

Государственный университет цветных металлов и золота

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Красноярск 2006

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	11
1.1 Общие сведения .....	11
1.2 Анализ повреждаемости электрооборудования распределительных подстанций напряжением 6-10 кВ.....	13
1.3 Анализ состояния исследований коммутационных перенапряжений, возникающих в узлах электрических нагрузок .....	15
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ .....	18
2.1 Методические основы экспериментальных исследований и измерительная аппаратура .....	18
2.2 Экспериментальные измерения коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сетей 6-10 кВ в результате срабатывания вводного выключателя в безаварийном режиме .....	24
2.3 Методика оценки коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сетей 6-10 кВ в результате срабатывания вводного выключателя в безаварийном режиме .....	28
2.4 Экспериментальные измерения коммутационных перенапряжений в УЭН сетей с компенсированной нейтралью в режиме ОЗЗ в случае группового отключения нагрузки .....	35
Выводы по второй главе.....	41
3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ....	43
3.1 Общие сведения и методика исследований .....	43
3.2 Физические процессы, возникающие в УЭН сети с компенсированной нейтралью в случае группового отключения нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ.....	45

3.3 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сети с компенсированной нейтралью .....	51
3.4 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в УЭН сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор и частичным заземлением через резистор .....	63
3.5 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в УЭН сети с изолированной нейтралью .....	73
Выводы по третьей главе .....	79
<b>4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ОГРАНИЧЕНИЮ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК .....</b>	<b>81</b>
4.1 Обоснование допустимой кратности коммутационных перенапряжений в УЭН .....	82
4.2 Сравнительный анализ коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН, с допустимой кратностью перенапряжений .....	83
4.3 Выбор средств защиты от коммутационных перенапряжений в узлах электрических нагрузок .....	87
4.4 Влияние стандартных RC – ограничителей на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с компенсированной нейтралью .....	93
4.5 Влияние стандартных RC – ограничителей на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с комбинированной нейтралью .....	100
4.6 Влияние RC – ограничителей с емкостью $C_{огр}=0,5$ мкФ на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с комбинированной нейтралью .....	106
4.7 Влияние RC – ограничителя и резистора, предназначенного для заземления нейтрали сети, на характер биений напряжения в сетях с изолированной нейтралью .....	110

4.8 Расчет параметров RC – ограничителя, предназначенного для установки в узлах электрических нагрузок.....	122
4.9 Рекомендации по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в сетях с комбинированным заземлением нейтрали ...	126
4.9.1 Технические данные RC – ограничителя .....	131
4.9.2 Устройство RC-ограничителя .....	135
4.9.3 Размещение и монтаж .....	135
4.9.4 Указание мер безопасности .....	136
4.10 Расчет экономического эффекта при установке RC - ограничителя на секцию шин и резистора для заземления нейтрали сети сопротивлением 500 Ом .....	137
Выводы по четвертой главе .....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	142
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с компенсированной нейтралью .....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с компенсированной нейтралью.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Графики переходных процессов, возникающих на зажимах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с компенсированной нейтралью .....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с нейтралью, частично заземленной через резистор .....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, в случае отрицательных разных корней.....	167

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с нейтралью, частично заземленной через резистор .....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Графики переходных процессов, возникающих на зажимах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с нейтралью, частично заземленной через резистор .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с компенсированной нейтралью при использовании RC – ограничителей .....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Графики переходных процессов, возникающих на зажимах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с компенсированной нейтралью при использовании RC – ограничителя .....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, при использовании RC – ограничителя .....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Графики переходных процессов, возникающих на зажимах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, при использовании RC – ограничителя .....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Фотографии RC – ограничителей, выкатной тележки с RC – ограничителями, ячейки распределительного устройства с RC – ограничителями, подключенными к секциям шин, устройства добавочного активного тока (резистор сопротивлением 500 Ом).....	192

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

УЭН – узел электрических нагрузок;

КП – коммутационные перенапряжения;

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;

ОПН – нелинейный ограничитель перенапряжений;

НТМИ – измерительный трансформатор напряжения;

ТСН – трансформатор собственных нужд;

АВР – автоматическое включение резерва;

ГПП – главная понизительная подстанция;

ТП – трансформаторная подстанция;

РП – распределительная подстанция;

РУ – распределительное устройство;

ДГР – дугогасящий реактор.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** 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 простоям технологического оборудования, к недовыпуску 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, четырех 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.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Рассмотрен процесс возникновения коммутационных перенапряжений в узлах электрических нагрузок и его влияние на изоляцию высоковольтного электрооборудования распределительных подстанций. Обоснована актуальность проблемы ограничения коммутационных перенапряжений. Сформулированы задачи аналитических и экспериментальных исследований.*

### 1.1 Общие сведения

С широким внедрением вакуумно-коммутационной аппаратуры в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ повысился уровень коммутационных перенапряжений.

Вопросам исследования КП на зажимах индивидуальных потребителей посвящено значительное количество работ [3, 5, 7, 8, 11, 16, 19, 22, 55, 65, 66, 67]. Установлено, что на величину и характер КП, возникающих в системах электроснабжения отдельных потребителей, существенное влияние оказывают следующие факторы: тип и мощность нагрузки, тип коммутационного аппарата, длина и сечение кабельной линии, количество повторных зажигания дуги в коммутационном аппарате.

Авторами [19,75] установлено, что с ростом мощности электродвигателей и трансформаторов величина КП снижается. Например, максимальные кратности КП, зафиксированные для асинхронных электрических двигателей мощностью 315, 500, 1250, 2500 кВт, соответственно равны 4,8; 4,5; 3,6; 2,8. Для масляных трансформаторов мощностью 250, 400, 630, 1000, 1600 кВА зафиксированы максимальные кратности КП, которые составляют 3,0; 2,5; 2,1; 1,7; 1,5. [19,76]

Установлено, что в случае замены масляных выключателей на вакуумные уровень КП возрастает в  $1,5 \div 2,8$  раза. Доказано, что повторное зажигание дуги приводит к значительному росту КП на зажимах отдельных электроприемников

[9, 12, 72, 76, 78, 79].

В исследованиях [16, 37, 42] показано, что кабельная линия, связывающая электроприемник с коммутационным аппаратом, не всегда снижает величину КП, известно, что при частоте коммутационного импульса, превосходящей 45 кГц, кабельная линия способна запирает электромагнитную энергию, запасаемую в обмотках электрических двигателей и трансформаторов, и, тем самым, увеличивать уровень КП на зажимах последних. При частоте ниже 45 кГц кабельная линия снижает величину КП, возникающих на зажимах электрических двигателей и трансформаторов, вследствие увеличения присоединенной емкости [37].

В работах [23, 40, 68] рассмотрена возможность появления КП на зажимах электроприемников в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Установлено, что при неселективной работе защит от ОЗЗ кратность КП на зажимах отдельных электроприемников может превышать номинальное напряжение сети в 8-10 раз.

Средствам и методам защиты отдельных потребителей от КП также посвящено большое количество работ [17, 18, 21, 26, 27, 30, 32, 33, 34, 43, 45, 52]. В частности, говорится о том, что в настоящее время модернизированы общепринятые устройства защиты от КП – нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) – и разработаны новые высокоэффективные средства, основанные на использовании РС – цепей [17, 18, 45]. Разработка средств защиты, выполненных на базе РС – цепей, позволила увеличить эффективность ограничения перенапряжений в 1,5-2 раза. В циркулярах РАО ЕЭС России рекомендовано использование РС – ограничителей для защиты двигателей мощностью более 2000 кВт. В работах профессора Гончарова А.Ф. и других авторов [17, 18, 19] были установлены допустимые кратности КП как для электрических двигателей, так и для трансформаторов.

Авторами работ [41, 43, 44] доказано, что РС – цепи необходимо использовать для защиты электрических двигателей мощностью 2000 кВт и выше, а для защиты трансформаторов достаточно применение ОПН.

В работах [40,43] показано, что рационально производить установку средств защит от коммутационных перенапряжений в зависимости от мощности нагрузки и длины питающей кабельной линии. Доказано, что для защиты электрических двигателей средства защиты от КП должны находиться в непосредственной близости от них, а для трансформаторов средства защиты можно устанавливать в ячейках коммутационных аппаратов.

Однако до настоящего времени недостаточное внимание уделялось вопросам исследования коммутационных перенапряжений, возникающих в узлах электрических нагрузок, хотя проблема ограничения КП в УЭН становится достаточно актуальной. Это связано с тем, что на ряде предприятий зафиксированы случаи пробоев изоляции измерительных трансформаторов напряжения (НТМИ), трансформаторов собственных нужд (ТСН) и даже пробоев межфазных воздушных промежутков на секциях шин распределительных подстанций в случае группового отключения нагрузки от секции шин. До настоящего времени не установлено, какие факторы влияют на величину и характер перенапряжений в УЭН.

Для подтверждения актуальности данной проблемы приведен анализ повреждаемости электрооборудования распределительных подстанций на горнодобывающих, металлургических и нефтеперерабатывающих предприятиях.

## **1.2 Анализ повреждаемости электрооборудования распределительных подстанций напряжением 6-10 кВ**

Надежность систем электроснабжения промышленных предприятий во многом зависит от надежности работы трансформаторных и распределительных подстанций напряжением 6-10 кВ. С внедрением вакуумных выключателей участились случаи выхода из строя высоковольтного электрооборудования подстанций. Анализ аварийности высоковольтного оборудования подстанций выполнен на примере предприятий ОАО «Ачинский глиноземный комбинат», ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «Красноярский алю-

мининовый завод», ОАО «Братский алюминиевый завод».

Широкое внедрение вакуумных выключателей на указанных объектах началось с 2004 г. В таблице 1 собраны данные о повреждениях электрооборудования подстанций в зависимости от количества вакуумных выключателей.

Таблица 1 – Количество повреждений электрооборудования распределительных подстанций в зависимости от количества вакуумных выключателей

Поврежденное оборудование, шт.	Исследуемые объекты							
	1996 ÷ 2003				2004 ÷ 2006			
	ОАО АГК	ОАО АНПЗ	ОАО КрАЗ	ОАО БрАЗ	ОАО АГК	ОАО АНПЗ	ОАО КрАЗ	ОАО БрАЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измерительные трансформаторы напряжения НТМИ-6/10	-	-	-	-	6	13	5	3
Трансформаторы собственных нужд ТСН	-	1	-	-	2	3	2	2
Ячейки выключателей	6	7	2	1	18	21	7	5
Опорные изоляторы	8	10	-	-	23	26	12	8
Проходные изоляторы	-	-	-	-	8	12	3	-
Концевые кабельные муфты	8	10	4	2	16	18	8	8
<b>% вакуумных выключателей</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>	<b>1%</b>	<b>0,8%</b>	<b>12%</b>	<b>20%</b>	<b>7%</b>	<b>4%</b>

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что с ростом доли вакуумных выключателей аварийность электрооборудования подстанций возрастает. Наиболее повреждаемой в аварийных ситуациях оказалась изоляция ячеек высоковольтных выключателей, измерительных трансформаторов напряжения (НТМИ) и опорных изоляторов.

Приблизительно 77% из всех случаев выхода из строя электрооборудования при групповом отключении нагрузки от секции шин наблюдалось в режиме однофазного замыкания на землю. 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. Причиной роста случаев выхода из строя высоковольтного электрооборудования являются коммутационные перенапряжения, которые возникают в узлах электрических нагрузок при групповом отключении нагрузки от секции шин.

Измерения коммутационных перенапряжений в реальных условиях эксплуатации распределительных подстанций не проводились, а выполненные теоретические исследования в данном направлении посвящены случаям использования масляных выключателей в качестве коммутационных аппаратов на подстанции.

Для решения проблемы, связанной с возникновением КП в УЭН, в первую очередь, необходимо выполнить анализ литературных источников, посвященных исследованиям КП в узлах электрических нагрузок, создаваемых вакуумными выключателями. На основании проведенного анализа разработать методику измерения КП в УЭН и выполнить данные измерения. Если практические измерения подтвердят, что КП достигают опасных величин, то описать основные физические процессы, приводящие к таким перенапряжениям, разработать математическую модель, на основании которой определить методы и средства эффективного ограничения КП в УЭН.

