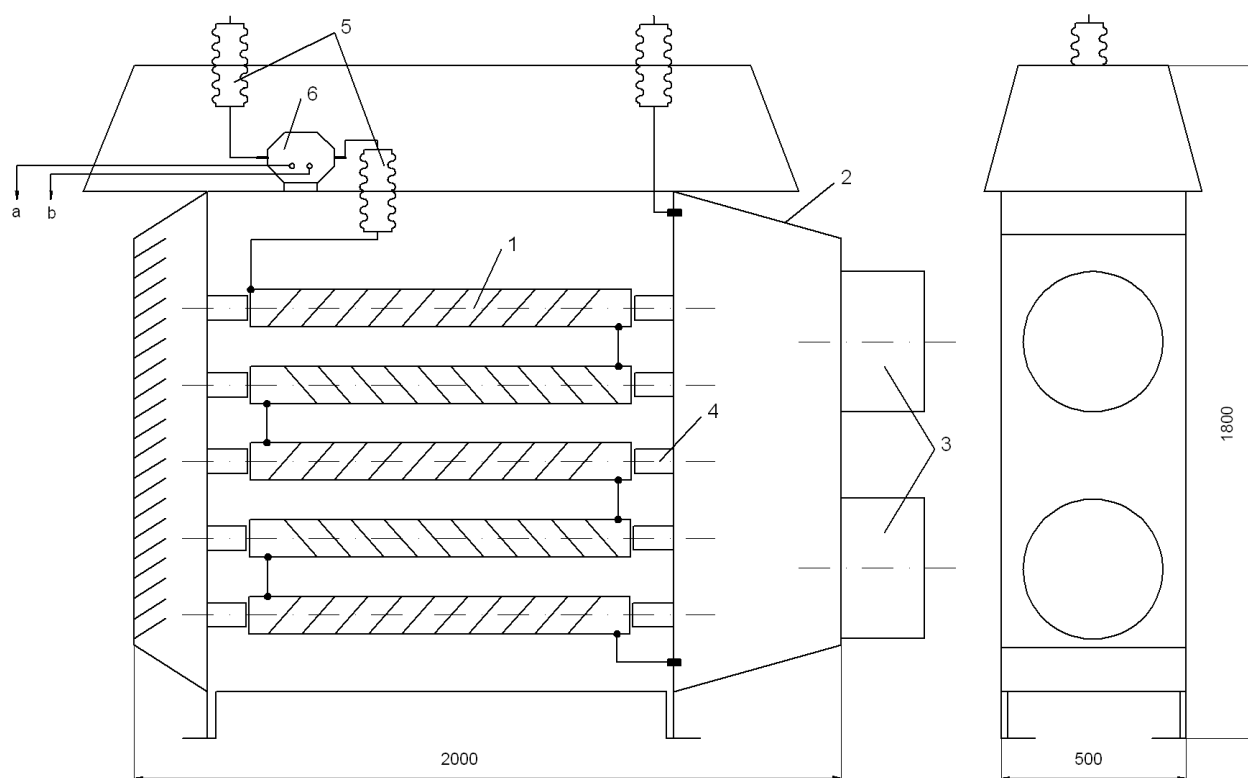


Рисунок П9.1 – Устройство для создания добавочного активного тока.

1. Базовый элемент;
2. Корпус;
3. Вентиляторы;
4. Опорный изолятор;



Фотографии устройства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 54252

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Патентообладатель(ли): **Кузьмин Сергей Васильевич (RU),
Береснев Виктор Владимирович (RU)**

Автор(ы): **Кузьмин Сергей Васильевич (RU), Береснев
Виктор Владимирович (RU), Кузьмин Роман Сергеевич
(RU), Струков Александр Ананьевич (RU)**

Заявка № 2005138671

Приоритет полезной модели **12 декабря 2005 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **10 июня 2006 г.**

Срок действия патента истекает **12 декабря 2010 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов