

На правах рукописи

Меньшиков Виталий Алексеевич

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6(10) кВ И  
РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ И СРЕДСТВ ПО ИХ ОГРАНИЧЕНИЮ**

Специальность: 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Автореферат 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,  
Кузьмин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
Яковлев Вениамин Николаевич

кандидат технических наук, доцент  
Кожухов Владимир Афанасьевич

Ведущее предприятие Сибирский государственный  
индустриальный университет  
(СибГИУ), г. Новокузнецк

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.098.05 в Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г224

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, КГТУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.098.05; факс +7(3912) 43-06-92 (для кафедры ТЭС); e-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан «27» ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Бойко Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Основным элементом системы электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий являются распределительные подстанции. В настоящее время происходит их широкая модернизация, в первую очередь, за счет замены масляных выключателей на вакуумные. Повсеместное внедрение вакуумных выключателей привело к тому, что участились случаи пробоев изоляции трансформаторов собственных нужд, измерительных трансформаторов напряжения, а также наблюдаются пробой опорных изоляторов и перекрытия вводов выключателей. Выход из строя электрооборудования подстанций, как правило, приводит к отключению электропотребителей, то есть к простоем технологического оборудования, к недоставке продукции и, как следствие, к экономическому ущербу. Очевидно, что широкое внедрение вакуумно-коммутационной аппаратуры обострило проблему, связанную с коммутационными перенапряжениями (КП), возникающими в узлах электрических нагрузок (УЭН). Следовательно, ограничение КП в УЭН является актуальной задачей. Решение данной задачи позволит повысить эффективность системы электроснабжения промышленных предприятий, что приведет к снижению времени простоя технологического оборудования, связанного с перерывами в электроснабжении, тем самым, к определенному экономическому эффекту.

**Цель работы:** разработка методов и средств эффективного ограничения КП в УЭН систем электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6-10 кВ. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ аварийности электрооборудования распределительных подстанций, связанной с возникновением КП в УЭН и анализ состояния исследований КП в данной области.
2. Определение наиболее опасных режимов эксплуатации распределительных устройств, которые приводят к возникновению высоких уровней КП.
3. Аналитические исследования КП в УЭН, позволившие установить основополагающие факторы, влияющие на величину и характер КП.

4. Разработка эффективных мероприятий и средств ограничения КП в УЭН.

**Объект исследования.** Распределительные подстанции напряжением 6 – 10 кВ промышленных предприятий и соответствующие сети с различными режимами нейтрали сети.

**Предмет исследования:** КП в УЭН систем электроснабжения напряжением 6 – 10 кВ промышленных предприятий.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории электрических цепей, теории систем электроснабжения электротехнических комплексов, численные методы решения уравнений при моделировании переходных процессов в электрических схемах замещения с помощью программного обеспечения MathCAD.

В экспериментальных исследованиях применялся метод измерения КП в УЭН.

**Научная новизна работы:**

1. Выявлены факторы, позволяющие определять КП в УЭН в зависимости от КП, возникающих на зажимах отдельных потребителей (электрические двигатели, трансформаторы), подключенных к УЭН в безаварийном режиме.

2. Установлены основные факторы: режим заземления нейтрали сети, величина тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), характер нагрузки, угол среза тока в вакуумной камере выключателя, позволяющие определять уровень КП, возникающих в УЭН, в режиме ОЗЗ.

3. Установлены предельно допустимые кратности КП для УЭН электроустановок напряжением 6 – 10 кВ, позволяющие обосновать необходимость использования средств защиты от КП в УЭН.

4. Определен принцип эффективного ограничения КП в УЭН сети с компенсированной нейтралью, основанный на сочетании заземления нейтрали сети через резистор и использовании РС – ограничителя.

**Практическая ценность работы:**

1. Разработана методика оценки КП в УЭН в зависимости от типа и мощности нагрузки, типа коммутационного аппарата, длины и сечения кабельной линии, связывающей нагрузку с УЭН, которая может быть использована на стадии проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий.

2. Получены аналитические выражения для определения величины КП в УЭН в режиме ОЗЗ в зависимости от режима нейтрали сети, характера нагрузки, величины тока ОЗЗ и тока среза в вакуумной камере выключателя, которые могут быть использованы для оценки эффективности средств защиты от КП.

3. Разработаны рекомендации по эффективному ограничению КП в УЭН для сетей с компенсированной нейтралью, основанные на совместном использовании заземления нейтрали сети через резистор и РС – ограничителя.

4. Разработаны параметры и конструкция РС – ограничителя, предназначенного для эффективного ограничения КП в УЭН для сетей с комбинированным режимом нейтрали, использование которого позволит ограничивать кратности КП в УЭН до допустимых значений.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных результатов, положительным опытом эксплуатации распределительных подстанций ОАО «Ачинский глиноземный комбинат» и распределительных подстанций ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод», где внедрены методы и средства по эффективному ограничению КП в УЭН.

**Автор защищает:**

1. Установленные зависимости уровней КП в УЭН от режимов заземления нейтрали сети, характера нагрузки, величины тока однофазного замыкания на землю и тока среза в вакуумной камере выключателя.

2. Установленные предельно допустимые значения КП в УЭН напряжением 6–10 кВ, не приводящие к аварийным режимам.

3. Разработанную методику определения кратности КП в УЭН в зависимости от параметров схемы электроснабжения и отдельных электропотребителей в случае отключения УЭН от источника питания.

4. Предложенный способ эффективного ограничения КП в УЭН сетей 6 – 10 кВ с компенсированной нейтралью, предполагающий совместную эксплуатацию частичного заземления нейтрали сети через резистор и РС – ограничителей, подключенных к УЭН.

#### **Апробация работы.**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные материалы: получение и технологии обработки» (ГОУ ВПО ГУЦМиЗ, Красноярск, 2004 г.); международной научно-практической конференции «Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота» (ГОУ ВПО ГУЦМиЗ, Красноярск 2006 г.).

**Реализация полученных результатов.** Разработанная конструкция РС – ограничителя, предназначенного для ограничения КП в УЭН, принята к внедрению в ООО «Рутас» и выпускается в виде серийных ограничителей типа РС 10,5 – 0,5/18 –УХЛ2.

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке специалистов по электротехническим специальностям в ГОУ ВПО ГУЦМиЗ.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ, из которых: 2 статьи в периодическом издании по списку ВАК; 2 статьи в периодических изданиях; 4 работы в трудах международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 79 наименований и 12 приложений. Основной текст диссертационной работы изложен на 155 страницах, проиллюстрирован 60 рисунками и 59 таблицами, приложения представлены на 39 страницах графиками и таблицами.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цели работы и ее основные задачи. Показаны научная новизна и практическая ценность выполненных исследований, изложена структура работы.

**Первый раздел** посвящен анализу повреждаемости электрооборудования распределительных подстанций напряжением 6 – 10 кВ, анализу состояния исследований КП, возникающих в УЭН.

Анализ аварийности высоковольтного оборудования подстанций, выполненный на примере предприятий ОАО «Ачинский глиноземный комбинат», ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «Красноярский алюминиевый завод», ОАО «Братский алюминиевый завод», показал, что при групповом отключении нагрузки от секции шин 77% всех случаев выхода из строя электрооборудования, наблюдалось в режиме ОЗЗ. Около 20% выхода из строя электрооборудования подстанций наблюдалось при срабатывании автоматического включения резерва (АВР). В 3% случаев причина выхода из строя высоковольтного электрооборудования не была установлена.

Одна из основных причин выхода из строя высоковольтного электрооборудования – КП, которые возникают в УЭН при групповом отключении нагрузки от секции шин.

Работы по исследованию КП, возникающих в УЭН, в основном, затрагивают задачи, связанные с влиянием на данный процесс отключения отдельных потребителей.

Доказано, что если от узла электрической нагрузки отключается длинная линия, емкость которой составляет 80% от суммарной емкости узла электрической нагрузки, то возможно появление перенапряжений величиной  $(2,8-3,1)U_{\text{нф}}$ .

Для более детального изучения КП, возникающих в УЭН, необходимо исследовать такие режимы, как групповое отключение нагрузки от УЭН в режиме ОЗЗ и отключение секции шин от источника питания в результате срабаты-

ния вводного выключателя.

**Во втором разделе** приведены результаты измерений КП в УЭН сети 6(10) кВ с компенсированной нейтралью в безаварийном режиме и в режиме ОЗЗ в случае группового отключения потребителей от УЭН. Разработана инженерная методика расчета КП, возникающих в УЭН.

Анализ результатов экспериментальных измерений КП в УЭН сетей 6 – 10 кВ в безаварийном режиме при срабатывании вводного выключателя показал:

1. При использования в качестве вводного масляного выключателя максимальная кратность КП может достигать  $3,4U_{\text{НОМ}}$  на отдельном электроприемнике и  $2,1U_{\text{НОМ}}$  на секциях шин, если нагрузка двигательная. При трансформаторной нагрузке кратность КП на отдельном электроприемнике не превышает  $1,2U_{\text{НОМ}}$ , а на секциях шин –  $0,6U_{\text{НОМ}}$ . При смешанной нагрузке кратность КП на секциях шин не будет превышать значения  $1,6U_{\text{НОМ}}$ .

2. При использовании вакуумного выключателя в роли вводного характер КП меняется в сторону увеличения кратности перенапряжений. Так, при двигательной нагрузке КП на отдельных электроприемниках могут достигать  $7U_{\text{НОМ}}$ , а на секциях шин –  $4,7U_{\text{НОМ}}$ . При трансформаторной нагрузке на секциях шин могут возникать КП, не превышающие  $1,5U_{\text{НОМ}}$ , а при смешанной нагрузке –  $4,2U_{\text{НОМ}}$ .

Групповое отключение нагрузки от секции шин возможно в случаях:

1. В результате неселективной работы защит от ОЗЗ, когда при возникновении ОЗЗ на одной из линий отключаются неповрежденные линии, а линия с ОЗЗ отключается последней.

2. В результате действий оперативного персонала.

Экспериментальные измерения, выполненные на ОАО «АГК» и ОАО «АНПЗ» показали, что кратность КП в УЭН в режиме группового отключения нагрузки от секции шин может превышать номинальное напряжение сети в 8 – 9 раз. В системах электроснабжения данных предприятий для заземления нейтрали используются дугогасящие реакторы типа РЗДСОМ-380 квар. Дугога-



сящий реактор (ДГР) имеет пять отпайек. На I отпайке создает индуктивный ток величиной 25,5 А. На II, III, IV, V отпайках ДГР, соответственно, создает следующие индуктивные токи: 33,5 А, 40 А, 46,5 А и 52 А.

На основании результатов экспериментальных измерений разработана эффективная методика определения КП в УЭН в безаварийном режиме работы. Данная методика позволяет оценить уровень КП, возникающих на секциях шин в точке  $K_0$ , зная максимальные кратности перенапряжений в точках  $K_{2\max i}$ , параметры электроприемников и питающих линий.

Кратность КП в УЭН определяется в зависимости от типа кабельной линии по следующим выражениям

– для масляных выключателей;

$$K_{0M} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i^2)^2 / n \right]^{1/2} \quad (1)$$

– для вакуумных выключателей при двигательной нагрузке;

$$K_{0ВД} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i)^2 / n \right]^{1/2} \quad (2)$$

– для вакуумных выключателей при трансформаторной нагрузке;

$$K_{0ВТ} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i^2)^2 / n \right]^{1/2} \quad (3)$$

– для вакуумных выключателей при смешанной нагрузке.

$$K_{0В} = (K_{0ВД}^2 + K_{0ВТ}^2)^{1/2} \quad (4)$$

Если в УЭН эксплуатируются одновременно МВ и ВВ, то кратность КП в УЭН определяется по выражению

$$K_0 = (K_{0В}^2 + K_{0М}^2)^{1/2} \quad (5)$$

В выражениях (1) ÷ (5)  $K_{(2)\max i}$  – максимальные кратности перенапряжений, определяемые по табл. 1,2.,  $K_i$  – коэффициент, зависящий от длины и сечения кабельной линии, связывающей электроприемник и УЭН:

$$K_i = 1 + L \cdot (0,03475 \cdot S + 3,133) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где  $L$  – длина кабельной линии, м;  $S$  – сечение кабельной линии.