### **1.3 Анализ состояния исследований коммутационных перенапряжений, возникающих в узлах электрических нагрузок**

Работы, посвященные исследованию КП, возникающих в УЭН, в основном затрагивают задачи, связанные с влиянием отключения отдельных потребителей на величину и характер КП в УЭН. В исследованиях автора [42] показано, что КП в УЭН зависят от типа коммутационных аппаратов. Установлено, что при использовании масляных выключателей кратность коммутационных перенапряжений в УЭН может определяться по формуле:

$$K = \sqrt{\frac{C_{\Sigma}}{C_{\Sigma} - C'}}, \quad (1.1)$$

где  $C_{\Sigma}$  - суммарная емкость узла электрических нагрузок, обусловленная емкостями кабельных линий, связанных с УЭН,  $C'$  - емкость отключаемого присоединения.

Показано, что при отключении длинных линий, емкость которых составляет 80÷90 % от суммарной емкости УЭН, КП могут превышать амплитуду фазного напряжения в три раза. Это может вывести из строя измерительные трансформаторы напряжения, трансформаторы собственных нужд, ячейки высоковольтных выключателей, проходные и опорные изоляторы, находящиеся в непосредственной близости от УЭН.

Близкие результаты получены и в работе [54], где кратность КП, возникающих в УЭН, оценивается с помощью выражения:

$$K = \delta \cdot \sqrt{\frac{I_{C\Sigma}}{I_{C\Sigma} - I_C}}, \quad (1.2)$$

где  $\delta$  - коэффициент корреляции, зависящий от конструкции распределительной подстанции,  $I_C$  – емкостный ток ОЗЗ отключаемого присоединения,  $I_{C\Sigma}$  - суммарный емкостный ток ОЗЗ распределительной подстанции.

В данной работе также показано, что максимальные перенапряжения  $(2,8-3,1)U_{мф}$  могут возникнуть на секциях шин подстанций при отключении длинных линий с емкостным током ОЗЗ, составляющим 85% от суммарного емкостного тока ОЗЗ в УЭН. Авторами [15, 39, 40] установлено, что для снижения данных перенапряжений необходимо изменить конфигурацию сети таким образом, чтобы емкостный ток отключаемой линии не превышал 30% от суммарного емкостного тока ОЗЗ. В этом случае перенапряжения могут находиться в пределах  $(1,2-1,8)U_{мф}$ .

Практически не встречается работ, посвященных КП, возникающих в УЭН в случае группового отключения нагрузки от секции шин (узла электрических нагрузок) в режиме ОЗЗ. Также не рассматривается вопрос о том, какие могут возникать перенапряжения в УЭН, если происходит отключение всей секции шин за счет срабатывания вводного выключателя.

Опыт эксплуатации распределительных подстанций и анализ аварийных

ситуаций, возникающих в УЭН, показал, что наибольшие повреждения электрооборудование подстанции получает в случае группового отключения нагрузки от секций шин в режиме ОЗЗ [50]. Данный источник не указывает на причину возникновения аварийных ситуаций. В работах [50, 51] выдвинуто предположение, что одной из основных причин подобных аварийных ситуаций могут быть КП. Однако в рассмотренных работах данный вопрос не исследован ни на экспериментальном, ни на теоретическом уровнях.

С учетом вышеизложенного, целью настоящей диссертационной работы является повышение надежности электроснабжения промышленных предприятий путем эффективного ограничения КП, возникающих в УЭН, и разработка инженерного метода расчета КП в УЭН. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На теоретическом и экспериментальном уровне исследовать процесс возникновения КП в случае группового отключения нагрузки от УЭН в режиме ОЗЗ, а также в случае отключения секции шин от источника питания в результате срабатывания вводного выключателя.
2. Разработать методику расчета КП, возникающих в УЭН при различных режимах работы сети (безаварийный режим, режим ОЗЗ) в случае групповых отключений потребителей от УЭН.
3. Выявить влияние режима заземления нейтрали сети на КП в УЭН.
4. На основе полученных экспериментальных данных разработать математическую модель процесса возникновения КП в УЭН.
5. На основе полученных результатов исследований (теоретических и экспериментальных) разработать эффективные методы и средства ограничения КП в УЭН.

В настоящей диссертационной работе данные задачи решены на примере распределительных сетей 10 кВ ОАО «Ачинский глиноземный комбинат» и распределительных сетей 6 кВ ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод».

## **2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

*Проведен анализ устройств измерения перенапряжений. Приведены результаты измерений перенапряжений в УЭН сети 6(10) кВ с компенсированной нейтралью в безаварийном режиме в результате срабатывания вводного выключателя и в режиме ОЗЗ в случае группового отключения потребителей от УЭН. Разработана инженерная методика расчета коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН.*

### **2.1 Методические основы экспериментальных исследований и измерительная аппаратура**

Известно, что величина перенапряжений в УЭН, возникающих в результате группового отключения нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ одной из линий, зависит от большого числа факторов: величины отключаемого тока, типа коммутационного аппарата, неодновременности расхождения контактов коммутационного аппарата, характера нагрузки, параметров отключаемой нагрузки, длины и сечения кабельной вставки между выключателем и электроприемником. Многие из этих факторов носят случайный характер и действуют в различных сочетаниях.

Очевидно, что экспериментальные исследования являются основной базой для теоретических исследований и разработки высокоэффективных методов борьбы с коммутационными перенапряжениями в узлах электрических нагрузок.

Существует большое количество приборов и устройств, предназначенных для исследований коммутационных перенапряжений: воздушный промежуток с заданным напряжением пробоя, клидонограф, тениограф, пиковый вольтметр, осциллографические регистраторы [2].

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

1. Значительная погрешность измерений (при использовании клидонографов и тениографов достигает 25% и выше).
2. Сильное влияние колебаний температуры окружающей среды, ускорений и вибраций на результаты измерений.
3. Использование автоматических регистраторов с электронно-лучевой разверткой требует постоянного присутствия высококвалифицированного персонала на объектах исследования, что практически невозможно в условиях работы измерительного оборудования.
4. Влияние электромагнитных помех в производственных условиях на работоспособность существующей измерительной аппаратуры.
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 регистратор амплитуд импульсов коммутационных перенапряжений. Практическая реализация данного прибора была выполнена специалистами ОАО «Алмаз-автоматика» г. Красноярск. Прибор состоит из емкостного накопительного устройства и преобразователя накопленной информации в удобную для отсчета величину. Принцип действия таких регистраторов основан на амплитудно-временном аналоговом преобразовании исследуемых импульсов в квазипостоянное напряжение с цифровым выводом информации. Они повысили точность и упростили производство измерений на действующих электроустановках.

Техническая характеристика и условия эксплуатации регистратора амплитуд коммутационных перенапряжений РКП-4-1:

– диапазон измеряемых амплитуд	5-25 В;
– основная приведенная погрешность	6%;
– диапазон длительности импульсов	20-2000 мкс;
– время фиксации показаний	30 мин;
– температура окружающего воздуха	–20 +40 °С;
– относительная влажность до	80%;
– атмосферное давление	– 86 – 106 кПа.

Использование только данного регистратора РКП-4-1 не позволяет учитывать следующие факторы: частоту коммутационного импульса, форму коммутационного импульса и длительность коммутационного импульса.

Эти 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-4-1, многоканальный цифровой осциллограф Agilent Technologies DSO3062A и делитель напряжения ДНЕК-(6)10.

Для снижения уровней импульсов перенапряжений до приемлемых для измерений значений существуют различные устройства. В основном предпочтение отдается делителям напряжения ДН (рис. 2.1). 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 несколько метров.

В этом случае при высокой частоте начинает сказываться влияние распределительной индуктивности.

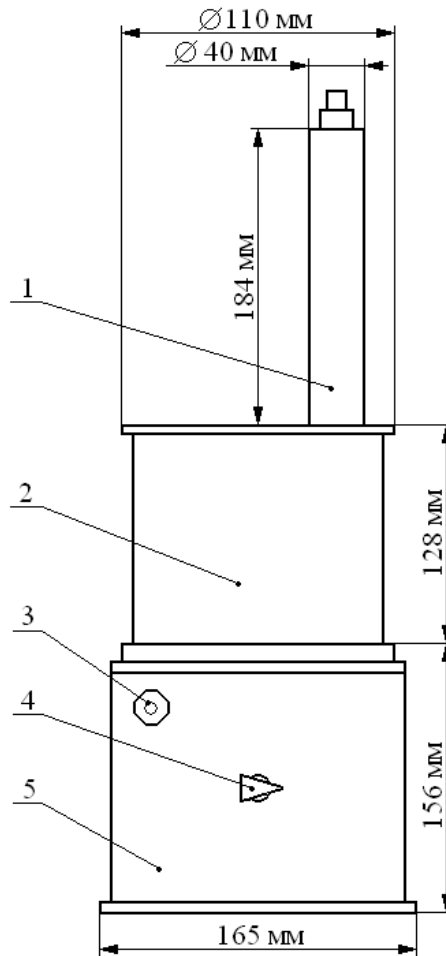


Рисунок 2.1 – Высоковольтный делитель напряжения: 1 – активное сопротивление; 2 – конденсатор; 3 – соединительный разъем; 4 – переключатель; 5 – корпус.

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

Эксперименты, проведенные сотрудниками кафедры «Электрификации горно-металлургического производства» и ООО «РУТАС», показали, что для измерений коммутационных перенапряжений наиболее приемлемыми являются компенсированные емкостные делители.

На удовлетворительную работу делителя напряжения оказывает влияние ряд факторов: волновое сопротивление и длина соединительного кабеля, входная цепь измерителя, нестандартная форма импульса перенапряжений (в виде

затухающей кривой), частота перенапряжений, характеристики вакуумных выключателей. Учет всех перечисленных факторов не представляется возможным, что в свою очередь приводит к погрешностям измерений. Для повышения точности измерений предусматривается возможность корректировки переходных характеристик в процессе метрологической поверки ДН.

При совместной работе ДН и регистратора РКП входные параметры регистратора не оказывают влияния на результаты измерений. Не возникают дополнительные погрешности и от кабельной линии, т.к. длина соединительной кабельной линии у передвижных электроустановок линии не превышает 5 м при напряжении 6 – 10 кВ.

Делители напряжений выполняются в трехфазном исполнении, но могут применяться и как однофазные. Конструкция делителя позволяет ступенчато изменять коэффициент деления, что позволяет измерять уровни перенапряжений в широких пределах.

Технические характеристики и условия эксплуатации делителя напряжения ДНЕК-(6)10:

– номинальное напряжение	$U_n = 3, 6, 10$ кВ;
– импульсная прочность	$U_{им.пр.} = 76$ кВ;
– коэффициенты деления по ступеням	1182, 2390, 3852;
– максимальная кратность перенапряжений	9.8, 9.95, 9.6;
– максимальная основная погрешность	0,77%;
– температура окружающего воздуха	– 20 + 40 °С;
– относительная влажность при температуре + 20 °С	до 80%;
– атмосферное давление	86 – 106 кПа.

На рис. 2.2 представлена схема подключения измерительной аппаратуры при экспериментальных исследованиях коммутационных перенапряжений в УЭН.

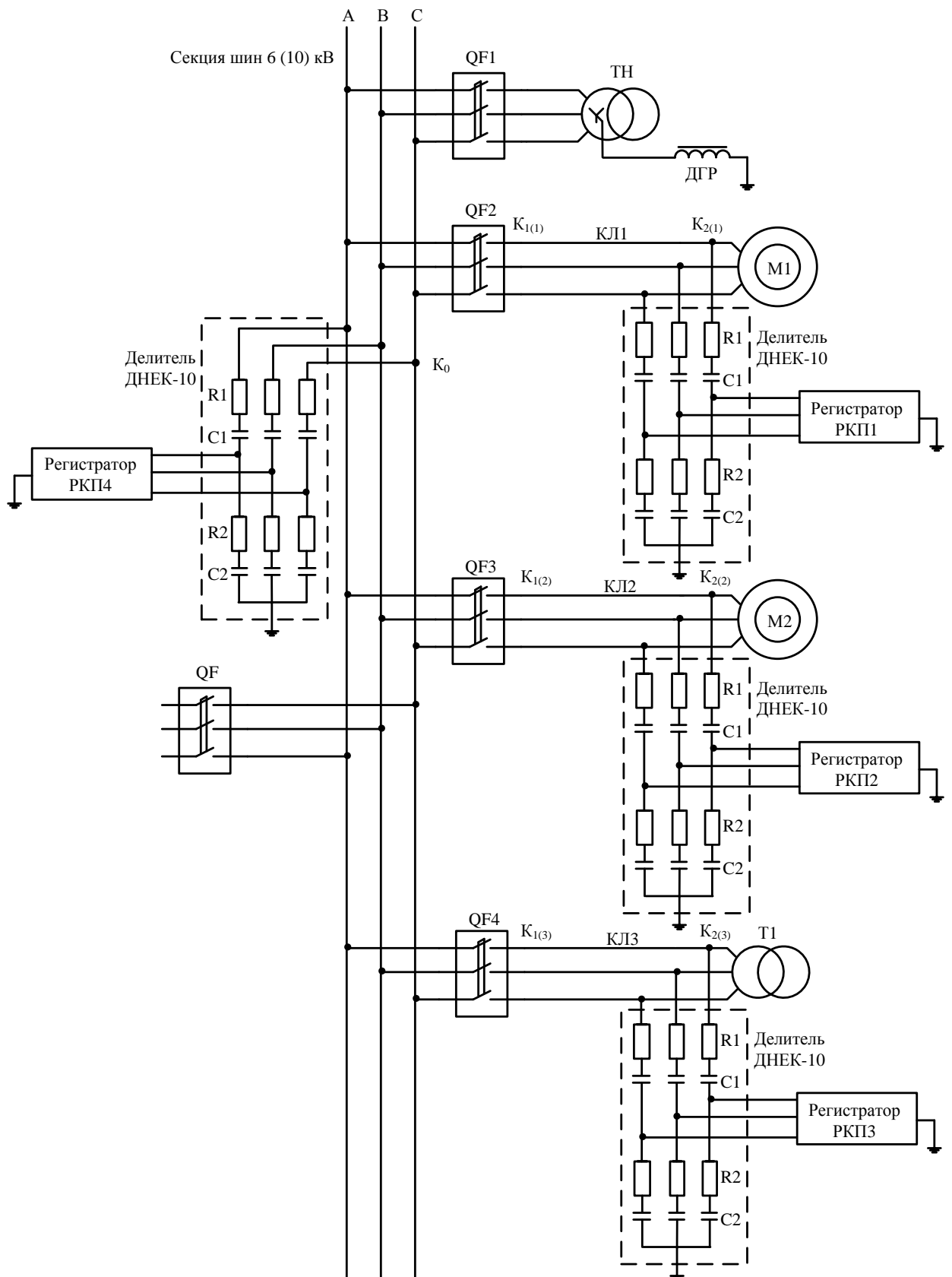


Рисунок 2.2 – Схема подключения измерительной аппаратуры

С помощью данной аппаратуры были произведены измерения перенапряжений, возникающих в УЭН в следующих режимах:

1. Отключение секции шин вводным выключателем без аварийного режима на отходящих линиях.
2. Режим группового отключения нагрузки от секции шин в результате однофазного замыкания на землю на одной из отходящих линий.

## **2.2 Экспериментальные измерения коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сетей 6-10 кВ в результате срабатывания вводного выключателя в безаварийном режиме**

На рис. 2.3 показана схема подключения измерительной аппаратуры, с помощью которой происходит измерение коммутационных перенапряжений, возникающих на секциях шин РП, РУ, ТП, ГПП в результате группового отключения нагрузки от системы электроснабжения за счет срабатывания вводного выключателя.

Как видно из рис. 2.3, измерения проводились в четырех точках: непосредственно около первого электроприемника – точка  $K_{2(1)}$ , непосредственно около второго электроприемника – точка  $K_{2(2)}$ , непосредственно около третьего электроприемника – точка  $K_{2(3)}$  и на секциях шин - точка  $K_0$ .

В качестве выключателей QF, QF1÷QF4 использовались масляные или вакуумные выключатели. Использование одновременно четырех точек измерения позволяет определить влияние конфигурации сети на перенапряжения. Дальнейшее увеличение числа точек измерения было ограничено количеством комплектов контрольно-измерительной аппаратуры.

Измерения проводились на распределительных подстанциях, запитанных от ГПП 2 ОАО «Ачинский глиноземный комбинат».

Данные распределительные подстанции имеют различный характер нагрузки – двигательной, трансформаторной, смешанной.

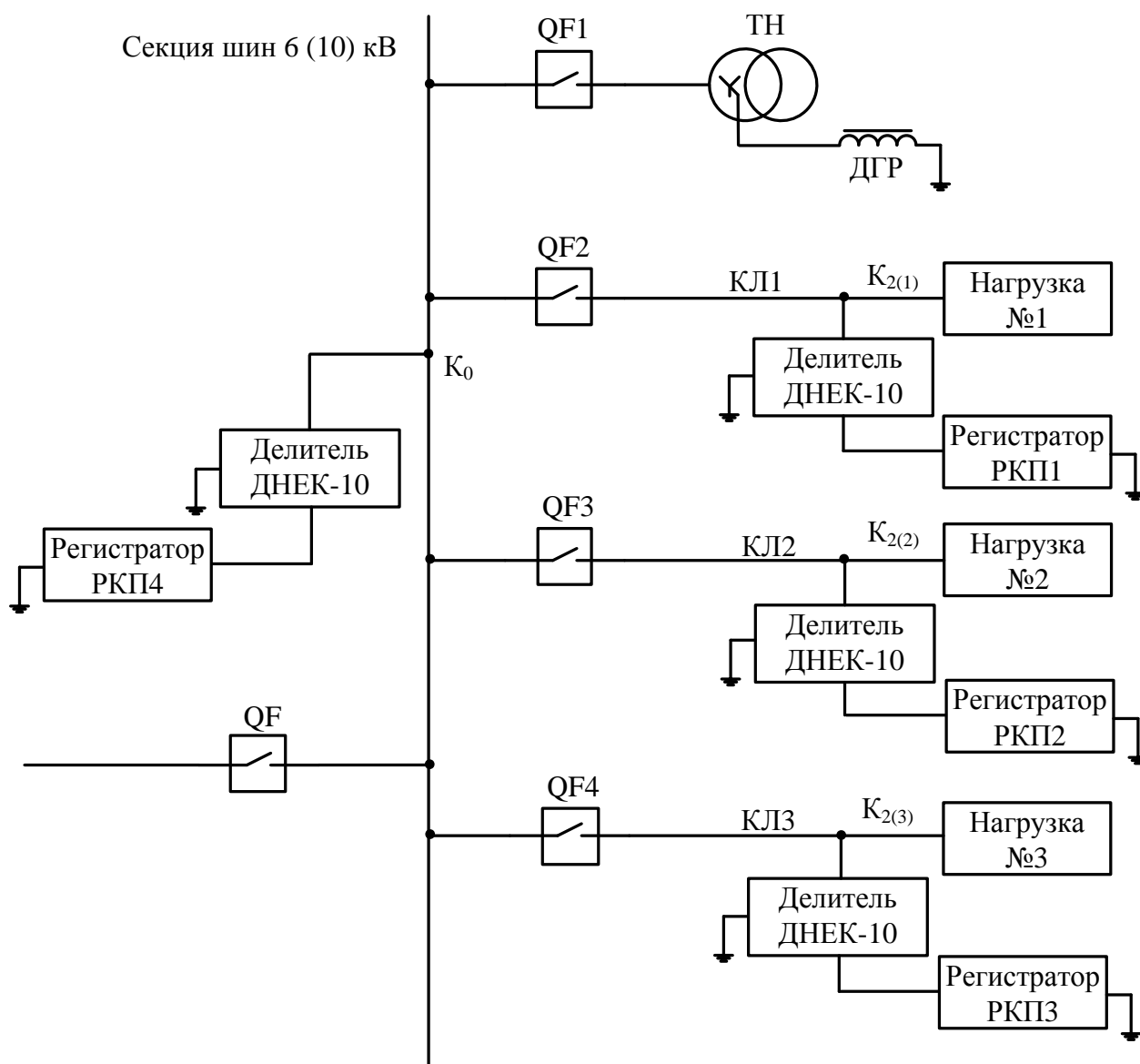


Рисунок 2.3 – Однолинейная схема измерений перенапряжений при отключении вводного выключателя

В табл. 2.1 приведены параметры схем проведенных измерений: тип вводного выключателя – QF (см. схему на рис. 2.3), характер отключаемой нагрузки (нагрузка №1-3), мощность отключаемой нагрузки, марка, сечение и длина питающей кабельной линии (КЛ1÷КЛ3). Из табл. 2.1 видно, что измерения КП проводились при отключении двигательной, трансформаторной и смешанной нагрузки как масляным, так вакуумным выключателями.

Таблица 2.1 – Параметры схем проведенных измерений коммутационных перенапряжений при отключении вводного выключателя

Номер варианта измерения	Тип вводного выключателя – QF	Тип нагрузки	Мощность нагрузки, $P_n$ , кВт, ( $S_n$ , кВА)	Тип питающей линии, КЛ1, КЛ2, КЛ3
1	Масляный выключатель ВМП – 6-10/630 – УХЛ6	асинхронный двигатель	315	ААШВ 3×50, L=120 м
		асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×95, L=40 м
		асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×95, L=85 м
2	Масляный выключатель ВМП – 6-10/630 – УХЛ6	трансформатор ТМ 1000/6(10)/0,4	1000	ААШВ 3×95, L=280 м
		трансформатор ТМ 630/6(10)/0,4	630	ААШВ 3×50, L=340 м
		трансформатор ТМ 630/6(10)/0,4	630	ААШВ 3×50, L=120 м
3	Масляный выключатель ВМП – 6-10/630 – УХЛ6	асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×70, L=60 м
		трансформатор ТМ 1000/6(10)/0,4	1000	ААШВ 3×95, L=85 м
		трансформатор ТМ 400/6(10)/0,4	400	ААШВ 3×70, L=110 м
4	Вакуумный выключатель ВВТЭ - 6-12/630 – УХЛ2	асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×70, L=80 м
		асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×70, L=30 м
		асинхронный двигатель	400	ААШВ 3×70, L=50 м
5	Вакуумный выключатель ВВТЭ - 6-12/630 – УХЛ2	трансформатор ТМ 400/6(10)/0,4	400	ААШВ 3×50, L=120 м
		трансформатор ТМ 630/6(10)/0,4	630	ААШВ 3×50, L=180 м
		трансформатор ТМ 400/6(10)/0,4	400	ААШВ 3×50, L=300 м
6	Вакуумный выключатель ВВТЭ - 6-12/630 – УХЛ2	асинхронный двигатель	315	ААШВ 3×70, L=70 м
		асинхронный двигатель	315	ААШВ 3×70, L=270 м
		трансформатор ТМ 630/6(10)/0,4	630	ААШВ 3×70, L=35 м

Далее более детально представлены результаты проведенных экспериментов. Кратности коммутационных перенапряжений, полученные в результате измерений в указанных точках для разных вариантов нагрузки и типа коммутационного аппарата, сведены в таблицы 2.2-2.3

Таблица 2.2 – Результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений при отключении нагрузки масляным выключателем

N опыта	Тип нагрузки											
	Двигательная				Трансформаторная				Смешанная			
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$
1	2,9	3,3	2,9	2,0	0,5	0,6	1,1	0,5	3,2	1,0	1,3	1,6
2	2,8	3,0	3,0	2,1	0,5	0,4	1,2	0,5	3,2	1,1	1,1	1,3
3	2,1	3,2	3,1	2,1	0,6	0,7	0,9	0,4	3,0	1,0	1,3	1,4
4	2,6	2,1	2,3	1,8	0,6	0,6	1,1	0,4	2,9	0,9	1,4	1,3
5	2,6	2,0	3,2	1,9	0,4	0,7	1,0	0,5	2,9	1,0	1,2	1,3

Таблица 2.3 – Результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений при отключении нагрузки вакуумным выключателем.

N опыта	Тип нагрузки											
	Двигательная				Трансформаторная				Смешанная			
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_0$
1	5,6	5,8	5,9	4,7	3,0	2,3	2,2	1,5	5,8	1,7	5,9	3,8
2	5,4	5,1	5,9	4,6	3,2	2,4	2,1	1,3	6,0	1,8	5,9	3,6
3	5,7	5,4	5,8	4,7	3,0	2,3	2,1	1,3	5,9	1,5	6,0	3,5
4	5,8	5,6	5,9	4,8	2,9	2,4	2,2	1,4	6,1	1,7	5,9	3,8
5	5,7	5,6	5,8	4,5	3,1	2,4	2,2	1,5	5,9	1,9	6,1	3,9

Анализируя результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений в УЭН сетей 6-10 кВ в безаварийном режиме в результате срабатывания вводного выключателя, можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная кратность КП при использовании в качестве вводного выключателя масляного выключателя может достигать 3,4 на отдельном

электроприемнике и 2,1 на секциях шин, если нагрузка двигательная. При трансформаторной нагрузке кратность КП на отдельном электроприемнике не превышает 1,2, а на секциях шин – 0,6. При смешанной нагрузке кратность КП на секциях шин находится в промежуточном значении – 1,6  $U_{\text{ном}}$ .

2. При использовании в качестве вводного вакуумного выключателя, характер КП меняется в сторону увеличения кратности перенапряжений. Так при двигательной нагрузке КП на отдельных электроприемниках могут достигать  $6,1U_{\text{ном}}$ , 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 –  $4,2 U_{\text{ном}}$ .

Однако открытым остается вопрос о том, как определить максимальную кратность КП, возникающих в УЭН, в результате безаварийного отключения нагрузки при срабатывании вводного выключателя, зная уровни КП на отдельных электроприемниках.

### **2.3 Методика оценки коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сетей 6-10 кВ в результате срабатывания вводного выключателя в безаварийном режиме**

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 ( $K_0$  рис. 2.3), зная максимальные кратности перенапряжений на отдельных электроприемниках, т.е. в точках ( $K_2$  рис. 2.3), параметры электроприемников и питающих линий.

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

- для масляных выключателей;

$$K_{0M} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i^2)^2 / n \right]^{1/2}, \quad (2.1)$$

где  $K_{0M}$  – кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин при использовании в качестве вводного масляного выключателя;  $K_{(2)\max i}$  – максимальные кратности перенапряжений на зажимах отдельных потребителей, определяемые по табл. 2.4, 2.5,  $K_i$  – коэффициент, зависящий от длины и сечения кабельной линии, связывающей электроприемник и УЭН,  $n$  – количество отходящих линий.

– для вакуумных выключателей при двигательной нагрузке;

$$K_{0ВД} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i)^2 / n \right]^{1/2}, \quad (2.2)$$

где  $K_{0ВД}$  – кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин при использовании в качестве вводного вакуумного выключателя, в случае двигательной нагрузки на секции шин.

– для вакуумных выключателей при трансформаторной нагрузке;

$$K_{0ВТ} = \left[ \sum_{i=1}^n (K_{2\max i} / K_i^2)^2 / n \right]^{1/2}, \quad (2.3)$$

где  $K_{0ВТ}$  – кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин при использовании в качестве вводного вакуумного выключателя, в случае трансформаторной нагрузки на секции шин.

– для вакуумных выключателей при смешанной нагрузке.

$$K_{0В} = (K_{0ВД}^2 + K_{0ВТ}^2)^{1/2}, \quad (2.4)$$

где  $K_{0В}$  – кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин при использовании в качестве вводного вакуумного выключателя, в случае смешанной нагрузки на секции шин.

Если в УЭН эксплуатируются одновременно масляный выключатель и вакуумный выключатель, то кратность КП в УЭН определяется по выражению

$$K_0 = (K_{0В}^2 + K_{0М}^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

В выражениях (2.1) ÷ (2.5)  $K_{(2)\max i}$  – максимальные кратности перенапряжений на зажимах отдельных потребителей, определяемые по табл. 2.4, 2.5,  $K_i$  – понижающий коэффициент, зависящий от длины и сечения кабельной линии, связывающей электроприемник и УЭН:

$$K_i = 1 + L \cdot (0,03475 \cdot S + 3,133) \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

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

В табл. 2.4 приведены максимальные кратности перенапряжений на зажимах электродвигателей в зависимости от их мощности, а также типа коммутационного аппарата. Данные получены на основании большого опыта эксплуатации высоковольтных электроприемников и экспериментальных измерений.

Таблица 2.4 – Максимальная кратность КП на зажимах двигателей

$P_{\text{дв}}$ , 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	2,5	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. 2.5 приведены максимальные кратности перенапряжений на зажимах трансформаторов в зависимости от их мощности, а также типа коммутационного аппарата.

Таблица 2.5 – Максимальная кратность КП на зажимах трансформаторов

$S_{\text{дв}}$ , 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

Таким образом, зная кратности КП на отдельных линиях, можно оценить перенапряжения в УЭН.

Например, рассчитаем перенапряжения в УЭН для первого варианта схемы измерения КП в УЭН (см. табл. 2.1).

Для данной схемы нагрузкой являются асинхронные двигатели мощностью 315, 400, 400 кВт, которые отключаются масляным выключателем.

По табл. 2.4 максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений  $K_{2\max}$  в зависимости от мощности двигателей будут соответственно равны  $K_{2\max(1)}=4,6$ ;  $K_{2\max(2)}=4,5$ ;  $K_{2\max(3)}=4,5$ .

Кратность коммутационных перенапряжений, возникающих в точке  $K_0$  рис. 2.3, определяется по выражению (2.1).

Понижающий коэффициент по выражению (2.6):

– для кабельной линии ААШВ 3×50,  $L = 120$  м, питающей первый двигатель,  $K_i = 1 + 120 \cdot (0,03475 \cdot 50 + 3,133) \cdot 10^{-3} = 1,6$ ;

– для кабельной линии ААШВ 3×95,  $L = 40$  м, питающей второй двигатель,  $K_i = 1 + 40 \cdot (0,03475 \cdot 50 + 3,133) \cdot 10^{-3} = 1,2$ ;

– для кабельной линии ААШВ 3×95,  $L = 85$  м, питающей третий двигатель,  $K_i = 1 + 85 \cdot (0,03475 \cdot 95 + 3,133) \cdot 10^{-3} = 1,56$ .

Таким образом, кратность коммутационных перенапряжений в УЭН по выражению (2.1):

$$K_{0\text{вд}} = \left[ (4,6/1,6)^2 + (4,5/1,2)^2 + (4,5/1,55)^2 \right]^{1/2} = 2,1$$

Все расчеты сводятся в таблицы 2.6 ÷ 2.11

Проанализируем данные, полученные при экспериментальных измерениях и расчетах, выполненных с помощью описанного метода.

Погрешность между измеренными данными КП в УЭН и расчетными определяется выражением:

$$\Delta = \frac{K_{0\text{изм.}} - K_{0\text{расч.}}}{K_{0\text{расч.}}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Ниже приведены результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН по вышеизложенной методике:

Результаты первого варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит масляным выключателем ВМП -6-10/630 – УХЛ6;

- нагрузкой являются двигатели.

Таблица 2.6 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении двигательной нагрузки масляным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	2,9	3,3	2,9	2,0	3,0	3,4	2,8	2,3	-6,2
2	2,8	3,0	3,0	2,1	3,0	3,4	2,8	2,3	0
3	2,1	3,2	3,1	2,1	3,0	3,4	2,8	2,3	0
4	2,6	2,1	2,3	1,8	3,0	3,4	2,8	2,3	-15,6
5	2,6	2,0	3,2	1,9	3,0	3,4	2,8	2,3	-10,9

Результаты второго варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит масляным выключателем ВМП -6-10/630 – УХЛ6;
- нагрузкой являются трансформаторы.

Таблица 2.7 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении трансформаторной нагрузки масляным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	0,5	0,6	1,1	0,5	0,6	0,7	1,1	0,46	9,0
2	0,5	0,4	1,2	0,5	0,6	0,7	1,1	0,46	9,0
3	0,6	0,7	0,9	0,4	0,6	0,7	1,1	0,46	-12,8
4	0,6	0,6	1,1	0,4	0,6	0,7	1,1	0,46	-12,8
5	0,4	0,7	1,0	0,5	0,6	0,7	1,1	0,46	9,0

Результаты третьего варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит масляным выключателем ВМП -6-10/630 – УХЛ6;
- нагрузкой являются трансформаторы и асинхронный двигатель.

Таблица 2.8 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении смешанной нагрузки масляным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	3,2	1,0	1,3	1,6	3,3	1,1	1,4	1,5	4,2
2	3,2	1,1	1,1	1,3	3,3	1,1	1,4	1,5	-16,3
3	3,0	1,0	1,3	1,4	3,3	1,1	1,4	1,5	-8,8
4	2,9	0,9	1,4	1,3	3,3	1,1	1,4	1,5	-16,3
5	2,9	1,0	1,2	1,3	3,3	1,1	1,4	1,5	-15,3

Результаты четвертого варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит вакуумным выключателем ВВТЭ -6-12/630 – УХЛ2;
- нагрузкой являются асинхронные двигатели.

Таблица 2.9 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении двигательной нагрузки вакуумным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	5,6	5,8	5,9	4,7	6,2	6,2	6,2	4,9	-4,9
2	5,4	5,1	5,9	4,6	6,2	6,2	6,2	4,9	-6,9
3	5,7	5,4	5,8	4,7	6,2	6,2	6,2	4,9	-4,9
4	5,8	5,6	5,9	4,8	6,2	6,2	6,2	4,9	-2,9
5	5,7	5,6	5,8	4,5	6,2	6,2	6,2	4,9	-8,9

Результаты пятого варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит вакуумным выключателем ВВТЭ -6-12/630 – УХЛ2;
- нагрузкой являются трансформаторы.

Таблица 2.10 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении трансформаторной нагрузки вакуумным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	3,0	2,3	2,2	1,5	3,2	2,2	2,1	1,44	4,4
2	3,2	2,4	2,1	1,3	3,2	2,2	2,1	1,44	-9,5
3	3,0	2,3	2,1	1,3	3,2	2,2	2,1	1,44	-9,5
4	2,9	2,4	2,2	1,4	3,2	2,2	2,1	1,44	-2,5
5	3,1	2,4	2,2	1,5	3,2	2,2	2,1	1,44	4,4

Результаты шестого варианта измерений и расчетов:

- отключение секции шин происходит вакуумным выключателем ВВТЭ -6-12/630 – УХЛ2;
- нагрузкой являются трансформатор и асинхронные двигатели (смешанная нагрузка).

Таблица 2.11 – Результаты экспериментальных измерений и расчетов КП в УЭН при отключении смешанной нагрузки вакуумным выключателем

N опыта	Измерено				Рассчитано				
	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0изм}$	$K_{2(1)}$	$K_{2(2)}$	$K_{2(3)}$	$K_{0расч}$	$\Delta\%$ ,
1	5,8	1,7	5,9	3,8	6,4	3,4	6,4	3,5	9,1
2	6,0	1,8	5,9	3,6	6,4	3,4	6,4	3,5	3,3
3	5,9	1,5	6,0	3,5	6,4	3,4	6,4	3,5	0
4	6,1	1,7	5,9	3,8	6,4	3,4	6,4	3,5	9,1
5	5,9	1,9	6,1	3,9	6,4	3,4	6,4	3,5	11,9

Как видно из таблиц 2.6 ÷ 2.11, погрешность между измеренными данными кратности коммутационных перенапряжений  $K_{0изм}$  и расчетными данными кратности КП не превышает 17%. Это говорит о том, что разработанную инженерную методику расчета коммутационных перенапряжений, возникающих в

случае группового отключения нагрузки от системы электроснабжения в безаварийном режиме, можно использовать для оценки КП в УЭН.

Таким образом, с помощью разработанной методики оценки КП в УЭН и методики, предложенной авторами [37, 41], которая позволяет оценить кратности КП на отдельных высоковольтных электроприемниках, можно рассчитать КП в любой точке системы электроснабжения промышленных предприятий. Данную методику можно использовать как на стадии проектных работ, так и при эксплуатации. Кроме того, простота предложенной методики позволит создать несложную компьютерную программу по оценке коммутационных перенапряжений в УЭН.

Подобная методика широко используется для оценки КП в системе электроснабжения следующих предприятий: ОАО «КрАЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «СаАЗ» ОАО «АГК», ОАО «АНПЗ», «Надеждинский металлургический завод», ФГУП «ГХК», ФГУП «ЭХЗ», «Нюрбенский ГОК» компании Алроса, ООО «Красноярский цемент». Это подтверждает высокую эффективность разработанной методики.

#### **2.4 Экспериментальные измерения коммутационных перенапряжений в УЭН сетей с компенсированной нейтралью в режиме ОЗЗ в случае группового отключения нагрузки**

Групповое отключение нагрузки от секции шин возможно в следующих случаях:

1. В результате неселективной работы защит от однофазного замыкания на землю, когда при возникновении ОЗЗ на одной из линий, отключаются неповрежденные линии, а линия с ОЗЗ отключается последней.
2. В результате действий оперативного персонала, сотрудники которого при отыскании линии с ОЗЗ могут отключить неповрежденные линии.

В результате группового отключения нагрузки от секции шин, сама секция остается под напряжением и на ней могут возникать КП, кратность которых может достигать значительных величин.

Экспериментальные измерения производились на ОАО «АГК» и ОАО «АНПЗ». В электроустановках данных предприятий для заземления нейтрали используются дугогасящие реакторы типа РЗДСОМ-380 кВар. Дугогасящий 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.

