

*На правах рукописи*

**КУЗЬМИН РОМАН СЕРГЕЕВИЧ**

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

*Специальность 05.14.02 – Электростанции  
и электроэнергетические системы*

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**КРАСНОЯРСК  
2006**

**Работа выполнена в Государственном университете цветных металлов и золота.**

***Научный руководитель –***  
**кандидат технических наук, доцент**

***Лапаев Игорь Иванович***

***Официальные оппоненты:***

**Ведущее предприятие – ООО“Рутас”, г. Красноярск**

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**  
**диссертационного совета**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 – 10кВ горно – металлургических предприятий.

Широкое внедрение высоковольтных вакуумных аппаратов привело к тому, что коммутационные перенапряжения (КП) являются одной из основных причин возникновения ОЗЗ, а низкая селективность 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 – 10кВ 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 – 10кВ промышленных предприятий основанных на эффективном ограничении внутренних перенапряжений и на высокой селективности защит от ОЗЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ аварийности распределительных сетей 6 – 10кВ на современном этапе и выявить основные причины возникновения ОЗЗ, определить наиболее повреждаемые элементы в системе электроснабжения технологического оборудования;
- выполнить в промышленных условиях экспериментальные исследования, направленные на определение основных факторов влияющих на величину и характер КП и перенапряжений в режиме ОЗЗ;
- выполнить аналитические исследования КП в режиме ОЗЗ, возникающих в системе: вакуумный выключатель – кабель – электродвигатель;
- разработать эффективные средства, позволяющие повысить селективность работы защит от ОЗЗ, ограничить КП и перенапряжения в режиме ОЗЗ, а на их основе обосновать комплексный подход к снижению числа ОЗЗ в распределительных сетях 6 – 10кВ промышленных предприятий.

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

**Предмет исследований:** КП, 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 теория математической статистики.

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

#### **Научная новизна работы:**

- выявлены основные причины, приводившие к возникновению ОЗЗ в распределительных сетях 6 – 10кВ на современном этапе и определены наиболее повреждаемые элементы в системе электроснабжения технологических комплексов;
- установлены зависимости уровней КП в безаварийном режиме возникающие в системе: выключатель – кабель – электродвигатель, от параметров данной системы: типа и мощности электродвигателя, типа коммутационного аппарата, длины и сечения кабельной линии, что позволило разработать методику для определения кратности КП в любой точке указанной системы;
- выявление зависимости уровней перенапряжений возникающих в режиме ОЗЗ от величины и характера тока ОЗЗ и режима нейтрали сети напряжением 6 – 10кВ;
- установлены зависимости уровней КП в режиме ОЗЗ от места возникновения ОЗЗ, частоты коммутационного импульса, кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ, числа повторных зажиганий дуги в вакуумной камере и величины присоединенной емкости на зажимах электродвигателя возникающие в системе: вакуумный выключатель – кабель – электродвигатель;
- выявлена зависимость влияния конфигурации распределительной сети, типа системы защиты от ОЗЗ и типа коммутационного аппарата, на величину коэффициента правильных действий защиты от ОЗЗ.

#### **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 – кабель – электродвигатель.
2. На основе экспериментальных и аналитических исследований определены параметры универсального РС – ограничителя и разработана его конструкция, которая была учтена при осуществлении промышленного выпуска ограничения КП типа РС – 6,6 – 0,25/50. Конструкция указанного устройства запатентована, как полезная модель.
3. Определены параметры устройства предназначенного для резистивного заземления нейтрали сети 6 – 10кВ 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 10кВ ОАО “АГК” основанном 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 эксплуатации ограничителей КП типа РС – 6,6 – 0,25/50 установленных для защиты электродвигателей на таких предприятиях как: ОАО “АГК”, ОАО “АНПЗ”, ФГУП “ГХК”,

ООО “Красноярский цемент”, ОАО “Разрез Бородинский ” и ОАО “Разрез Березовский – 1” и устройства УДАТ – 10 – 500/75 установленного на ГПП – 2 ОАО “АГК”.

#### **Автор защищает:**

1. Выявление зависимости КП возникающих в системе: выключатель - кабель – электродвигатель, как в безаварийном режиме эксплуатации, так и в режиме ОЗЗ.
2. Выявление зависимости уровней перенапряжений возникающих в режиме ОЗЗ от величины и характера тока ОЗЗ и режима заземления нейтрали сети напряжением 6 – 10кВ.
3. Методику определения кратности КП в системе: выключатель – кабель – электродвигатель в зависимости от параметров данной системы.
4. Комплексный подход к снижению числа ОЗЗ в распределительных сетях 6 – 10кВ 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 КП 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 10 печатных работ.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из \_\_\_ наименований и \_\_\_ приложений. Основной пакет диссертационной работы изложен на \_\_\_ страницах, проиллюстрирован \_\_\_ рисунками и \_\_\_ таблицами, приложения представлены на \_\_\_ страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформирована цель работы и ее основные задачи. Показана научная новизна и практическая ценность выполненных исследований, изложена структура работы.

**В первой разделе** выполнен анализ аварийности в распределительных сетях 6 – 10 кВ горных, горно – перерабатывающих и металлургических предприятий расположенных в Восточной Сибири, т.к. данные предприятия рассматривались как единый объект для исследования.

Установлено, что основным видом аварий в распределительных сетях 6 – 10 кВ данных предприятий являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). На долю ОЗЗ приходится около 66% всех аварийных отключений. Основными причинами возникновения ОЗЗ являются КП, перенапряжения в режиме ОЗЗ и естественное старение изоляции электродвигателя. На указанные причины приходится соответственно 38%, 33%, и 20% возникших ОЗЗ в распределительных сетях промышленных предприятий.

Наиболее повреждаемыми элементами в системах электроснабжения технологических комплексов являются высоковольтные электродвигатели и кабельные линии, на их долю приходится около 80 % всех ОЗЗ. Широкое внедрение вакуумных выключателей и контакторов в период 1995 – 2003г привело к тому, что электрический пробой изоляции высоковольтных электродвигателей на угольных разрезах, ОАО “АГК” и металлургических предприятиях увеличился соответственно в 9,5; 3,4 и 3 раза по отношению к периоду до 1995г. Анализ аварийности показал, что перенапряжения, возникающие в режиме ОЗЗ, вызывают пробой изоляции в неповреждённых участках 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. Таким образом, было установлено, что для повышения надежности распределительных сетей 6 - 10 кВ необходимо резко снизить число ОЗЗ, за счет эффективного ограничения КП и перенапряжений, возникающих в режиме ОЗЗ, а также добиться высокой селективности защит от ОЗЗ.

Анализ проблемы перенапряжений в высоковольтных электрических сетях показал, что на первоначальном этапе исследований особое внимание уделялось перенапряжениям в режиме ОЗЗ, т.к. по общему мнению они представляли наибольшую опасность (продолжительность воздействия и широта охвата сети). Это объясняется, во-первых, тем, что КП считались безопасными для изоляции, выбранной в соответствии с требованиями по атмосферным перенапряжениям; во-вторых, считалось, что электрическая прочность новой изоляции электродвигателей превышает ожидаемые внутренние перенапряжения примерно в 2 раза (руководящие указания 1954 г.); в-третьих, недостаточно было информации о диэлектрической прочности изоляции длительно эксплуатирующихся электродвигателей.

С внедрением в промышленную эксплуатацию вакуумной коммутационной аппаратуры проблема КП вышла на первое место.

Исследованиям КП были посвящены работы таких ученых как Гончаров А.Ф., Эпштейн И.Я., Евдокунин Г.А., Каганов З.Г., Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х., Роховский В.И., Кадомская К.П.

Результаты экспериментальных работ и теоретических исследований перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей, имеют противоречивый характер. Это в свою очередь не позволяет сделать окончательных выводов по проблеме КП. Также снижает ценность полученных результатов неполная информация о параметрах объектов исследований.

Нет единого мнения о вопросе эффективности существующих средств защиты электрооборудования от КП, т.к. не существует эффективной инженерной методики, позволяющей оценить уровень КП в системе: выключатель – кабельная линия – электродвигатель.

Практически отсутствуют исследования КП в режиме ОЗЗ.

Исследования аварийности в распределительных сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий Восточной Сибири на современном этапе и анализ состояния проблемы

ограничения КП и перенапряжений в режиме ОЗЗ позволили сформировать цели и задачи данной диссертационной работы.

**Во втором разделе** представлены результаты экспериментальных исследований КП и перенапряжений в режиме ОЗЗ. Разработан инженерный метод оценки КП в системе: выключатель – кабельная линия – электродвигатель.

На основе анализа существующих средств для измерений перенапряжения с учетом того, что измерения необходимо было проводить на передвижных (угольные разрезы) и стационарных (металлургические заводы и ОАО “АГК”) электропотребителях. В качестве измерительной аппаратуры использовались регистраторы амплитуд КП РКП – 4 (диапазон измерения амплитуд 5 – 25В; основная приведенная погрешность 6%; диапазон длительности импульсов 20 – 2000мкс; время фиксации показаний 0,5 минут; температура окружающего воздуха -20 +40°С; относительная влажность до 80%; атмосферное давление 86 – 106кПа), компенсированные емкостные делители напряжений ДНЭК – 10 (номинальное напряжение 3; 6; 10кВ; импульсная прочность 115кВ; коэффициент деления по ступеням 1182, 2390, 3852; максимальная основная погрешность 0,77%; температура окружающей среды -20 +40°С; относительная влажность до 80%; атмосферное давление 86 – 106кПа) и портативные цифровые осциллографы.

Для измерения КП измерительная аппаратура подключалась к объекту исследования комплексно, схема представлена на рис.1, а для фиксации перенапряжений в режиме ОЗЗ измерительная аппаратура подключалась согласно схемы представленной на рис.2

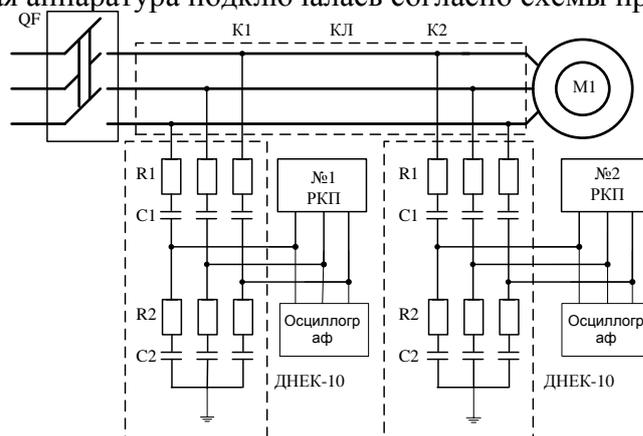


Рис.1. Схема измерения КП на зажимах двигателя и на зажимах выключателя.

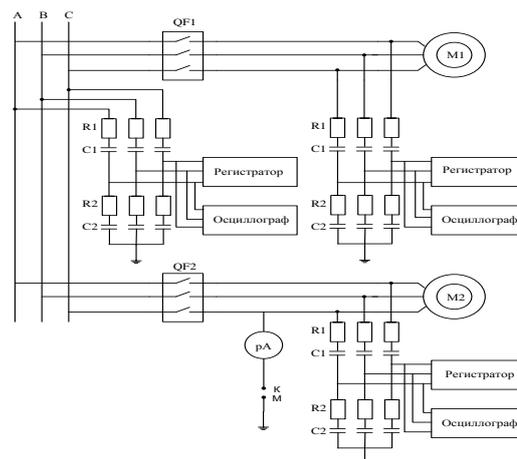


Рис.2 Схема измерений перенапряжений при дуговых ОЗЗ, и КП в режиме ОЗЗ.

Использование двух комплектов измерительной аппаратуры (см.рис.1) позволило учесть влияние кабельной линии на величину КП как на зажимах электродвигателя, так и на зажимах выключателя.

На схеме представленной на рис.2, искусственное дуговое ОЗЗ создавалось с помощью воздушного промежутка между точкой К и М. Перенапряжения фиксировались в трех точках: на зажимах двух электродвигателей и на секции шин подстанции, что позволило

оценить влияние конфигурации сети и режима нейтрали сети на величину перенапряжения, а также выявить влияние работоспособности защиты от ОЗЗ на величину КП в режиме ОЗЗ.

$$K = \frac{U}{U_H}, \quad (1)$$

где:  $U$  – напряжение на зажимах электродвигателя, кВ;  $U_H$  – номинальное напряжение сети, кВ.

Статическая обработка данных по КП и проверка выборок на однородность производилась по трем критериям: сравнению средних значений, дисперсий и по критерию  $\chi^2$  Пирсона. Проверка выборок на экстремальность позволила установить, что зафиксированные максимальные значения КП являются закономерными, т.к. принадлежат генеральной совокупности.

Статистическая обработка данных позволила установить, что основными факторами влияющими на величину и характер КП в системе: выключатель – кабель – двигатель, являются тип и мощность электродвигателя, тип коммутационного аппарата, а также длина и сечение кабельной линии.

Установлено, что кабельная линия оказывает существенное влияние на величину КП, возникающих на зажимах электродвигателя, если коммутация осуществляется масляным выключателем и практически не оказывает влияния на величину и характер КП, возникающих на зажимах электродвигателя, если коммутация осуществляется вакуумным выключателем. Это связано с тем, что в первом случае частота не превышает 15 кГц, продольное сопротивление кабеля увеличивается незначительно. Присоединенная емкость на зажимах электродвигателя увеличивается за счет емкости кабеля, что приводит к снижению амплитуды КП на зажимах электродвигателя, т.к.

$$U = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где:  $i_0$  – величина среза тока в вакуумном выключателе, А;  $L$  – индуктивное сопротивление обмотки электродвигателя, Гн;  $C$  – присоединенная емкость на зажимах электродвигателя, Ф.

Во втором случае частота коммутационного импульса находится в диапазоне 60 – 120 кГц, что приводит к сильному увеличению продольного сопротивления кабеля. Емкость кабеля не участвует в увеличении присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, что приводит к увеличению амплитуды КП на зажимах электродвигателя.

На рис.3 представлены зависимости максимальных значений коэффициентов кратности КП от типа и мощности электродвигателя и типа коммутационного аппарата. На рис.4 представлены зависимости понижающего коэффициента КП в зависимости от длины и сечения кабельной линии связывающей выключатель с электродвигателем.

Использование данных зависимостей позволило разработать инженерный метод оценки КП в системе: выключатель – кабель – электродвигатель.

Согласно разработанной методики 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:

$$K_2 = \frac{K_{max}}{k_n}; \quad K_1 = \frac{K_2}{k_n} \quad (3)$$

где,  $K_{max}$  – максимальная кратность перенапряжений, определенная по графику (рис. 3) с учетом типа, мощности электродвигателя и типа выключателя.

$k_n$  – понижающий коэффициент, величина которого определяется по графику (рис. 4) 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:

$$K_2 = K_{max}; \quad K_1 = \frac{K_2}{k_{\Pi}} \quad (4)$$

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

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

Если значение коэффициента  $K_1$  и  $K_2 < 1$ , то в расчетах коэффициент  $K_2$  принимают равным 1.

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

$$K_1 = \frac{K_{огр}}{k_{\Pi}} \quad (6)$$

где,  $K_{огр}$  – уровень ограничения КП средствами защиты.

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

Разработанная методика была использован для расчета КП в системах электроснабжения напряжением 6 – 10кВ таких предприятий как, ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”, ОАО “Ачинский нефтеперерабатывающий завод”, ОАО “Красноярский алюминиевый завод”, ОАО “Братский алюминиевый завод”, ОАО “Саяногорский алюминиевый завод”, Федеральное государственное унитарное предприятие “Горно – химический комбинат”, ОАО “Красноярский цемент”, “Надежденский металлургический завод” ЗАО “Норильский никель” и Нюрбинский ГОК ОАО “Алроса”.

Отклонение расчетных данных от данных полученных при измерении КП не превышало 8%, что указывает на достоверность расчетных значений КП.

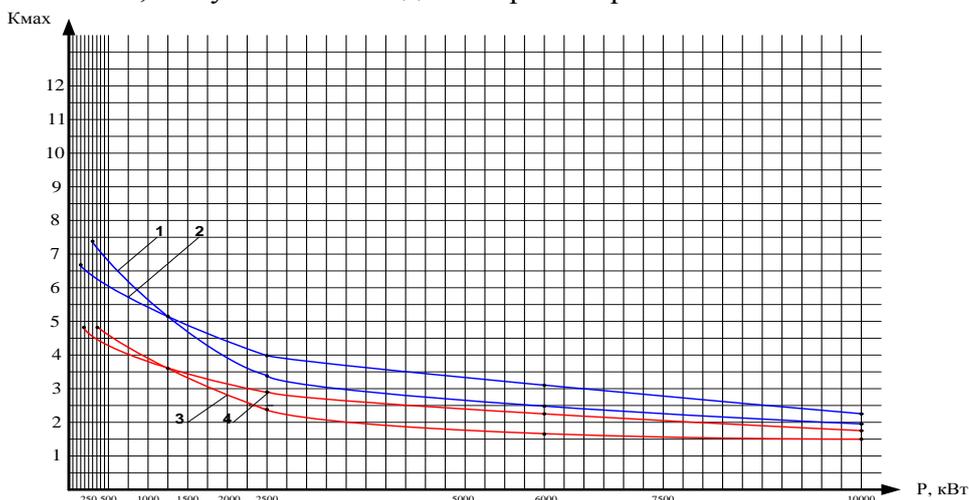


Рис. 3 Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений  $K_{max}$  для электродвигателей в зависимости от мощности электродвигателя и типа выключателя.

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

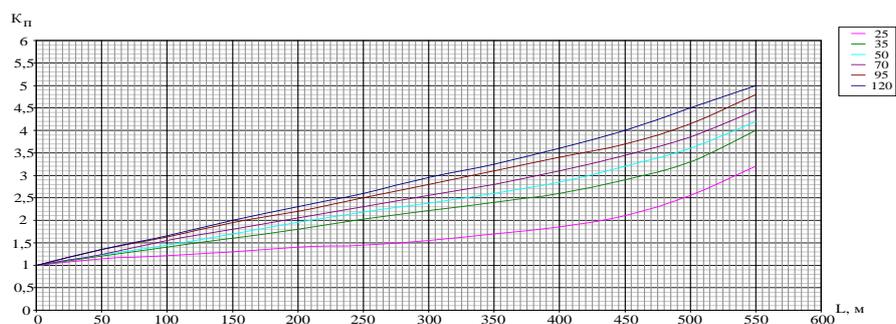


Рис.4 Изменение понижающего коэффициента коммутационных перенапряжений в зависимости от длины и сечения кабельной линии.