В табл. 1 приведены максимальные кратности перенапряжений на зажимах электродвигателей в зависимости от их мощности, а также типа коммутационного аппарата.

Таблица 1 – Максимальная кратность КП на зажимах двигателей

$P_{дв}$ , кВт	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
МВ	4,8	4,6	4,5	4,4	4,2	4,0	3,9	3,6	3,3	3,0	2,7	2,9	2,1
ВВ	7,0	6,8	6,4	6,2	6,0	5,7	5,5	5,2	4,6	4,2	3,7	3,3	3,2

МВ – масляный выключатель; ВВ – вакуумный выключатель.

В табл. 2 приведены максимальные кратности перенапряжений на зажимах трансформаторов в зависимости от их мощности, а также типа коммутационного аппарата.

Таблица 2 – Максимальная кратность КП на зажимах трансформаторов

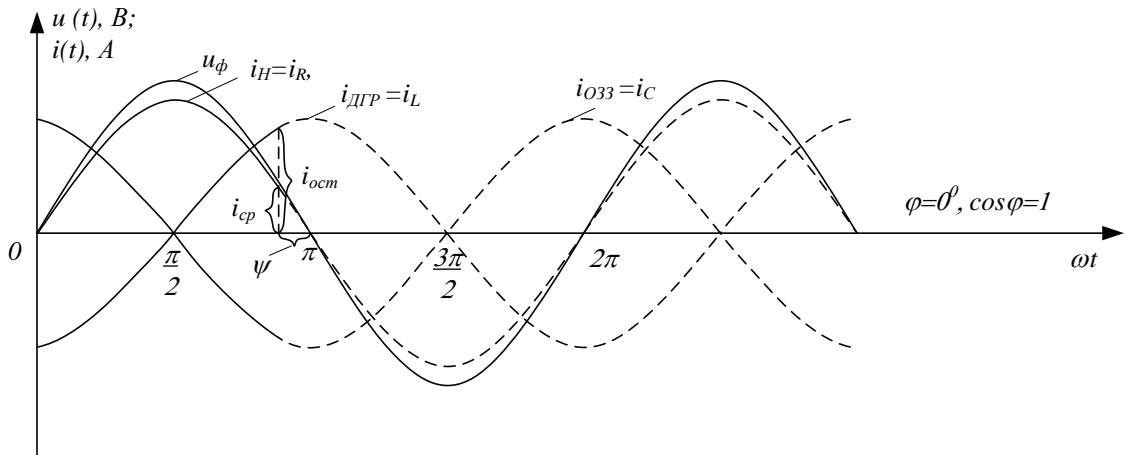
$S_{дв}$ , кВА	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
МВ	3,5	3,0	2,5	1,8	1,7	1,6	1,5	1,45
ВВ	5,7	5,1	4,5	3,9	3,7	3,4	3,1	2,6

Анализ экспериментальных данных показал, что погрешность между измеренными данными кратности КП в УЭН и расчетными данными кратности КП не превышает 17%.

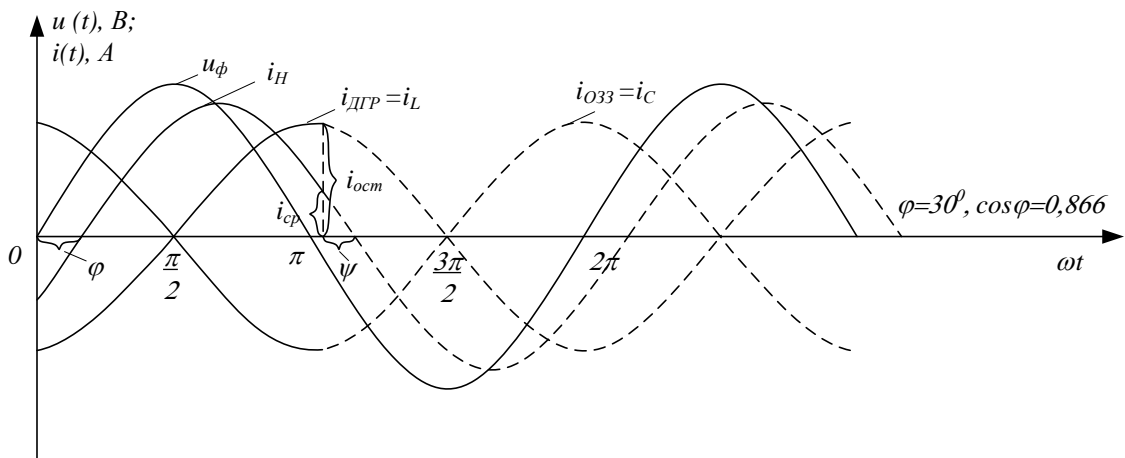
**Третий раздел** посвящен аналитическим исследованиям КП, возникающих в УЭН для различных режимов заземления нейтрали.

Сеть в режиме ОЗЗ находится в режиме резонанса токов, т.е. разбалансировка ДГР отсутствует. Отключение нагрузки производится вакуумным выключателем. Срез тока в вакуумной камере выключателя приводит к появлению остаточного тока в ДГР. Величина этого тока зависит от характера нагрузки, то есть от коэффициента мощности нагрузки ( $\cos\varphi$ ) и от угла среза тока в вакуумной камере выключателя –  $\psi$ . Данный процесс иллюстрируется с помощью графиков (рис. 1).