Измерения на ОАО «АГК» производились в период ремонта шинопровода, что позволило получить реальные данные.

На рисунке 2.4 показана схема экспериментальной установки, с помощью которой происходит измерение коммутационных перенапряжений, возникающих на секциях шин РП, РУ, ТП, ГПП в результате группового отключения нагрузки от системы электроснабжения в режиме ОЗЗ.

Измерения проводились согласно следующей программе: при срабатывании высоковольтного выключателя QF4 через плавкую вставку, заключенную между контактами КМ, начинает протекать ток ОЗЗ, который фиксируется амперметром, далее с помощью вводного выключателя QF отключается секция шин, тем самым искусственно создается режим неселективной работы защит от ОЗЗ. С течением определенного времени плавкая вставка перегорает и между контактами К и М возникает дуга. Расстояние между К и М составляет 8 мм. Осциллографы, подключенные к высоковольтным делителям напряжения ДНЕК – 10, фиксируют значение напряжения на фазах А, В и С, а регистраторы фиксируют максимальную кратность перенапряжений.

В сетях ОАО «АГК» ДГР работает на первой отпайке.

Эксперименты производились следующим образом: отключались первый и второй фидеры, а фидер с ОЗЗ отключался в последнюю очередь, тем самым моделировалось групповое отключение нагрузки. Данные измерений приведены в таблице 2.12.

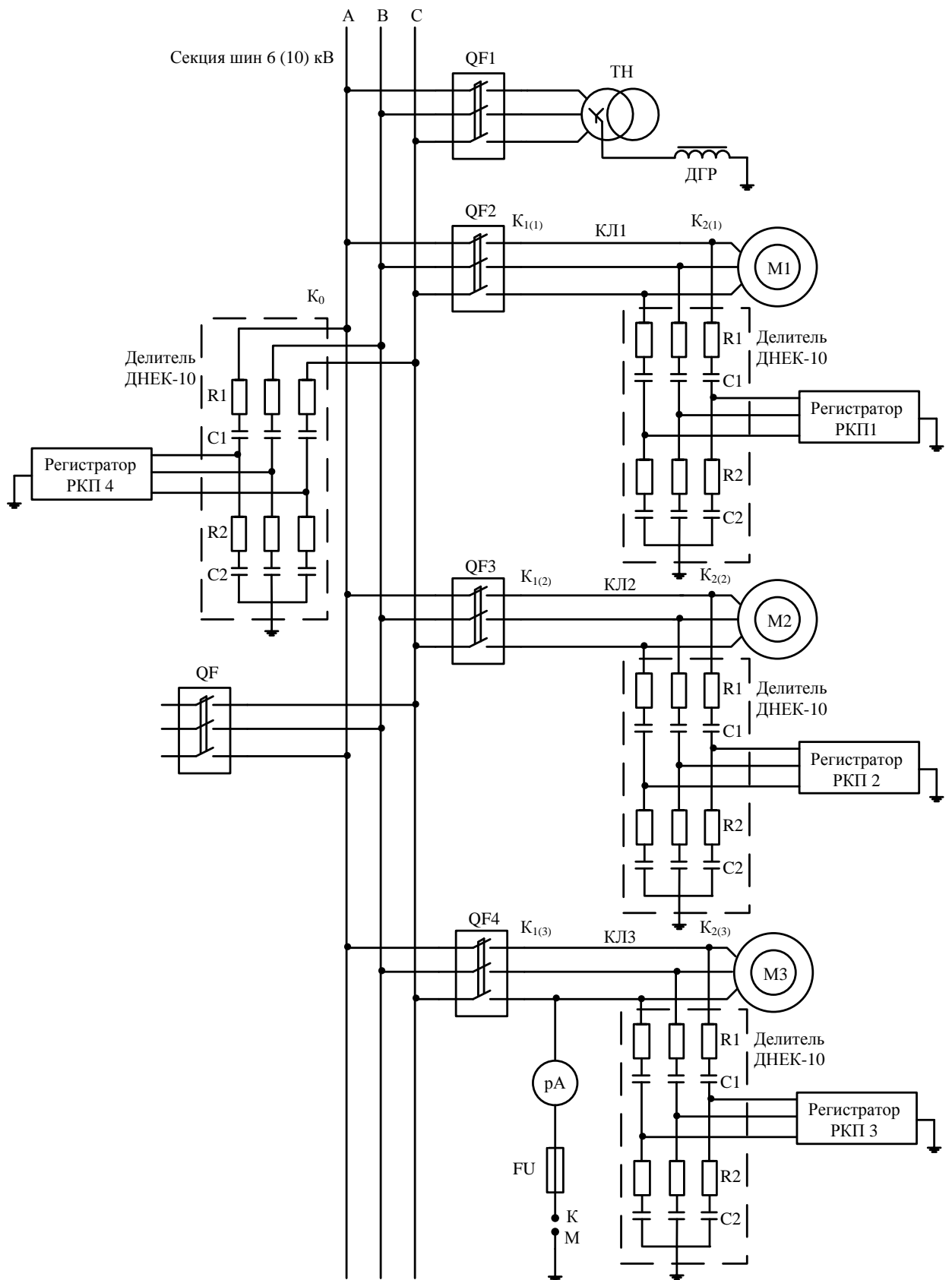


Рисунок 2.4 – Схема измерений при групповом отключении нагрузки в режиме ОЗЗ

Таблица 2.12 – Результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений при групповом отключении нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ

№ опыта	$K_A$	$K_B$	$K_C$
1	7,8	3,2	4,6
2	4,1	8,1	4,8
3	8	2,4	6,4

Измерения на ОАО «АНПЗ» производились в период остановки технологического процесса.

В сетях ОАО «АНПЗ» ДГР работает на второй отпайке.

Эксперименты производились аналогично экспериментам, проводимым на ОАО «АГК». Данные измерений приведены в таблице 2.13

Таблица 2.13 – Результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений при групповом отключении нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ

№ опыта	$K_A$	$K_B$	$K_C$
1	2,4	5,4	7,9
2	3,7	3,9	8,1
3	3,3	4,6	8,0

Таким образом, было произведено шесть измерений, которые показали, что в режиме ОЗЗ на секциях шин могут возникать 7 – 8 – кратные перенапряжения.

Из этих данных видно, что количество измерений ограничено из-за высоких уровней перенапряжений, возникающих на секциях шин в режиме ОЗЗ. Поэтому экспериментально установить, какие факторы влияют на величину перенапряжений в УЭН, не представляется возможным.

В случае селективной работы защит от ОЗЗ уровни коммутационных перенапряжений не превышают четырехкратного значения, что видно из таблицы 2.14, которая получена при анализе литературных источников [51, 55, 70, 75].

Таблица 2.14 – Результаты перенапряжений при дуговом замыкании на землю для различных режимов нейтрали.

Режим нейтрали сети		Кратность перенапряжений $K_{OЗЗ} = U_{max}/U_H$		
		$I_C < 5 \text{ A}$	$5 \text{ A} \leq I_C \leq 50 \text{ A}$	$I_C > 50 \text{ A}$
Изолированная		2,4-2,6	2,7-3,6	2,3-2,5
Компенсированная	$I_V/I_C < 0,05$	-	2,0-2,2	2,0-2,2
	$I_V/I_C > 0,05$	-	2,6-3,4	2,3-2,5
Заземленная через резистор	$I_\alpha/I_C = 0,1$	2,4-2,5	2,7-3,3	2,3-2,4
	$I_\alpha/I_C = 0,2$	2,35-2,4	2,3-2,4	2,3-2,4
	$I_\alpha/I_C = 0,3$	2,2-2,3	2,3-2,4	2,2-2,3
	$I_\alpha/I_C = 0,4$	2,1-2,2	2,2-2,3	2,2-2,3
	$I_\alpha/I_C = 0,5$	2,1	2,1-2,2	2,1-2,2
	$I_\alpha/I_C = 0,6$	2,1	2,0-2,1	2,0-2,1
	$I_\alpha/I_C = 0,8$	2,1	2,0-2,1	2,0-2,1
	$I_\alpha/I_C = 1,0$	2,1	2,0-2,1	2,0-2,1
	$I_\alpha/I_C = 1,2$	2,0	2,0	2,0

В сети с изолированной нейтралью при пробое изоляции одной из фаз сети на землю возможны три режима горения заземляющей дуги, которые сопровождаются перенапряжениями [51, 55].

1. При весьма большом токе однофазного замыкания ( $I_{OЗЗ} > 50 \text{ A}$ ) дуга горит устойчиво, падение напряжения на дуге сравнительно мало, т.к. вследствие большой остаточной проводимости при переходе тока через ноль не успевает восстанавливаться электрическая прочность изоляции. Данный режим близок к глухому замыканию на землю, поэтому коэффициент кратности перенапряжения  $K_{max.OЗЗ} < 2,2$ .

2. При достаточно малом токе ( $I_{OЗЗ} < 3 \text{ A}$ ) дуга горит неустойчиво, и после одного или нескольких (не более 3-4) повторных зажиганий и погасаний,

несколько раздувшись за счет тепловых потоков воздуха, дуга гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность, и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы. Максимальные значения коэффициента кратности перенапряжений находятся в пределах  $2,2 < K_{\text{мах.озз}} < 2,5$ .

3. При промежуточном значении тока ( $3 \leq I_{\text{озз}} \leq 50\text{А}$ ) наблюдаются многократные повторные погасания и зажигания дуги, сопровождающиеся колебательными перезарядами емкостей сети по отношению к земле, что приводит к значительным перенапряжениям. Максимальные значения коэффициента кратности перенапряжений находятся в пределах  $2,5 < K_{\text{мах.озз}} < 3,6$ .

4. Наименьшее значение ( $K_{\text{мах}}$ ) соответствует наиболее удаленной точке сети от места однофазного замыкания. Это связано с тем, что по мере удаления от места однофазного замыкания емкость сети увеличивается и повышается фильтрующая способность высокочастотных составляющих, которые сопровождают повторные зажигания и гашения дуги.

Рассмотренные четыре режима горения заземляющей дуги относятся к току ОЗЗ, который имеет емкостный характер.

В сетях с компенсированной нейтралью, то есть в сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, ограничения перенапряжений до значения  $2,2U_{\text{ном}}$  можно добиться в том случае, если сеть будет находиться в режиме резонанса токов или режиме, близком к резонансному – это означает, что разбалансировка реактора не должна превышать  $\pm 5\%$ . Если разбалансировка реактора составляет от 5 до 12 %, перенапряжения могут достигать значений  $2,7U_{\text{ном}}$ , при разбалансировке в диапазоне от 12 до 20 % перенапряжения возрастают и могут превышать напряжение сети в 3,2 раза, при разбалансировке более 20% (22%) получена кратность перенапряжения менее 4,2. Таким образом, эксперименты показывают [51, 55], что в сетях с компенсированной нейтралью коммутационные перенапряжения зависят от разбалансировки ДГР и, следовательно, распределительная сеть и узлы электрических нагрузок в режиме перекомпенсации (недокомпенсации), с точки зрения перенапряжений, практически не отличаются от сети с изолированной нейтралью.

В сетях с резистивным заземлением нейтрали (к таким относят сети с изолированной нейтралью, в нейтраль которых включили резистор, или сети с компенсированной нейтралью, в которых резистор подключается параллельно ДГР) ограничения перенапряжений в режиме ОЗЗ можно добиться за счет подбора соответствующего сопротивления резистора или, говоря другими словами, за счет наложения добавочного активного тока на реактивный ток ОЗЗ.

Результаты исследований, приведенные в табл. 2.18, показывают, что с увеличением отношения активной составляющей к реактивной, перенапряжения в режиме ОЗЗ снижаются. При соотношении  $I_a/I_C = 0,4$  кратность перенапряжений не превышает 2,2, а при достижении соотношения  $I_a/I_C = 0,5$  кратность перенапряжений снижается до 2,1, т.е. становится безопасными для изоляции, силовых кабелей и высоковольтного электрооборудования подстанций.

Таким образом, исследование факторов, влияющих на появление 7 – 8 – кратных перенапряжений, можно оценить лишь с помощью математического моделирования данного процесса.