Экспериментальные исследования перенапряжений в режиме ОЗЗ показали, что на величину данных перенапряжений сильное влияние оказывает режим нейтрали сети 6 – 10кВ и величина емкостного тока ОЗЗ.

В таблице 1 приведены результаты измерения перенапряжений в режиме ОЗЗ в зависимости от указанных факторов.

Таблица 1

Результаты измерений перенапряжений в режиме ОЗЗ, в зависимости от режима нейтрали сети и величины емкостного тока.

Режим нейтрали сети		Кратность перенапряжения в режиме ОЗЗ, $K_{OЗЗ} = \frac{U_{max}}{U_H}$		
		$I_c < 5A$	$5A \leq I_c \leq 50A$	$I_c > 50A$
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

Из таблицы 1 видно, что максимальные перенапряжения в режиме ОЗЗ возникают в сети с изолированной нейтралью и могут превышать напряжение сети в три раза, если емкостной ток ОЗЗ находится в диапазоне от 5А до 50А.

Снизить величину перенапряжений в режиме ОЗЗ до уровня  $1,8U_N$  можно, если выполнить компенсацию емкостного тока ОЗЗ, при этом разбалансировка реактора не должна превышать 5%, в противном случае кратность перенапряжений может возрасти до  $3,3U_N$ .

Ограничить перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня  $1,8U_N$  можно и за счет заземления нейтрали сети через резистор, при этом должно соблюдаться условие:

$$I_a/I_c \geq 0,5, \quad (7)$$

где:  $I_a$  – активный ток ОЗЗ, обусловленный заземлением нейтрали сети через резистор, А;  $I_c$  – емкостной ток ОЗЗ, А.

Исследования также показали, что заземление нейтрали сети через резистор, при соблюдении условия (7), приводит к снижению бросков собственных емкостных токов снижаются, как минимум в 3 раза, что положительно отражается на работоспособности токовых защит от ОЗЗ.

В ходе выполнения экспериментальных исследований были зафиксированы КП величина которых превышала напряжение сети в 8 – 9 раз. Подобные КП возникали в режиме ОЗЗ на зажимах электродвигателя в случае неселективного отключения их от источника питания защитой от ОЗЗ или за счет действий технического персонала при обнаружении линии с ОЗЗ.

Для иллюстрации на рис.5 и рис.6 показаны осциллограммы КП возникающих на зажимах синхронного электродвигателя мощностью 2000кВт при неселективном и селективном отключении электродвигателей защитой от ОЗЗ.

Исследования показали, что максимальные КП возникают на той фазе обмотки электродвигателя, которая до отключения была связана с землей.

Установить основные факторы влияющие на величину и характер КП на экспериментальном уровне практически невозможно из – за высокой кратности КП, поэтому дальнейшие исследования в данном направлении были перенесены на аналитический уровень.

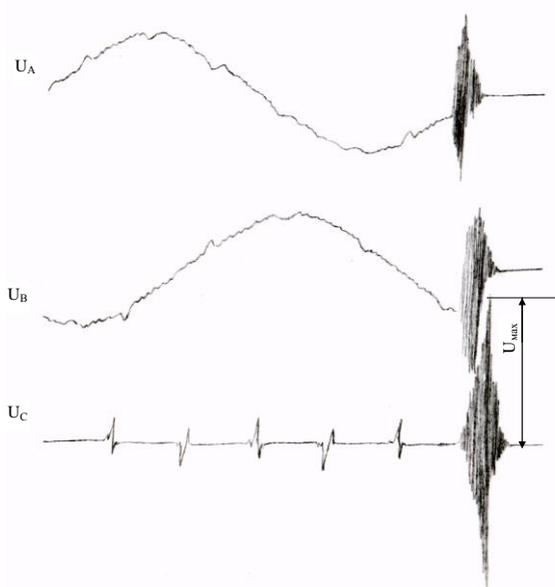


Рис.5 Осциллограммы при отключении синхронного двигателя  $P=2000кВт$  в режиме ОЗЗ вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-20/1000 У2, при неселективной работе защит от ОЗЗ.  $K_{max}=4.5$ ,  $f=80кГц$ .



Рис.6 Осциллограммы при отключении синхронного двигателя Р=1200кВт в режиме ОЗЗ вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-20/1000 У2, при селективной работе защит от ОЗЗ.  $K_{\max}=2.8$ ,  $f=80\text{кГц}$ .

**В третьем разделе** выполнено математическое моделирование КП возникающих на зажимах электродвигателя при условии, что линия с электродвигателем была отключена не селективно в режиме ОЗЗ.

Математическое моделирование КП производилось для фазы связанной с землей и для фазы не связанной с землей, без учета и с учетом повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя.

Схема замещения для фазы статорной обмотки электродвигателя связанной с землей, представлена на рис.7, а для фазы не связанной с землей на рис.8.

Использование ключа в схеме замещения, приведенной на рис.7, связано с соблюдением условия: в момент горения заземляющей дуги напряжение на емкости, которой обладает обмотка электродвигателя по отношению к земле, должна стремиться к нулю, т.к. дуга шунтирует указанную емкость, т.е.  $U_c(0_-) \approx 0$ .

На основании классического метода расчета переходных процессов получены уравнения напряжений возникающих как на фазе связанной с землей, так и для фазы не связанной с землей в момент не селективного отключения электродвигателя в режиме ОЗЗ.