а)



б)



в)

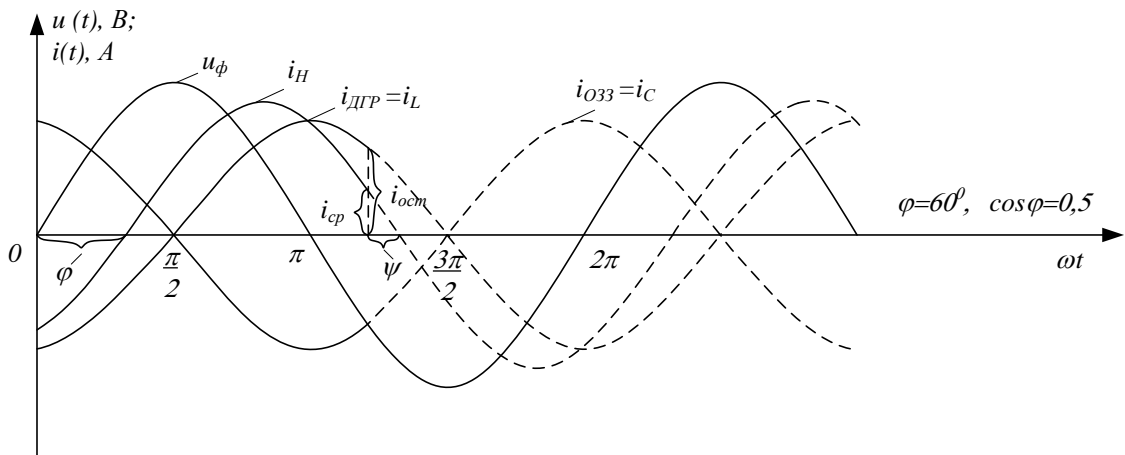


Рисунок 1 – Процесс появления остаточного тока в обмотке ДГР после группового отключения нагрузки вакуумным выключателем:  $u_\phi$  – фазное напряжение,  $i_H$  – ток нагрузки,  $i_L$  – ток дугогасящего реактора,  $i_{O33}$  – ток однофазного замыкания на землю,  $i_{cp}$  – ток среза в вакуумной камере выключателя,  $i_{ост}$  – остаточный ток дугогасящего реактора,  $\psi$  – фаза отключения (угол среза),  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением

Мгновенное значение перенапряжений, возникающих на секциях шин, можно оценить с помощью выражений:

$$u_A = e_A - u_N, u_B = e_B - u_N, u_C = e_C - u_N, \quad (7)$$

где  $u_N$  – напряжение, возникающее на зажимах ДГР (напряжение смещения нейтрали) Это напряжение определяется следующим выражением:

$$u_N = i_{L.ост} \cdot \sqrt{L_{ДГР} / C_{с.ш.}}, \quad (8)$$

где  $i_{L.ост}$  – остаточный ток в дугогасящем реакторе,  $L_{ДГР}$  – индуктивность реактора,  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин по отношению к земле.

Установлено, что максимальное значение остаточного тока в ДГР будет возникать, если коэффициент мощности нагрузки изменится от 1 до 0,866, то есть  $\varphi$  будет изменяться, соответственно, от 0 до  $30^\circ$ . Следовательно, при отключении нагрузки с указанным коэффициентом мощности могут возникать максимальные перенапряжения.

Для более детального изучения влияния указанных факторов на величину перенапряжений в УЭН выполнено математическое моделирование переходного процесса возникновения данных перенапряжений.

При математическом моделировании процесса группового отключения нагрузки от секции шин схема замещения УЭН с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид (рис. 2):

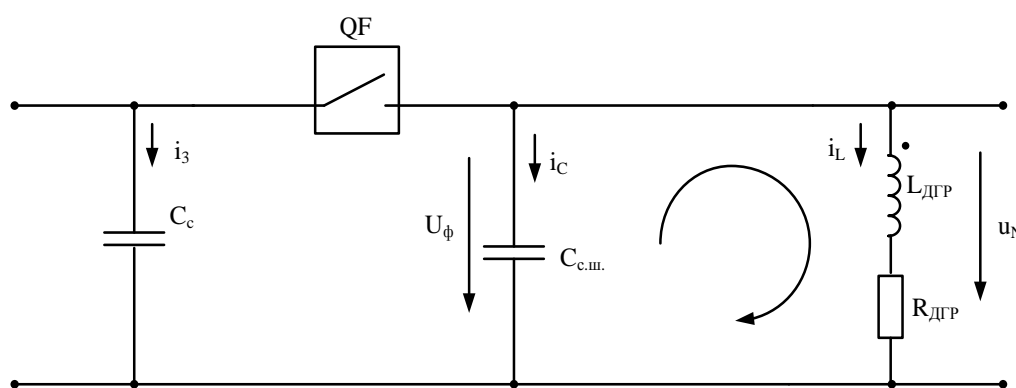


Рисунок 2 – Схема замещения УЭН с компенсированной нейтралью:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора,  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сети с компенсированной нейтралью, в результате группового отключения нагрузки описываются следующим уравнением

$$u_{N_{св}}(t) = \frac{U_{мф} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta \cdot t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \text{arcctg} \left[ \frac{-(i_{ост} - U_{мф} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{с.ш.})}{C_{с.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{мф} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \right\} \quad (9)$$

где  $U_{мф} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) = u(0_+)$  – напряжение на зажимах реактора в момент коммутации;  $i_{ост} = I_{мДГР} \cdot \sin(\pi/2 - \psi + \varphi)$  – остаточный ток в дугогасящем реакторе;  $\nu$  – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий;  $\delta$  – коэффициент затухания;  $\omega_0$  – угловая частота свободных колебаний;  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин по отношению к земле.

Результаты математического моделирования показали, что если угол среза  $\psi = 10^0$ , то максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^0$  на V отпайке ДГР, кратность КП на секциях шин в данных условиях может достигать 11,89. Если угол среза  $\psi = 20^0$ , то максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 30^0$  на V отпайке ДГР. Кратность КП на зажимах ДГР и секциях шин при этом может достигать 10,6; 11,89 соответственно (рис. 3,4).