### **Выводы по второй главе**

1. В безаварийном режиме в результате срабатывания вводного выключателя максимальная кратность перенапряжений при использовании масляного выключателя может достигать 3,4 на отдельном электроприемнике и 2,1 на секциях шин, если нагрузка двигательная. При трансформаторной нагрузке кратность перенапряжений на отдельном электроприемнике не превышает 1,2, а на секциях шин 0,6 – кратного значения. При смешанной нагрузке кратность КП на секциях шин имеет промежуточное значение и не превышает 1,6.
2. При использовании в качестве вводного выключателя вакуумного выключателя характер КП меняется в сторону увеличения кратности перенапряжений. При двигательной нагрузке перенапряжения на отдельных электроприемниках могут достигать  $6,4U_{ном}$ , а на секциях шин  $4,9 U_{ном}$ .

При трансформаторной нагрузке на секциях шин могут возникать 1,5 – кратные значения перенапряжений, а при смешанной нагрузке 4,8 – кратные перенапряжения.

3. Кроме экспериментальных измерений КП в УЭН в безаварийном режиме, можно использовать методику оценки КП, возникающих на секциях шин, с помощью которой можно получить достоверный результат.
4. При групповом отключении нагрузки от секции шин кратность КП может достигать 7 – 8 – кратного значения и выше, поэтому количество измерений ограничено и, соответственно, экспериментально установить, какие факторы влияют на величину КП в УЭН, не представляется возможным.
5. В режиме ОЗЗ при селективной работе защит от ОЗЗ максимальная кратность перенапряжений, равная 3,6, возникает в том случае, если емкостная составляющая тока ОЗЗ находится в диапазоне от 5 до 50 А, если емкостной ток меньше 5 А, то кратность перенапряжений не превышает 2,6, а при токе больше 50 А кратность перенапряжений не превышает 2,5. В сетях с компенсированной нейтралью наименьшая кратность перенапряжений возникает, если ДГР настроен в резонанс токов. В этом случае кратность перенапряжений находится в диапазоне от 2 до 2,2. При разбалансировке реактора на 5 % и более, кратность перенапряжений возрастает и может превышать напряжение сети в 3 – 4 раза. При заземлении нейтрали сети через резистор и выполнении условия  $I_a/I_C > 0,2$ , кратность перенапряжений не превышает 2,4 номинального напряжения, а при соотношении  $I_a/I_C > 0,5$  кратность перенапряжений снизится до 2,1.
6. Исследование влияния основных факторов, приводящих к 7 – 8 – кратным значениям КП в УЭН, можно оценить с помощью математического моделирования данного процесса, так как экспериментальные исследования невозможны из-за выхода из строя высоковольтного оборудования распределительных подстанций.

### **3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕ- НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ**

*Рассмотрены физические процессы возникновения КП в УЭН. Проведено математическое моделирование перенапряжений, возникающих в УЭН, для сетей с компенсированной нейтралью, сетей с нейтралью, частично заземленной через резистор, сетей с добавочным активно-емкостным сопротивлением на секциях шин подстанций. Установлены зависимости уровней коммутационных перенапряжений в УЭН от параметров системы электроснабжения и условий отключения нагрузки.*

#### **3.1 Общие сведения и методика исследований**

В результате группового отключения нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ возникают переходные процессы, обусловленные мгновенными изменениями параметров отключаемого участка распределительной сети. Эти процессы протекают за очень короткий промежуток времени и сопровождаются КП, существенно превышающими номинальное напряжение сети.

Экспериментальные исследования показывают, что в результате группового отключения нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ возникают КП, в несколько раз превышающие напряжения для нормального режима работы электроустановок. В сетях с компенсированной нейтралью при селективной работе защит от ОЗЗ перенапряжения зависят от степени разбалансировки дугогасящего реактора ДГР, а кратность перенапряжений может изменяться от 2,2 до 4,2. В случае неселективной работы ОЗЗ кратность перенапряжений в УЭН резко возрастает и может превышать напряжение сети в 7 – 8 раз. В сетях с нейтралью, частично заземленной через резистор, перенапряжения зависят от сопротивления резистора, включенного в нейтраль, а кратность перенапряжений может достигать 6 – 7 – кратного значения. Данный вопрос недостаточно рассматривает-

ся в литературных источниках, и поэтому причины возникновения столь высоких перенапряжений не установлены. В настоящей главе выполнены теоретические исследования процессов, возникающих в данной ситуации. На основе экспериментальных исследований установить, какие параметры сети влияют на возникающие перенапряжения, не представляется возможным из-за ограниченных возможностей измерительной аппаратуры и высоких уровней КП, которые могут возникать в результате экспериментальных измерений, что в свою очередь может привести к повреждению оборудования. Поэтому влияние параметров сети электроснабжения на перенапряжения, возникающие в УЭН, исследуем с помощью математического моделирования данного процесса.

К основным факторам, которые оказывают влияние на величину КП, возникающих на секциях шин РП, ТП, ГПП, РУ, можно отнести следующие: характер заземления нейтрали сети; мощность отключаемой нагрузки; величина тока среза; величина волнового сопротивления; характер нагрузки; одновременность замыкания или размыкания полюсов контактной системы выключателя; тип коммутационного аппарата; отключающая способность по высокочастотному току; повторные зажигания дуги [48]. Некоторые из этих параметров представляют собой случайную величину и действуют в самых разнообразных сочетаниях. Например, индуктивность и емкость отключаемой цепи, значение которых зависит от длины кабеля, от номинальной мощности нагрузки и др.

Для анализа высокочастотных переходных процессов наиболее приемлемой схемой замещения является схема с распределенными параметрами с учетом зависимости их величины от частоты переходных процессов [4]. Однако наличие большого числа факторов, влияющих на протекание переходного процесса при коммутации, делает практически невозможным его математическое описание. Описание механизмов возникновения КП на основе трехфазной схемы с распределенными параметрами представляет трудную задачу, так как необходимо учитывать не только распределенные параметры отдельных линий по каждой фазе, но и межфазные емкостные связи и взаимную индуктивность фаз. Поэтому является целесообразным применение однофазной и трехфазной

схемы замещения с сосредоточенными параметрами, эквивалентной схеме с распределенными параметрами, которая позволит оценить влияние основных факторов при КП.

Для расчетов переходных процессов принят классический метод с использованием прикладных математических программ.

Для того чтобы разработать достоверную математическую модель, необходимо в первую очередь рассмотреть физические процессы, которые возникают в сети в подобном режиме.

### **3.2 Физические процессы, возникающие в УЭН сети с компенсированной нейтралью в случае группового отключения нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ**

Экспериментально установлено, что высокий уровень перенапряжений в УЭН в случае неселективной работы защиты от ОЗЗ происходит в том случае, если отключаются все отходящие фидерные линии, т.е. происходит групповое отключение нагрузки. Кроме этого, в роли коммутационных аппаратов должны выступать вакуумные выключатели. Известно, что вакуумные выключатели способствуют возникновению коммутационных перенапряжений при отключении индуктивной нагрузки (электродвигатель или трансформатор) [20, 21, 31].

Групповое отключение нагрузки от секции шин возможно в случае неселективной работы защит от ОЗЗ (защита от ОЗЗ не отключает поврежденную линию) или за счет действия оперативного персонала, который отключает линию с ОЗЗ.

На рис. 3.1 представлена эквивалентная схема замещения участка распределительной сети РП 10 кВ.

В случае группового отключения нагрузки схема, представленная на рис. 3.1, превращается в схему, представленную на рис. 3.2.

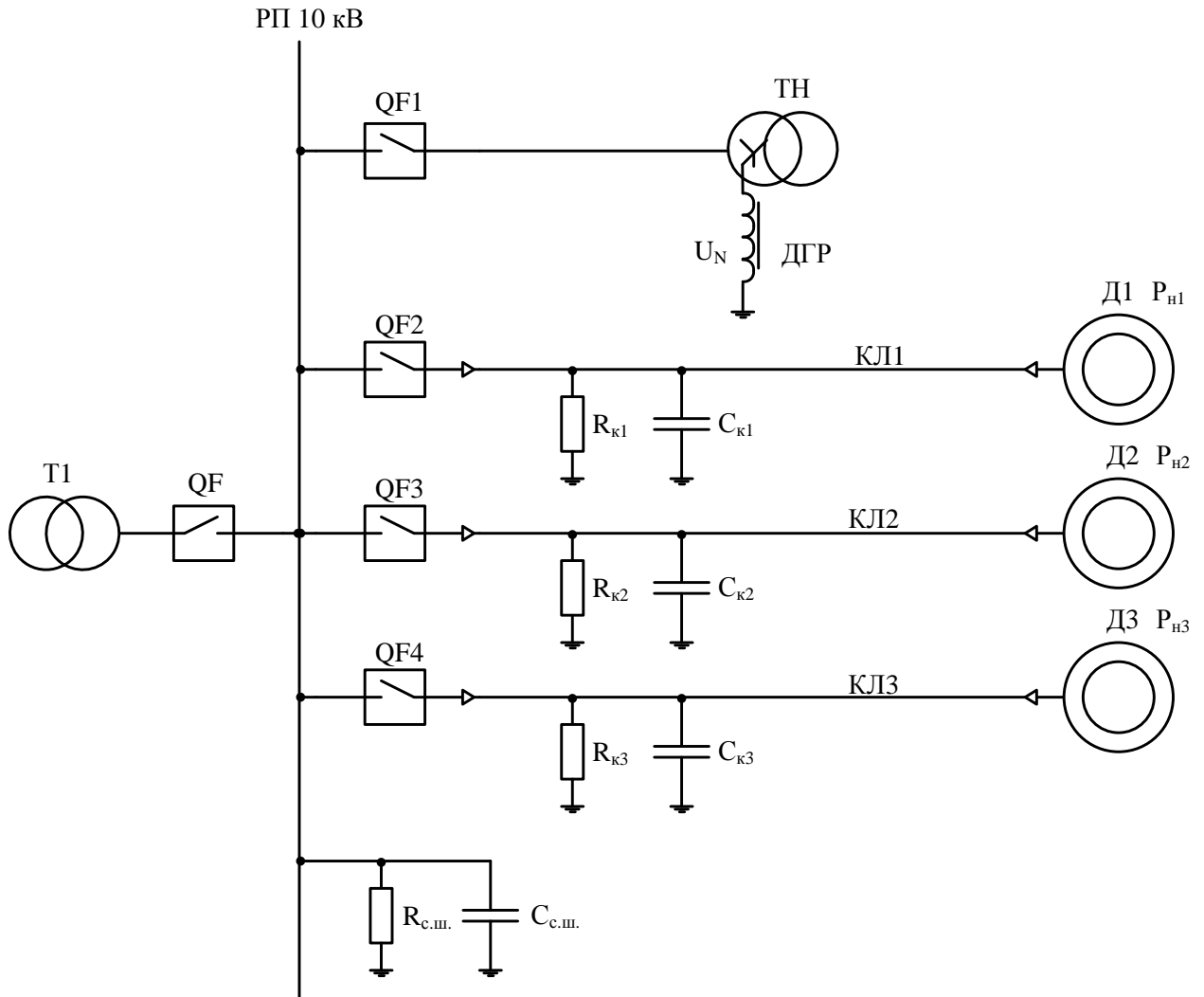


Рисунок 3.1 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10 кВ: Д1, Д2, Д3 – двигательная нагрузка; Т1 – силовой трансформатор; ТН – трансформатор напряжения; ДГР – дугогасящий реактор; КЛ1-КЛ3 – кабельные линии;  $C_{к1}$ – $C_{к3}$  – емкость кабельных линий по отношению к земле;  $R_{к1}$  –  $R_{к3}$  – активные сопротивления изоляции кабельных линий по отношению к земле;  $C_{с.ш.}$ ,  $R_{с.ш.}$  – емкость и активное сопротивление изоляции секций шин по отношению к земле.

Сеть в режиме однофазного замыкания на землю находится в резонансном режиме, т.е. разбалансировка дугогасящего реактора отсутствует. Отключение нагрузки происходит вакуумным выключателем. Срез тока, который

происходит в вакуумной камере выключателя, приводит к появлению остаточного тока в дугогасящем реакторе ( $i_{ост}$ ).