Для фазы связанной с землей напряжение на нагрузке имеет вид:

$$U_{\text{н.пер.п}}(t) = e^{\alpha t} \times \left\{ \left( \frac{-i_{\text{св}}(0) - U_{\text{н.св}}(0)\alpha_1 C_H}{\omega_{B1.П} C_H} \right) \sin(\omega_{B1.П} t) + U_{\text{н.св}}(0) \cos(\omega_{B1} t) \right\}, \quad (8)$$

где:  $\alpha_1 = -\frac{R_C}{2L_C}$  - коэффициент затухания высокочастотного тока;  $i_{\text{св}}(0)$  - свободная

составляющая высокочастотного тока в первый момент коммутации;  $U_{\text{н.св}}(0)$  - свободная составляющая напряжения на нагрузке в первый момент коммутации;

$$\omega_{B1} = \sqrt{\left( \frac{R_C}{2L_C} \right)^2 - \left( \frac{C_H - C_C}{L_C C_H C_C} \right)} - \text{частота свободных колебаний.}$$

После прекращения повторных зажигания дуги напряжение на нагрузке будет описываться выражением :

$$U_{\text{н.св}}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left( -\frac{i_{\text{св}}(0_-)}{C_H \omega_B} \right) \cdot \sin(\omega_B t) \right\}, \quad (9)$$

где:  $\alpha = -\frac{R_H}{2L_H}$  - коэффициент затухания в контуре нагрузки;  $i_{CP}(0_-)$  - ток среза в

вакуумном выключателе;  $\omega_B = \sqrt{\frac{\left(\frac{R_H}{L_H}\right)^2 - \frac{4}{L_H C_H}}{4}}$  - частота свободных колебаний в контуре нагрузки.

Для фазы не связанной с землей напряжение на нагрузке имеет вид:

$$U_{н.пер}(t) = K_{O33} U_{ф.м} \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha t} \times \left\{ \left( \frac{-i_{св}(0) - \omega K_{O33} U_{ф.м} \cos(\psi_{11}) C_H - U_{н.св}(0) \alpha_1 C_H}{\omega_{B1} C_H} \right) \sin(\omega_{B1} t) + U_{н.св}(0) \cos(\omega_{B1} t) \right\} \quad (10)$$

где:  $K_{O33}$  - кратность перенапряжения в режиме ОЗЗ,  $U_{ф.м}$  - амплитуда фазного напряжения.

После нескольких повторных зажиганий дуги в вакуумной камере выключателя дуга погасает, а напряжение на нагрузке будет определяться выражением:

$$U_{н.св}(t) = e^{\alpha t} \left\{ \left( \frac{-i_{CP}(0_-) - \alpha U_H(0) C_H}{C_H \omega_B} \right) \sin(\omega_B t) + U_H(0) \cos(\omega_B t) \right\}, \quad (11)$$

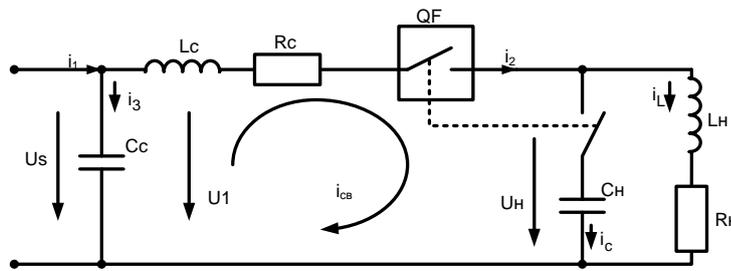


Рис.7 Схема замещения фазы статорной обмотки электродвигателя связанной с землей при отключении электродвигателя в режиме дугового ОЗЗ.

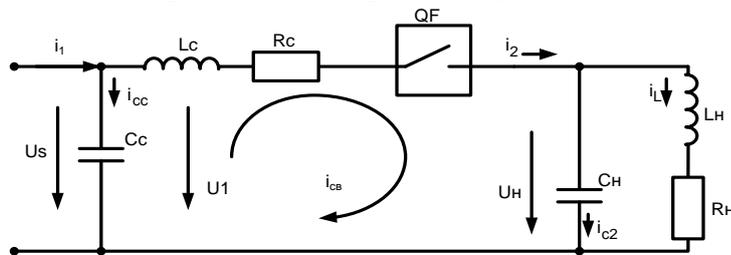


Рис. 8 Схема замещения фазы статорной обмотки электродвигателя не связанной с землей в режиме дугового ОЗЗ.

$C_c$  - емкость внешней фазы сети относительно земли,  $\Phi$ ;  $C_H$  - емкость отключаемой нагрузки (включает емкость электродвигателя и кабеля второго участка),  $\Phi$ ;  $L_c$ ,  $L_H$  - индуктивности нагрузки и кабеля до места ОЗЗ, Гн;  $R_c$ ,  $R_H$  - активное продольное сопротивление кабеля до момента ОЗЗ и нагрузки, Ом; QF - вакуумный выключатель;  $U_s$  - напряжение на фазе сети в режиме ОЗЗ.

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

Математическое моделирование КП выполнялось на примере синхронных электродвигателей типа СДЭУ - 14 - 29 - 6 мощностью 520кВт и СДЭ - 16 - 46 - 6 мощностью 1250кВт.

Аналитические исследования показали, что при не селективном отключении электродвигателя от источника питания на величину и характер КП оказывают существенное

влияние не только мощность электродвигателя, ток среза, число повторных зажиганий дуги, но и связь фазы с землей до момента отключения.

Установлено, что кратность КП на фазе связанной с землей всегда выше кратности КП на фазе не связанной с землей. Например: для синхронного электродвигателя мощностью 520кВт максимальная кратность КП на фазе связанной с землей составила 8,48. а для фазы не связанной с землей – 6,32.

С ростом мощности электродвигателя кратность КП снижается как на фазе связанной с землей, так и на фазе не связанной с землей.

Например: с ростом мощности синхронного электродвигателя с 520кВт до 1250кВт кратность КП снижается с 7,29 до 2,41, при этом ток среза составляет 14,1А.

Уменьшение тока среза с 14,1А до 5,66А приводит к снижению кратности КП с 7,29 до 2,83 для синхронного электродвигателя мощностью 520кВт.

Кроме вышеуказанных факторов на величину и характер КП для фазы связанной с землей серьезное влияние оказывают расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ для фазы связанной с землей и кратность перенапряжения в режиме ОЗЗ. С увеличением расстояния кратность КП увеличивается, а увеличение кратности перенапряжения в режиме ОЗЗ снижает кратность КП. Данные закономерности иллюстрируются осциллограммами переходных процессов представленными на рис.9 и рис.10.