Это можно объяснить тем, что на практике в нормальном рабочем режиме к секциям шин РП, РУ, ТП, ГПП подключены, в основном, трансформаторы и высоковольтные электрические машины. Загрузка данных электроприемников такова, что они работают с  $\cos \varphi \approx 0,7 - 0,9$ , то есть угол  $\varphi \approx 30^0$ . На I, II, III и IV отпайках при угле среза  $\psi = 20^0$  максимальная кратность перенапряжения на секциях шин соответственно составляет 8,74; 9,62; 10,48; 11,46. С уменьшением индуктивного сопротивления реактора частота коммутационного импульса  $f_{к.и.}$  возрастает с 500 до 684 Гц, а время переходного процесса уменьшается, так как коэффициент затухания  $\delta$  увеличивается. При угле сдвига фаз  $\varphi = 60^0$  ( $\cos \varphi = 0,5$ ) максимальная кратность КП составляет 9,43. Данный режим на практике

встречается достаточно редко, но результаты теоретических исследований необходимо принимать во внимание. Частота коммутационного импульса и время переходного процесса практически не зависят от угла сдвига фаз.

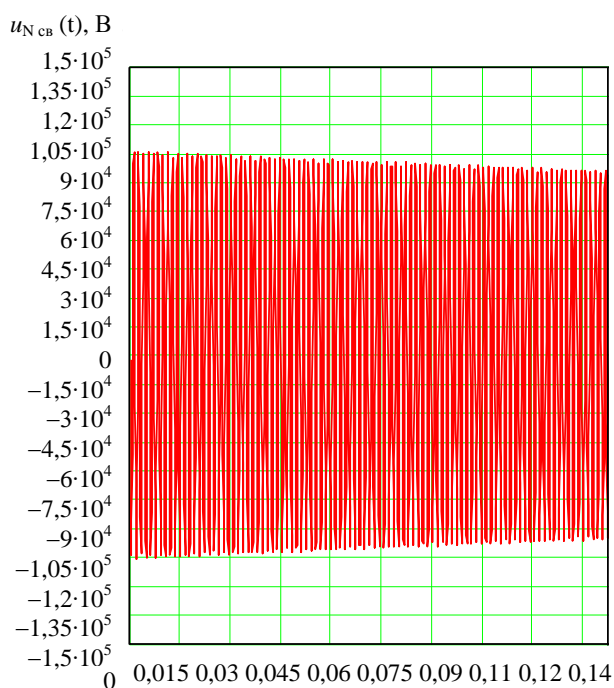


Рисунок 3 – Перенапряжения на ДГР ( $\psi=20^{\circ}$ ,  $\varphi=30^{\circ}$ ,  $I_{дгр}=52$  А)

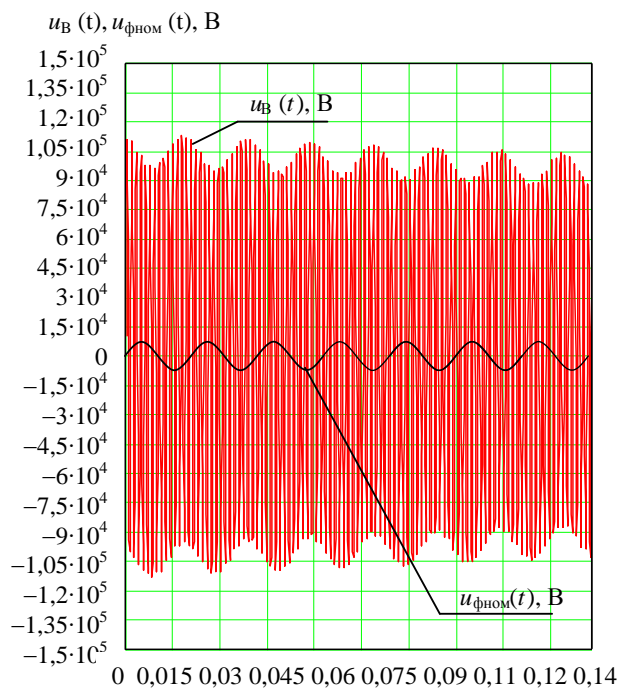


Рисунок 4 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi=20^{\circ}$ ,  $\varphi=30^{\circ}$ ,  $I_{дгр}=52$  А)

В настоящее время для ограничения перенапряжений в режиме ОЗЗ используют частичное заземление нейтрали сети через резистор, который в сетях с компенсированной нейтралью подключается параллельно дугогасящему реактору, а в сетях с изолированной нейтралью включается между искусственной нейтральной точкой сети и контуром заземления. Кроме того, для ограничения КП на отдельных потребителях используются РС – ограничители. Также имеется небольшой практический опыт использования существующих РС – ограничителей для ограничения КП в УЭН. При использовании частичного заземления нейтрали через резистор и применении РС – ограничителей схема замещения УЭН в случае группового отключения нагрузки в режиме ОЗЗ, имеет вид (рис. 5).

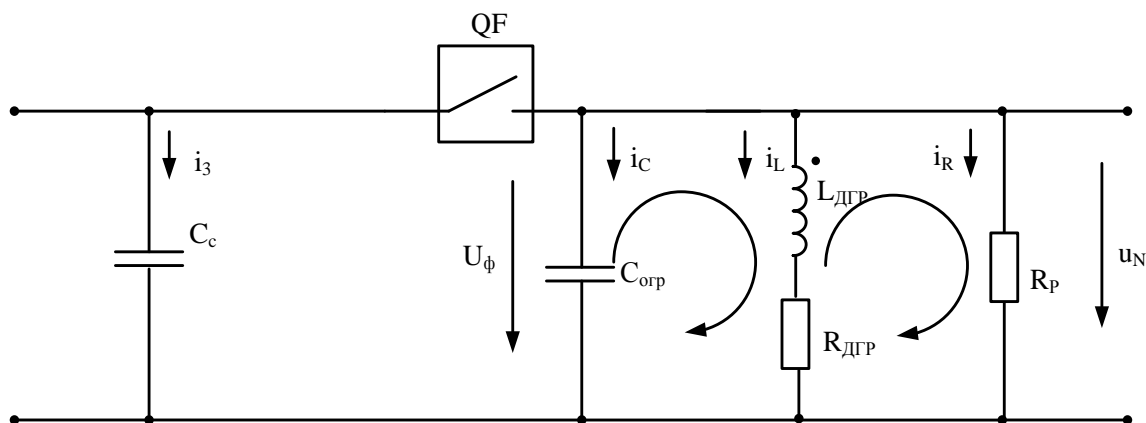


Рисунок 5 – Схема замещения УЭН с комбинированной нейтралью:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дгр;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление ДГР;  $R_p$  – активное сопротивление резистора;  $C_{огр.}$  – емкость RC – ограничителя;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сетей с нейтралью частично заземленной через резистор с добавлением RC – ограничителя в результате группового отключения нагрузки, описываются следующим уравнением

$$u_{N_{св}}(t) = \frac{U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \text{arcctg} \left[ -\frac{(i_{осм} \cdot R_p + U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{огр} \cdot \omega_0 \cdot U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} + \frac{\delta}{\omega_0} \right] \right\} \quad (10)$$