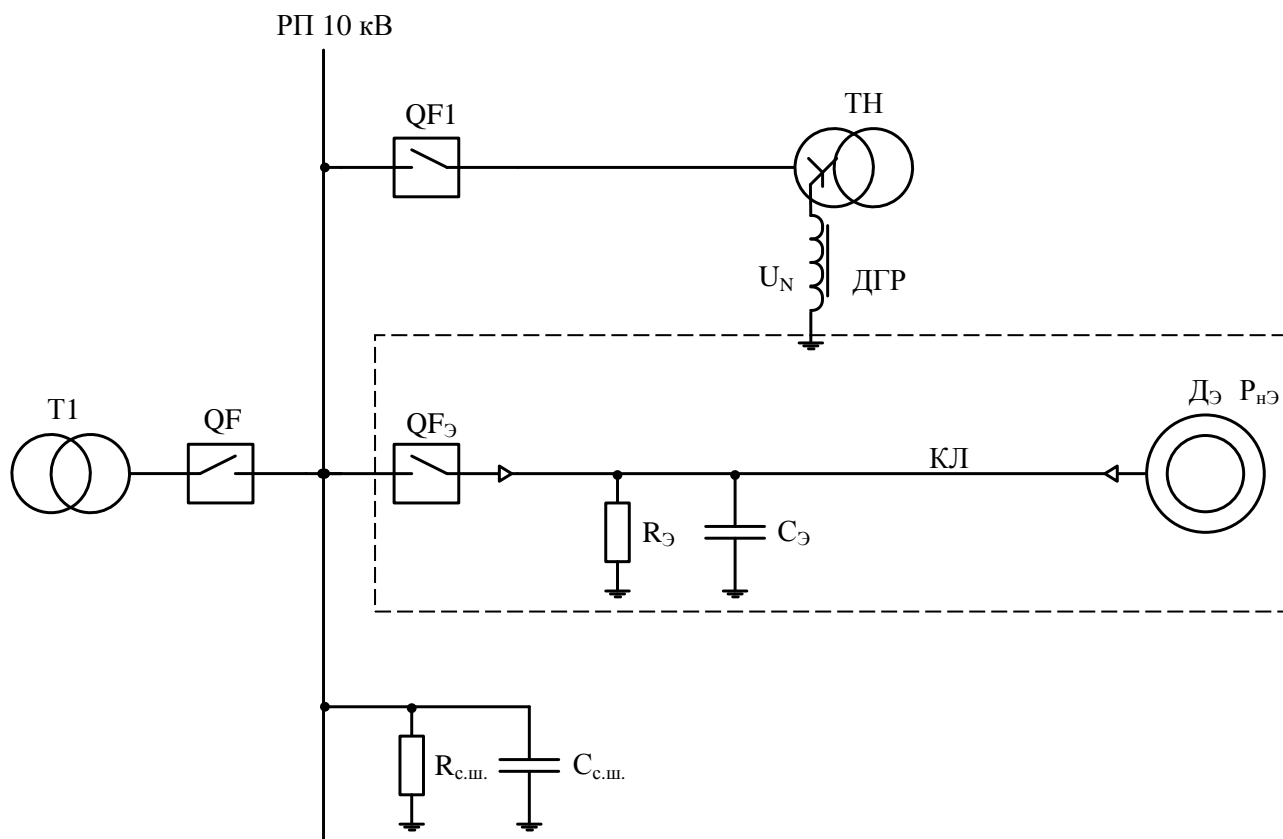


Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10 кВ в случае группового отключения нагрузки:  $C_э = C_{к1} + C_{к2} + C_{к3}$  – эквивалентная емкость кабельной линии РП;  $\frac{1}{R_э} = \frac{1}{R_{K1}} + \frac{1}{R_{K2}} + \frac{1}{R_{K3}}$  – эквивалентная проводимость изоляции кабельных линий;  $P_{нэ} = P_{н1} + P_{н2} + P_{н3}$  – эквивалентная двигательная нагрузка РП.

Величина этого тока зависит от характера нагрузки, то есть от коэффициента мощности нагрузки ( $\cos \varphi$ ) и от угла среза тока  $\psi$  (рис. 3.3).

Ток среза ( $i_{ср.}$ ) по разным источникам колеблется от 2,5 до 14 А [6, 36, 57, 59, 61]. Так как, в основном, нагрузка, которую отключают вакуумные выключатели, – это высоковольтные электродвигатели с мощностью от 320 кВт до 2000 кВт и силовые трансформаторы с мощностью от 400 кВА до 2500 кВА, то

угол среза (при токе среза от 2,5 до 14 А) будет находиться в пределах  $5 \div 20^0$  [59, 61]. Данный процесс иллюстрируется с помощью графиков, представленных на рис. 3.3.

Мгновенное значение перенапряжений, возникающих на секциях шин, можно оценить с помощью выражения [4]:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= e_a - u_N \\ u_b &= e_b - u_N \\ u_c &= e_c - u_N \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

При отключении нагрузки вакуумным выключателем от секции шин, по обмотке ДГР будет протекать остаточный индуктивный ток  $i_{L.ост}$ , в результате в обмотке ДГР будет накапливаться магнитная энергия:

$$W_M = \frac{L_{ДГР} \cdot i_{L.ост}^2}{2}, \quad (3.2)$$

где  $i_{L.ост}$  – остаточный ток,  $L_{ДГР}$  – индуктивность ДГР.

Магнитная энергия запасается в ДГР, затем преобразуется в энергию электрического поля емкости, образованную между секциями шин подстанции и землей ( $C_{с.ш.}$ ). Величину этой энергии можно определить по выражению:

$$W_{\text{Э}} = \frac{C_{с.ш.} \cdot u_N^2}{2}, \quad (3.3)$$

где  $u_N$  – напряжение, возникающее на зажимах ДГР (напряжение смещения нейтрали);  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин.

Из равенства выражений 3.2 и 3.3 можем получить формулу для напряжения, возникающего на зажимах ДГР:

$$u_N = i_{L.ост} \cdot \sqrt{\frac{L_{ДГР}}{C_{с.ш.}}}. \quad (3.4)$$

Принимая во внимание, что в определенный момент ЭДС внешнего источника электрической энергии может быть равна нулю ( $e_a = 0$ ,  $e_b = 0$ ,  $e_c = 0$ ), можно предположить, что максимальное напряжение, возникающее на секциях шин, равно напряжению на зажимах ДГР.

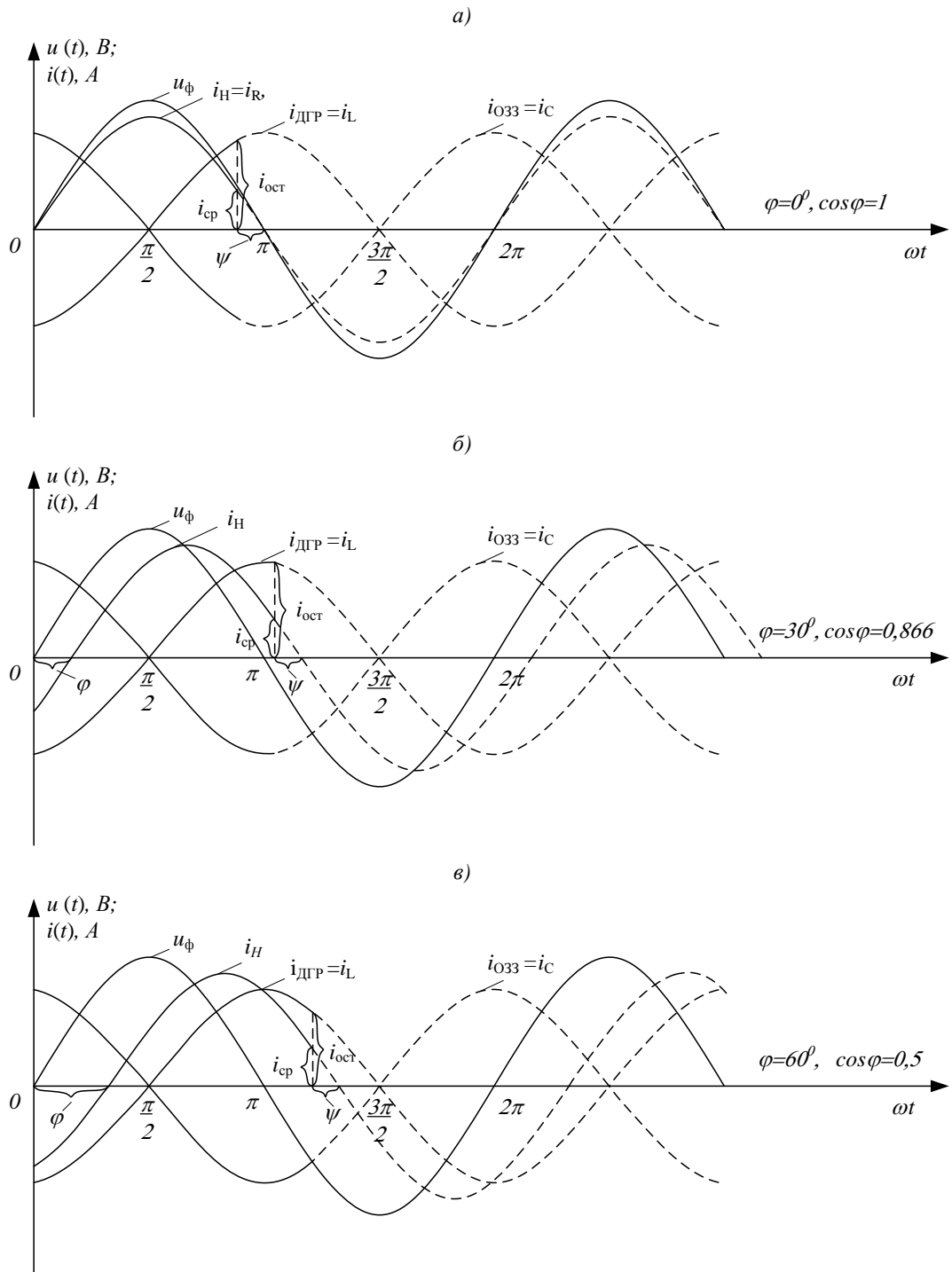


Рисунок 3.3 – Процесс появления остаточного тока в обмотке ДГР после группового отключения нагрузки вакуумным выключателем:  $u_\phi$  – напряжение на реакторе, равное фазному напряжению,  $i_H$  – ток нагрузки,  $i_L$  – ток ДГР,  $i_{O33}$  – ток однофазного замыкания на землю,  $i_{cp}$  – ток среза в вакуумной камере выключателя,  $i_{ост}$  – остаточный ток ДГР,  $\psi$  – фаза отключения (угол среза),  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением

Следовательно, определив величину напряжения на зажимах ДГР, можно по выражению 3.1 определить и величину максимальных перенапряжений, которые возникают на секциях шин подстанций, т.е. в узле электрических нагрузок.

По рис. 3.3 видно, что остаточный ток в ДГР может превосходить ток среза в несколько раз и будет определяться следующим выражением:

$$i_{\text{ост}} = I_{\text{мДГР}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \varphi\right) \quad (3.5)$$

Также по рис. 3.3 можно определить напряжение на зажимах реактора в момент коммутации:

$$u(0_+) = U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \quad (3.6)$$

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. Если сеть будет находиться в режиме перекомпенсации, что приведет к росту индуктивного тока, протекающего через ДГР, а, следовательно, к росту остаточного тока в ДГР, то это приведет к дальнейшему росту перенапряжений на секциях шин подстанций. Недокомпенсация емкостной составляющей  $i_{\text{ОЗЗ}}$  приведет к снижению остаточного тока, протекающего через ДГР.

Анализ графиков, представленных на рис. 3.3, указывает на то, что снижение коэффициента мощности приводит к снижению остаточного тока, протекающего в ДГР, а, следовательно, к снижению перенапряжений на секциях шин.

Таким образом, основными факторами, влияющими на перенапряжения в УЭН, являются остаточный ток ДГР, его индуктивность, присоединенная емкость и емкость секции шин. Для более детального изучения влияния указанных факторов на величину перенапряжения в УЭН выполним математическое моделирование данного процесса.

### 3.3 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН сети с компенсированной нейтралью

При математическом моделировании принимаем ряд допущений:

- 1 Межвитковую емкость в ДГР не учитываем, ввиду ее незначительности – 8% от емкости фазы по отношению к земле.
- 2 Обмотка ДГР является линейной цепью.
- 3 В диапазоне частот от 50 Гц до 125 КГц индуктивность обмотки ДГР остается практически постоянной [25].