Снижение кратности КП на зажимах электродвигателя можно добиться за счет увеличения присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, если выполняется условие:

$$f_{033} \ll f_{св.н}, \quad (12)$$

где,  $f_{033}$  – частота колебаний напряжения на неповрежденной фазе сети в режиме ОЗЗ, Гц;

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

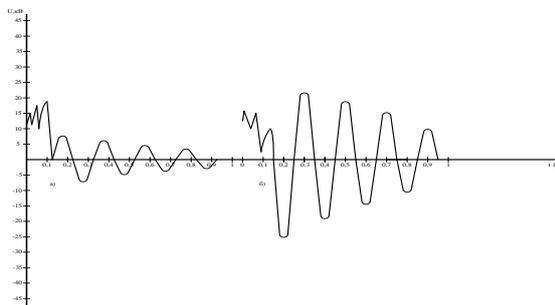


Рис.9 Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6 связанной с землей при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1А,  $K_{033}=2,5$ ,  $f_{033}=2,5$ кГц,  $C_{доб}=0,05$ мкФ, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ: а) 100м, б) 1000м.

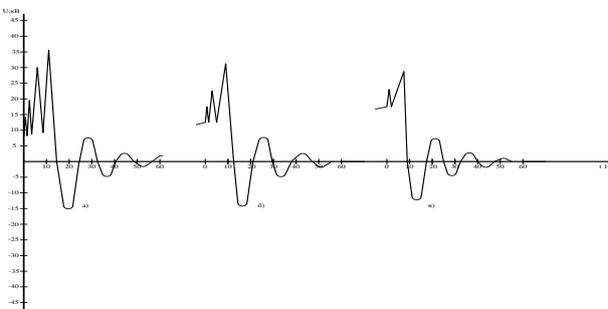


Рис.10 Коммутационные перенапряжения на фазе статорной обмотки электродвигателя СДЭУ-14-29-6 не связанной с землей при неселективном отключении в режиме ОЗЗ, величина тока среза 14,1А, расстояние между электродвигателем и местом ОЗЗ составляет 100м: а)  $K_{033}=1,73$  – металлическое ОЗЗ,  $f_{033}=50$ Гц,  $f_{св.п}=384033$ Гц,  $f_{св.н}=63800$ Гц; б)  $K_{033}=2,5$ ,  $f_{033}=2,5$ кГц,  $f_{св.п}=384033$ Гц,  $f_{св.н}=63800$ Гц; в)  $K_{033}=3,5$ ,  $f_{033}=5$ кГц,  $f_{св.п}=384033$ Гц,  $f_{св.н}=63800$ Гц;

В частности, увеличение присоединенной емкости до 0,25 мкФ на зажимах синхронного электродвигателя мощностью 520кВт позволяет снизить кратность КП с 2,6 до 0,75, если расстояние между местом ОЗЗ и электродвигателем составляет 100м. Увеличение расстояния до 1000м между местом ОЗЗ и электродвигателем практически не влияет на величину КП, если присоединенная емкость на зажимах электродвигателя не опускается ниже 0,25мкФ.

Не соблюдение условия (12) и увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя может привести к росту кратности КП. Поэтому для ликвидации условий, при которых могут возникать максимальные КП на зажимах электродвигателя не достаточно увеличить присоединенную емкость на зажимах электродвигателя, необходимо исключить не селективное отключение электродвигателя в режиме ОЗЗ.

Для подтверждения достоверных результатов полученных при аналитических исследованиях КП в режиме ОЗЗ были выполнены экспериментальные измерения КП в режиме ОЗЗ на угольном разрезе “Березовский – 1” и на ОАО “Ачинский глиноземный комбинат”. Результаты теоретических и экспериментальных исследований приведены в таблице 2.

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

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, $K_{п}$				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	$C_{доб}=0$ мкФ, $L \approx 1000$ м, $K_{озз}=1,73$	8,48	6,42	8,2	6,2	3,4	3,5
2	$C_{доб}=0$ мкФ, $L \approx 100$ м, $K_{озз} \approx 2,5$	7,33	5,33	7,5	5,2	2,3	2,5
3	$C_{доб}=0,25$ мкФ, $L \approx 100$ м, $K_{озз} \approx 2,5$	0,75	2,33	0,7	2,5	7,1	7,3

**В четвертом разделе** выполнен анализ эффективности защитных средств и устройств от КП. Разработан универсальный резистивно – емкостной ограничитель. Сделан анализ работоспособности существующих систем защит от ОЗЗ. Обосновано совместное использование РС – ограничителей подключенных к зажимам электродвигателей и частичного заземления нейтрали сети 6 – 10кВ через резистор.

Анализ эффективности существующих средств ограничения КП показал, что нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) не способны защитить изоляцию электродвигателей от КП, т.к. их уровень ограничения КП находится в диапазоне  $(2,2 \div 2,6)U_n$ , это выше допустимого значения  $1,8U_n$ . Кроме этого ОПН обладает низкой термической устойчивостью в режиме ОЗЗ. Наиболее эффективным средством ограничения КП является резистивно – емкостной ограничитель перенапряжений (РС – ограничитель). Исследования показали, что для ограничения КП на зажимах электродвигателя до уровня  $1,2U_n$  необходимо использовать РС – ограничители с индивидуальными параметрами (емкость, сопротивление).

Принимая во внимание, что допустимое значение КП для электродвигателей не должно превышать  $1,8U_n$ , были рассчитаны усредненные значения емкости и сопротивления RC – ограничителя ( $C=0,25\text{мкФ}$ ,  $R=500\text{Ом}$ , мощность резистора 60Вт), что позволило разработать конструкцию универсального RC – ограничителя. Универсальный RC – ограничитель состоит из трех однофазных RC – цепочек, собранных по схеме “звезда” и помещенных в специальный корпус со степенью защиты IP – 54.

Внешний вид универсального RC – ограничителя показан на рис.11. Уровень ограничения КП находится в диапазоне  $(1,2\div 1,7)U_n$ . С увеличением мощности электродвигателя уровень КП снижается.

Анализ работоспособности систем защит от ОЗЗ показал, что наиболее эффективной системой защиты от ОЗЗ является двухступенчатая токовая система. Однако коэффициент правильных действий такой системы в сетях 6кВ угольных разрезов не превышает 40%. Установлено, что основные причины, негативно влияющие на коэффициент правильных действий являются недостаточная величина входного сигнала, которая сильно зависит от конфигурации сети, и броски собственных емкостных токов отдельных линий.