Расчет перенапряжений, возникающих на секциях шин сети с нейтралью частично заземленной через резистор, включенный параллельно ДГР, выполнен на примере ДГР типа РЗДСОМ-380 квар, резистора с активным сопротивлением: 5000, 2500, 1000, 500, 200 Ом и RC – ограничителя с емкостью  $C_{огр} = 3 \cdot C_{Ф} = 3 \cdot 0,5 = 1,5$  мкФ.

Результаты математического моделирования показали, что максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^0$  на V отпайке ДГР, при использовании резистора в нейтрали сети сопротивлением 5000 Ом. Кратность КП на секциях шин в данных условиях достигает 3,79. При включении резистора с сопротивлением 500 Ом перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин снижаются до 19224 и 25514 В соответственно (рис. 6, 7).

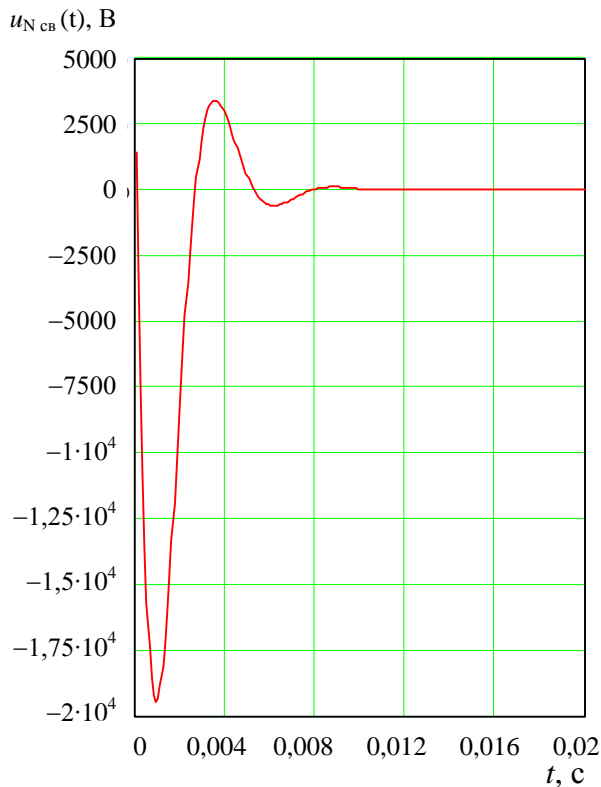


Рисунок 6 – Перенапряжения на ДГР ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{огр} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом)

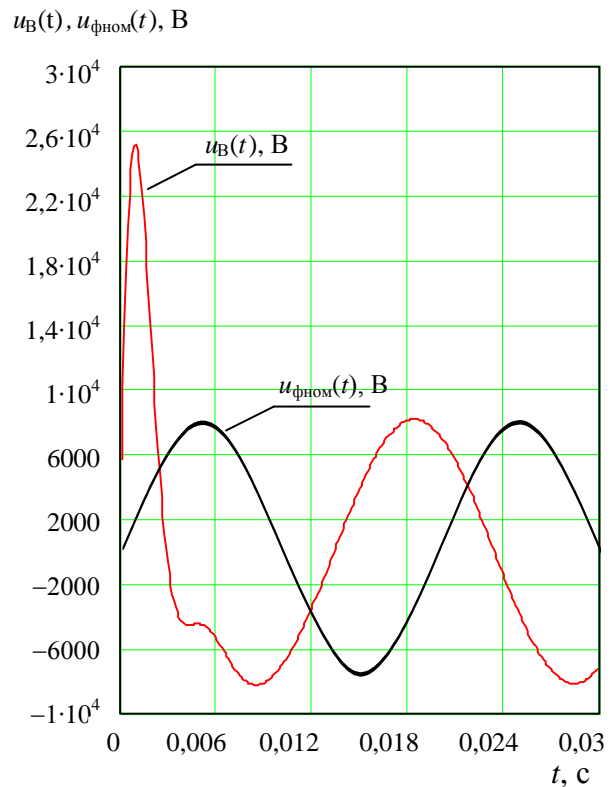


Рисунок 7 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{огр} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом)

Рассмотренный вариант является наиболее благоприятным для электрооборудования, находящегося в непосредственной близости от УЭН, так как кратность перенапряжения снижается с 11,89 до 2,55. Таким образом, при использовании РС – ограничителя с емкостью  $C_{огр} = 3 \cdot C_{\phi} = 3 \cdot 0,5 = 1,5$  мкФ и резистора 500 Ом КП снижаются до 2,5 кратного значения.

Результат математического моделирования переходных процессов в узлах электрических нагрузок для сетей с изолированной нейтралью показал, что кратность КП на секциях шин не превышает 1,45. Однако на высоковольтных обмотках трансформатора напряжения возникают биения напряжения, при которых значение амплитуды напряжений может колебаться от  $0,2U_{ном}$  до  $1,45U_{ном}$  на отдельных фазах (рис. 8). Аналогичные биения длительностью более 1 с будут наблюдаться на секциях шин подстанций и на высоковольтных обмотках трансформатора собственных нужд подстанции. Это в ряде случаев может привести к негативным последствиям, таким как: ложное срабатывание защиты,



необоснованное отключение цепей управления на самой подстанции. При заземлении нейтрали сети через резисторы величиной  $500 \div 5000$  Ом биения исчезают.