Исследование токораспределения трехфазной системы в режиме ОЗЗ показало, что увеличить и стабилизировать величину входного сигнала по току нулевой последовательности можно за счет наложения добавочного активного тока на ток ОЗЗ, т.е. за счет заземления нейтрали сети через резистор величиной 500Ом. В этом случае броски собственных емкостных токов отдельных линий не будут превышать полуторократных значений, а величина входного сигнала практически становится независима от конфигурации сети, что позволяет расширить диапазон уставок по току.

Кроме этого заземление нейтрали сети 6 – 10кВ через резистор величиной 500Ом позволяет ограничить перенапряжения в режиме ОЗЗ до уровня  $1,8U_n$ .

Для заземления нейтрали сети 6 – 10кВ через резистор величиной 500Ом и мощностью 75кВт с принудительным отводом тепла, что позволило эксплуатировать данный резистор в режиме ОЗЗ более двух часов.

Внешний вид резистора показан на рис.12.

Использование указанного резистора в сетях 6 – 10кВ позволило наложить на ток ОЗЗ добавочный активный ток в результате чего коэффициент правильных действий двухступенчатой токовой системы защиты вырос до 95%, в первую очередь за счет снижения не селективных (ложных) отключений неповрежденных линий в режиме ОЗЗ.

Таким образом, заземление нейтрали через резистор величиной 500Ом и использование RC – ограничителей, подключенных к зажима электродвигателей, позволяет эффективно ограничивать КП и перенапряжения в режиме ОЗЗ и добиться селективной работы токовых защит от ОЗЗ, что приводит к снижению числа ОЗЗ в сетях 6 – 10кВ.

Указанный комплексный подход к снижению числа ОЗЗ в сетях 10кВ был реализован на ОАО “АГК”. Это позволило снизить число ОЗЗ в 2006г по сравнению с 2003г в 4,4раз. Экономический эффект от внедрения указанной системы составил 11762118,6 рублей.

Разработанная конструкция и параметры универсального RC – ограничителя (RC – 6,6 – 0,25/50) и резистора (УДАТ – 10,5/500/75) выпускаются в промышленных объемах предприятием ООО “Рутас” и запатентованы в виде полезных моделей.

В настоящее время RC – ограничителей типа RC – 6,6 – 0,25/50 выпущено около 1000шт, которые установлены для защиты электрооборудования на таких предприятиях, как ОАО “АГК”, ОАО “АНПЗ”, ООО “Красноярский цемент”, ФГУП “ГХК”, на угольных разрезах Красноярского края: “Березовский – 1”; “Бородинский”; “Переясловский” и Иркутской области (Мугунский, Сафроновский) и на разрезе “Междуреченский” Кемеровской области.

Выход из строя электродвигателей оснащенных данными RC – ограничителями не наблюдался, что указывает на их высокую эффективность.

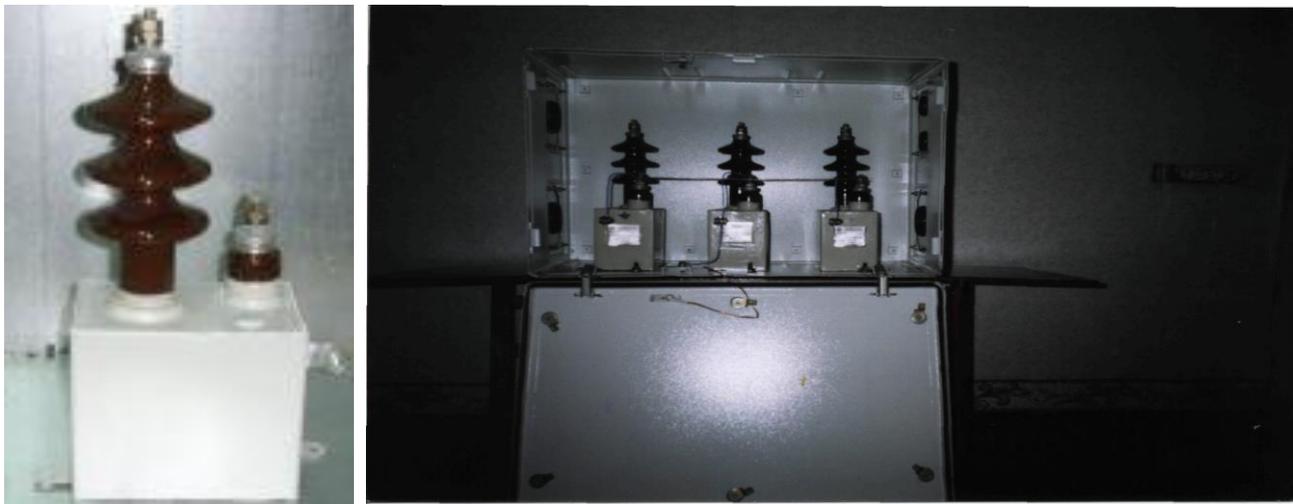


Рис.11 Внешний вид RC – ограничителя.

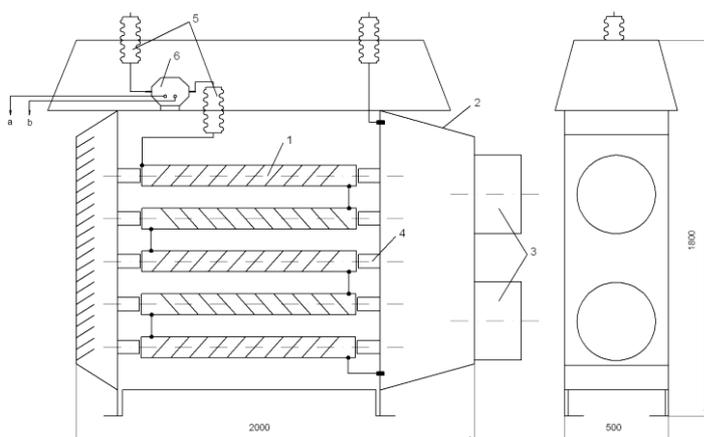


Рис. 12 Устройство для создания добавочного активного тока.

1. Базовый элемент; 2. Корпус; 3. Вентиляторы; 4. Опорный изолятор; 5. Проходной изолятор; 6. Трансформатор тока.

**В приложениях** приведены следующие материалы: результаты измерения КП в системе электроснабжения электродвигателей и их статистическая обработка; осциллограммы переходных процессов в режиме ОЗЗ; выводы уравнений с помощью которых проводились аналитические исследования КП в режиме ОЗЗ; фотографии разработанного RC – ограничителя и резистора; заключения и отзывы о работе RC – ограничителей; акты внедрения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Анализ эксплуатации распределительных сетей 6-10кВ 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, 6300кВт; 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 – 10кВ с изолированной нейтралью при емкостном токе ОЗЗ до 5А не превышает 2,1. Если величина тока ОЗЗ находится в диапазоне 5÷50А то кратность перенапряжения находится в пределе 2,2÷3,0. С увеличением емкостного тока свыше 50А 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, расстояние между местом ОЗЗ и электродвигателем. Установлено, что рост мощности электродвигателя, увеличение присоединенной емкости на зажимах электродвигателя, а так же 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 уровни 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 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 не поврежденной 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 коммутационных перенапряжений 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 10м.
12. Наложение добавочного активного тока величиной 12 и 10А на ток ОЗЗ соответственно в сетях напряжением 6кВ и 10кВ 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, является термически устойчивым и не дорогим, т.к. предусмотрен принудительный отвод тепла и выполнен из простых и дешевых материалов. Время работы устройства в режиме ОЗЗ при температуре окружающей среды  $40^\circ\text{C}$  составляет 12ч.
14. Комплексный подход к снижению ОЗЗ основанный на совместной работе устройства для создания добавочного активного тока и RC – ограничителей, подключенных к зажимам электродвигателя, 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 позволяет сократить число ОЗЗ в сетях 6-10кВ. Внедрение комплекса мер по снижению ОЗЗ на ГПП-2 ОАО “АГК” в период 2004-2005г позволило в 2005г снизить число ОЗЗ в 4,4 раза по сравнению с 2003, что указывает на эффективность разработанного метода.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Кузьмин Р.С. Трехфазные RC-ограничители и RC-гасители – область применения, конструкция, принцип действия и экономическая эффективность/ Лапаев И.И., Меньшиков В.С., Ожиганов А.Ю.// XII Федеральная научно-техническая конференция «Электрификация металлургических предприятий Сибири, прогнозирование параметров электропотребления и нормирования, реорганизации электроснабжения и ремонта в рамках I Сибирского энергетического форума, 2004г. г. Новокузнецк – С. 82 – 84.
2. Кузьмин Р.С. Основные результаты исследования коммутационных перенапряжений в сетях 6-10кВ металлургических, горных и горно-перерабатывающих предприятий/ Меньшиков В.С., Ожиганов А.Ю.// XII Федеральная научно-техническая конференция «Электрификация металлургических предприятий Сибири, прогнозирование

- параметров электропотребления и нормирования, реорганизации электроснабжения и ремонта в рамках I Сибирского энергетического форума, 2004г. г. Новокузнецк – С. 79 – 82.
3. Кузьмин Р.С. Устройство для защиты электрооборудования от перенапряжений/ Береснев В.В., Кузьмин С.В., Струков А.А. Патент на полезную модель № 44008 от 10 февраля 2005г.
  4. Кузьмин Р.С. Влияние внутренних перенапряжений в узлах нагрузки горно – перерабатывающих предприятий на ресурсосберегающие технологии при добыче и переработке полезных ископаемых/ Меньшиков В.А.,// Перспективные материалы: получение и технологии обработки: Сборник материалов Всероссийской научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – ГОУ ВПО “ГУЦМиЗ”. – Красноярск, 2004. – С. 231 – 232.
  5. Кузьмин Р.С. Трехфазные RC-ограничители и RC-гасители – область применения и экономическая эффективность/ Лапаев И.И., Кузьмин С.В., Меньшиков В.А. Ожиганов А.Ю.// «Электрика» № 4, 2005г. г. Москва. – С. 28 – 32.
  6. Кузьмин Р.С. RC-ограничители и RC-гасители – устройства глубокого ограничения коммутационных перенапряжений в сетях 6-10кВ/ Гончаров А.Ф., Павлов В.В., Меньшиков В.С., Ожиганов А.Ю.// Научно-аналитический и производственный журнал «Горное оборудование и электромеханика» № 3, 2005г., г. Санкт-Петербург. – С. 38 – 40.
  7. Кузьмин Р.С. Меры по предотвращению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10кВ и повышению селективности отключений на горных предприятиях Сибири/ Меньшиков В.С., Лапаев И.И., Павлов В.В.// Научно-аналитический и производственный журнал «Горное оборудование и электромеханика» № 3, 2005г., г. Санкт-Петербург. – С. 41 – 42.
  8. Кузьмин Р.С. Пути повышения надежности систем электроснабжения напряжением 6-10кВ на предприятиях РУСАЛ/ Береснев В.В., Суров В.И., Дубин В.Е., Северин В.И.// «Технико-экономический вестник РУСАЛ» март 2006г. № 14 - С.32-37.
  9. Кузьмин Р.С. Устройство заземления нейтрали/ Береснев В.В., Кузьмин С.В., Струков А.А.// Патент на полезную модель № 54252 от 10 июня 2006г.
  10. Кузьмин Р.С. Влияние длины кабельной линии на коммутационные перенапряжения высоковольтных электродвигателей и трансформаторов/ Меньшиков В.С., Ковалева О.А.// Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: материалы международной научно-практической конференции/ под ред. В.В.Кравцова; ГОУ ВПО «Гос.университет цвет.металлов и золота» - Красноярск, 2006г.-399 с.
  11. Кузьмин Р.С. Проблемы перенапряжений при использовании вакуумных коммутационных аппаратов/ Майнагашев Р.А., Заварькин Б.С., Краснова И.В.// Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: материалы международной научно-практической конференции/ под ред. В.В.Кравцова; ГОУ ВПО «Гос.университет цвет.металлов и золота» - Красноярск, 2006г.-399 с.
  12. Кузьмин Р.С. Рационализация мест установки устройств, снижающих коммутационные перенапряжения/ Меньшиков В.С., Павлов В.В., Соломенцев В.И.// Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: материалы международной научно-практической конференции/ под ред. В.В.Кравцова; ГОУ ВПО «Гос.университет цвет.металлов и золота» - Красноярск, 2006г.-399 с.