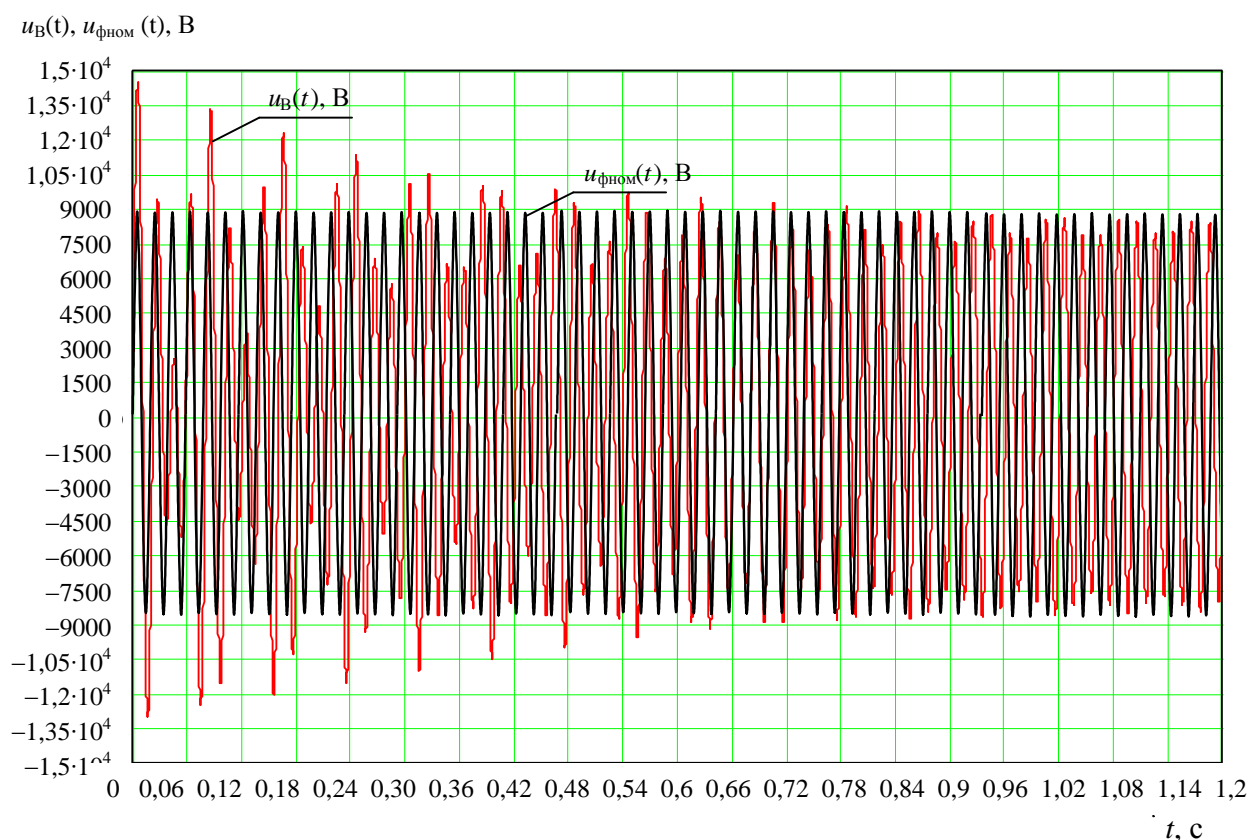


Рисунок 8 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{\text{тр}} = 15 \text{ А}$ )

**В четвертом разделе** проведено обоснование допустимой кратности КП в УЭН, сделан сравнительный анализ КП, возникающих в УЭН с допустимой кратностью перенапряжения, разработаны рекомендации по эффективному ограничению КП в УЭН, определены параметры РС – ограничителя, предназначенного для установки в УЭН.

Установлено, что для электрооборудования подстанций напряжением 6(10) кВ допустимые уровни перенапряжений с учетом действия защит по ограничению перенапряжений не должны превышать 19,6 кВ для сетей 6 кВ и 28 кВ для сетей 10 кВ. Соответственно, допустимый коэффициент кратности перенапряжений для электрооборудования напряжением 6 кВ будет составлять 3,2, а для сетей 10 кВ – 2,8.

В сети с изолированной нейтралью с токами ОЗЗ до 20 А КП не превышают 1,42, что ниже допустимого значения, то защита от КП не требуется.

В сети с компенсированной нейтралью для эффективного ограничения КП в УЭН, в случае группового отключения нагрузки, необходимо параллельно ДГР подключить резистор сопротивлением 500 Ом. Исходя из величины компенсируемого тока ОЗЗ, на секции шин необходимо устанавливать РС – ограничители, количество и параметры которых указаны в табл. 3

Таблица 3 – Количество и параметры РС – ограничителей для эффективного ограничения КП в УЭН

№ варианта	Емкостной ток ОЗЗ сети, А	Величина резистора	Параметры РС- ограничителей
1	2	3	4
1	26,5	500	-
2	33,5	500	-
3	40	500	$C_{огр} = 0,25$ мкФ, $R_{огр} = 50$ Ом – стандартный РС- ограничитель (РС-10.5-0.25/50)
4	46,5	500	$C_{огр} = 0,25$ мкФ, $R_{огр} = 50$ Ом – стандартный РС- ограничитель (РС-10.5-0.25/50)
5	52	500	$C_{огр} = 0,5$ мкФ, $R_{огр} = 18$ Ом
			2 стандартных ограничителя (РС-10.5-0.25/50)

Конструкция и параметры разработанного параметра РС – ограничителя, предназначенного для ограничения КП в УЭН, приняты к внедрению на предприятии ООО «РУТАС» и выпускаются в виде устройства РС – 10,5 – 0,5/18 – УХЛ2.

На фотографиях (рис. 9, 10) показаны выкатная тележка с РС – ограничителями и ячейка распределительного устройства с РС – ограничителями, подключенными к секциям шин.



Рисунок 9 – Ячейка РУ с  
РС – ограничителем



Рисунок 10 – Выкатная тележка с  
РС-ограничителем

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Анализ аварийности электрооборудования распределительных подстанций показал, что наиболее повреждаемыми элементами данных подстанций являются: измерительные трансформаторы напряжения, трансформаторы собственных нужд и концевые кабельные муфты. Основной причиной пробоя изоляции данных элементов распределительных подстанций являются КП в УЭН – это связано с широким внедрением вакуумных выключателей.

2. Установлено, что допустимый уровень КП для электрооборудования распределительных подстанций напряжением 6 кВ и 10 кВ соответственно составляет  $3,2U_{\text{ном}}$  и  $2,8U_{\text{ном}}$ . Эксперименты показали, что КП могут превышать допустимый уровень, при отключении секции шин распределительной подстанции вакуумным выключателем в безаварийном режиме, если характер

нагрузки двигательный или смешанный. В режиме ОЗЗ КП в УЭН могут превышать допустимый уровень при групповом отключении нагрузки.

3. На основании исследований установлено, что в безаварийном режиме основными факторами, влияющими на КП в УЭН являются: тип и мощность нагрузки, длина и сечение кабельных линий, тип коммутационного аппарата. Увеличение длины и сечения кабельных линий, а также рост мощности отдельных электроприемников, приводит к снижению уровней КП. В случае замены масляных выключателей на вакуумные, уровень КП в УЭН может возрасти в 2-2,5 раза.

4. Исследования показали, что в режиме ОЗЗ при групповом отключении нагрузки основными факторами, влияющими на величину КП в УЭН являются: режим нейтрали сети, тип коммутационного аппарата и величина емкостного тока ОЗЗ.

В сетях с изолированным режимом нейтрали уровень КП в УЭН не превышает значение  $1,45U_{\text{ном}}$ , защита от КП не требуется.

В сетях с компенсированным режимом нейтрали уровень КП зависит от угла среза тока в вакуумной камере выключателя, величины емкостного тока ОЗЗ, характера отключаемой нагрузки. Увеличение емкостного тока ОЗЗ приводит к росту уровня перенапряжений, который может изменяться от  $5,2U_{\text{ном}}$  до  $11,9U_{\text{ном}}$ , необходима защита от КП.

В сетях с комбинированным режимом нейтрали уровень КП в УЭН зависит от величины резистора, подключаемого к нейтральной точке сети, величины емкостного тока ОЗЗ и угла среза тока в вакуумной камере выключателя. При использовании резистора сопротивлением 500 Ом, уровень КП будет превышать допустимое значение, если емкостной ток ОЗЗ будет больше 40 А, в этом случае необходима защита от КП.

5. Для эффективного ограничения КП в УЭН для сетей с компенсированным режимом нейтрали необходимо параллельно ДГР данной сети включать резистор сопротивлением 500 Ом, если ток ОЗЗ не превышает 46 А, если емкостной ток ОЗЗ находится в пределах 46 – 52 А к УЭН необходимо подклю-

чить RC – ограничитель с параметрами  $C_{огр}=0,25$  мкФ,  $R_{огр}=50$  Ом. При дальнейшем увеличении емкостного тока ОЗЗ ( $I_{ОЗЗ} > 52$  А) RC – ограничитель должен иметь следующие параметры:  $C_{огр}=0,5$  мкФ,  $R_{огр}=18$  Ом. Конструкция данного RC – ограничителя разработана и выпускается в промышленном масштабе.

6. Разработана инженерная методика оценки КП в УЭН в зависимости от характера нагрузки, длины и сечения кабельной линии соединяющей и типа коммутационного аппарата.

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

1. Кузьмин, Р.С. Влияние надежности распределительных сетей 6 – 10 кВ металлургических предприятий на современный технологический процесс / Кузьмин Р.С. **Меньшиков В.А.** // Перспективные материалы: получение и технологии обработки: Сборник материалов Всероссийской научно-технологической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ», 2004, – С. 118 – 119.
2. Меньшиков, В.А. Влияние внутренних перенапряжений в узлах нагрузки горных и горно-перерабатывающих предприятий на ресурсосберегающие технологии при добыче и переработке полезных ископаемых / **Меньшиков В.А.**, Кузьмин Р.С. // Перспективные материалы: получение и технологии обработки: Сборник материалов Всероссийской научно-технологической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ», 2004, – С. 231 – 232.
3. Кузьмин, С.В. Некоторые аспекты коммутационных перенапряжений при использовании вакуумных выключателей / Кузьмин С.В., Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Зыков И.С., Дементьев В.В. и др. – Информационно-аналитический сборник ФГУ УГЭН по Енисейскому региону – «Энергонадзор», 2004. – №3. – С. 16–19.

4. Гончаров, А.Ф. RC – ограничители и RC – гасители – устройства глубокого ограничения коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ / Гончаров А.Ф., Кузьмин С.В., Павлов В.В., Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Ожиганов А.Ю. // Горное оборудование и электромеханика, 2005. – №3. – С.38 – 40.
5. Кузьмин, Р.С. Меры по предотвращению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и повышению селективности отключений на горных предприятиях Сибири / Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Лапаев И.И., Павлов В.В. // Горное оборудование и электромеханика, 2005. – №3. – С.41 – 42.
6. Кузьмин, С.В. Трехфазные RC-ограничители и RC-гасители. Область применения и экономическая эффективность / Кузьмин С.В., Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Лапаев И.И., Ожиганов А.Ю. // Электрика, 2005. – №4. – С. – 28 – 32.
7. Кузьмин, Р.С. Влияние длины кабельной линии на коммутационные перенапряжения высоковольтных электродвигателей и трансформаторов / Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Ковалева О.А., Кузьмин С.В. // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: Материалы международной научно-практической конференции. Под ред. В.В. Кравцова; ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ». Красноярск, – 2006. – С 283 – 287.
8. Кузьмин, Р.С. Рационализация мест установки устройств, снижающих коммутационные перенапряжения / Кузьмин Р.С., **Меньшиков В.А.**, Кузьмин С.В., Павлов В.В., Соломенцев В.М. // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: Материалы международной научно-практической конференции. Под ред. В.В. Кравцова; ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ». Красноярск, – 2006. – С 293 – 298.

Меньшиков Виталий Алексеевич

Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6(10) кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению

Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук

Подписано в печать 22.11.2006. Заказ № 538

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1 тираж 100 экз.

Типография Красноярского государственного технического университета