В соответствии с приведенными выше допущениями, а также в связи с тем, что на секциях шин максимальные перенапряжения возникают при отключении нагрузки в режиме ОЗЗ, схема замещения обмотки ДГР с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид:

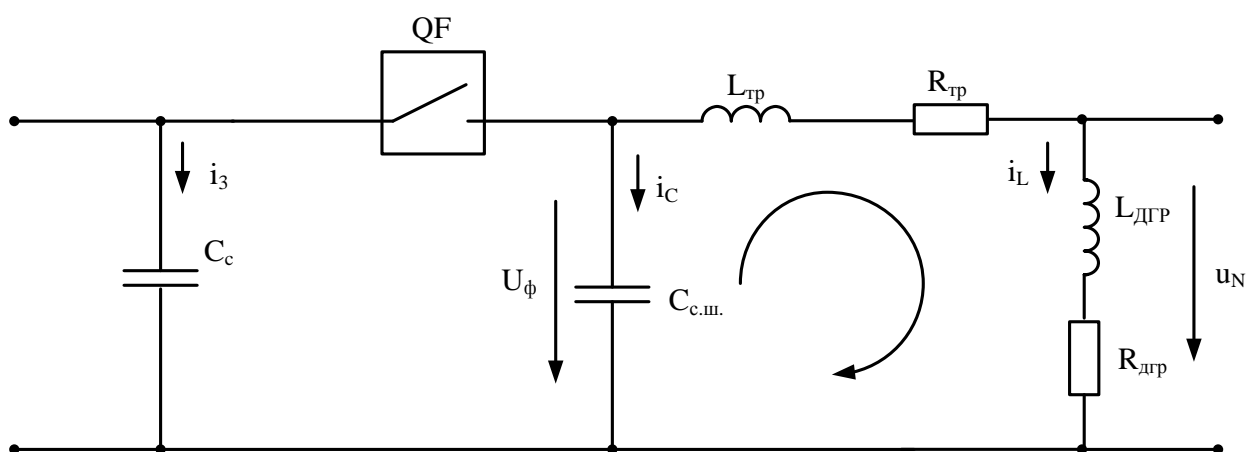


Рисунок 3.4 – Схема замещения УЭН сети с компенсированной нейтралью:

$C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность силового трансформатора напряжения с выводом нейтральной точки, к которой подключается ДГР;  $R_{тр}$  – активное сопротивление трансформатора;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора,  $C_c$  – емкость распределительной сети.

В связи с тем, что индуктивность обмотки трансформатора намного меньше индуктивности дугогасящего реактора ( $L_{тр} \ll L_{ДГР}$ ), при моделировании данную величину не учитываем. Активное сопротивление реактора и активное сопротивление трансформатора складываем ( $R_{тр} + R_{ДГР}$ ) – данную величину будем считать активным сопротивлением ДГР –  $R_{ДГР}$ . Поэтому однофазная схема замещения обмотки ДГР будет иметь вид:

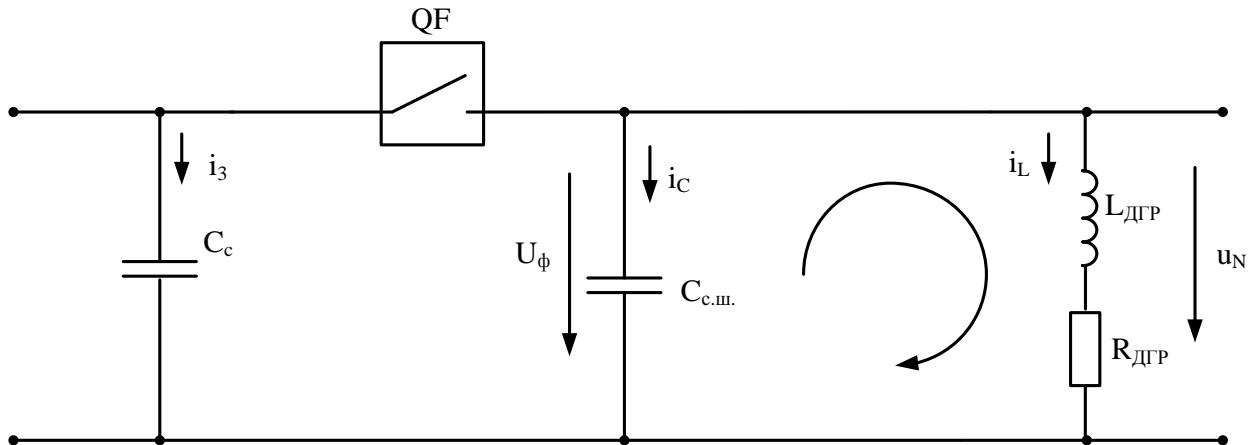


Рисунок 3.5 – Схема замещения УЭН сети с компенсированной нейтралью:  $C_{с.ш}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора,  $C_{с}$  – емкость распределительной сети.

Для данной схемы определим начальные условия.

В соответствии с первым и вторым законами коммутации получаем:

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_{C_{с.ш.}} \\ i_L(0_+) &= i_L(0_-) = i_{ост} \\ i_{ост} &= I_{мфДГР} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \varphi\right) \\ u_{C_{с.ш.}}(0_+) &= u_{C_{с.ш.}}(0_-) \\ u_N(0_-) &= U_{мф} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Далее по законам Кирхгофа составляем систему уравнений колебательного  $R_{ДГР}$ ,  $L_{ДГР}$ ,  $C_{с.ш.}$  – контура для полных токов и напряжений:

$$\left. \begin{aligned} u_L + u_R - u_{C_{с.ш.}} &= 0 \\ u_{R_{дгр}} &= i_L \cdot R_{дгр} \\ u_L &= L_{дгр} \cdot \left( \frac{di_L}{dt} \right) \\ i_L &= -i_C \\ i_C &= C_{с.ш.} \cdot \left( \frac{du_{C_{с.ш.}}}{dt} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

ГДЕ  $u_{C_{с.ш.}} = u_N$ .

Решая систему дифференциальных уравнений (3.8) относительно напряжения  $u_N$  на зажимах дугогасящего реактора, получаем следующее уравнение:

$$u_N = L_{дгр} \cdot \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R_{дгр}, \quad (3.9)$$

откуда, в соответствии с пятым и с учетом четвертого уравнения системы (3.8), получаем:

$$u_N = -L_{дгр} \cdot C_{с.ш.} \cdot \frac{d^2 u_N}{dt^2} - R_{дгр} \cdot C_{с.ш.} \cdot \frac{du_N}{dt}. \quad (3.10)$$

Решение уравнения (3.10) будет иметь вид[4]:

$$u_N(t) = u_{Nnp}(t) + u_{Ncb}(t), \quad (3.11)$$

где  $u_{Nnp}(t)$  – значение напряжения смещения нейтрали в установившемся режиме,  $u_{Ncb}(t)$  – свободная составляющая напряжения смещения нейтрали, характеризующая переходный процесс.

Принужденная составляющая напряжения смещения нейтрали  $u_{Nnp}(t)$  после отключения нагрузки равна нулю. Полное напряжение смещения нейтрали будет определяться лишь свободной составляющей:

$$u_N(t) = u_{Ncb}(t) \quad (3.12)$$

Для оценки характера переходного процесса решим уравнение (3.10) относительно свободной составляющей полного напряжения:

$$u_{Ncb}(t) = -L_{дгр} \cdot C_{с.ш.} \cdot \frac{d^2 u_{Ncb}}{dt^2} - R_{дгр} \cdot C_{с.ш.} \cdot \frac{du_{Ncb}}{dt}. \quad (3.13)$$

Дальнейшие математические выкладки приведены в прил. 1. Таким образом, переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сети с компенсированной нейтралью, в результате группового отключения нагрузки описываются следующим уравнением:

$$u_{N_{CB}}(t) = \frac{U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta \cdot t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \operatorname{arcctg} \left[ \frac{-(i_{ост} - U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{с.ш.})}{C_{с.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \right\} \quad (3.14)$$

В свою очередь, напряжения на секции шин, согласно системе уравнений 3.1, будут иметь следующий вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{m\Phi A} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{N_{CB}} \\ u_B(t) &= U_{m\Phi B} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{N_{CB}} \\ u_C(t) &= U_{m\Phi C} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{N_{CB}} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Как было отмечено выше, величина перенапряжений зависит от множества факторов, которые не всегда поддаются учету. Поэтому результаты расчетов, выполненных по выражению (3.14), имеют лишь приближенный характер.

Анализ литературных источников [75,76] показывает, что на современных горно-металлургических предприятиях токи однофазного замыкания на землю в зависимости от конфигурации сети могут изменяться от 2,5 до 60 А для сети 10 кВ. Поэтому для компенсации емкостных токов данной величины широко применяется дугогасящий реактор типа РЗДСОМ-380 квар, который имеет пять отпаяк. На I отпайке через ДГР протекает индуктивный ток величиной 26,5 А. На II, III, IV, V отпайках ДГР, соответственно, протекают следующие индуктивные токи: 33,5 А, 40 А, 46,5 А и 52 А

Также для компенсации емкостных токов ОЗЗ используются реакторы с автоматической компенсацией, которые компенсируют токи до 50 А. Соответственно, для более детального анализа переходных процессов, возникающих в УЭН, расчет перенапряжений выполним на примере ДГР типа РЗДСОМ-380 квар. В частности, реакторы такого типа используются на ОАО «АГК», ОАО «АНПЗ», ОАО «САЗ».

Исходя из этих данных, можно рассчитать индуктивное сопротивление реактора на каждой отпайке. Согласно паспортным данным активное сопротивление реактора равно 0,5 Ом. Следовательно, индуктивное сопротивление реактора равно полному сопротивлению реактора. Таким образом, индуктивное сопротивление реактора можно посчитать по формуле:

$$X_L = \frac{U_\phi}{I_{\text{ДГР}}} = \frac{U_\text{л}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ДГР}}}, \quad (3.16)$$

где  $U_\text{л} = 10000$  В,  $U_\phi = 5773,5$  В.

Зная индуктивное сопротивление реактора, можно рассчитать его индуктивность:

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f}, \quad (3.17)$$

где  $f = 50$  Гц;

В таблице 3.1 приведены данные по индуктивному сопротивлению и индуктивности данного реактора [62].

Таблица 3.1 – Индуктивные сопротивления реактора

№ отпайки	$U_\text{л}$ , В	$U_\phi$ , В	$I_\text{л}$ , А	$X_\text{л}$ , Ом	$f$ , Гц	$L_{\text{ДГР}}$ , Гн
I	10000	5773,5	26,5	217,87	50	0,693
II	10000	5773,5	33,5	172,34	50	0,549
III	10000	5773,5	40	144,34	50	0,459
IV	10000	5773,5	46,5	124,16	50	0,395
V	10000	5773,5	52	111,03	50	0,353

Как показывает анализ литературных источников [10, 26], емкость секции шин РП, РУ, ТП, ГПП находится в пределах 0,04÷0,06 мкФ. Поэтому для анализа переходных процессов, возникающих на секциях шин, принимаем среднее значение для емкости  $C_{\text{с.ш.}} = 0,05$  мкФ.

По выражению (3.13) были рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{\text{НСВ}}(t)$  с учетом того, что емкость секции шин составила  $C_{\text{с.ш.}} = 3 \cdot C_\phi = 3 \cdot 0,05 = 0,15$  мкФ.

Кратность перенапряжений при ОЗЗ для сетей 6-10 кВ определяется по формуле [10]:

$$K_{\pi} = \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{мф}}}, \quad (3.18)$$

где  $U_{\text{м}}$  – максимальное значение напряжения в переходном процессе;  $U_{\text{мф}}$  – амплитуда рабочего фазного напряжения.

На практике использование данной формулы для производственного и эксплуатационного персонала не совсем удобно, так как все оборудование: электрические двигатели, трансформаторы, коммутационные аппараты, кабельные линии, воздушные линии – выбираются на номинальное напряжение сети. Кроме того, результаты всех высоковольтных испытаний электрооборудования, воздушных и кабельных линий приводятся в процентном отношении к номинальному напряжению. Также следует отметить, что разница между амплитудой фазного напряжения и номинальным напряжением не превышает 18%, что в условиях максимальных перенапряжений практически не влияет на результат. Поэтому для оценки кратности КП, возникающих в УЭН, будем использовать следующую формулу:

$$K_{\pi} = \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (3.19)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети.

В табл. 3.2÷3.3 и в прил. 2 (табл. П2.1-П2.4) приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения напряжений, возникающих на секциях шин. Данные приведены в зависимости от угла среза тока  $\psi$  и угла сдвига фаз –  $\varphi$ . Из таблиц и графиков (рис. 3.6÷3.13), (прил. 3, рис. П3.1÷П3.4) видно, что если угол среза  $\psi = 10^{\circ}$ , то максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^{\circ}$  на V отпайке ДГР. Кратность КП на секциях шин в данных условиях может достигать 11,89 (рис. П3.2.) При угле сдвига фаз  $\varphi = 30^{\circ}$  максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин достигают соответственно значения  $10,6U_{\text{ном}}$ ,  $11,39U_{\text{ном}}$  (рис. 3.6–3.9).

Если угол среза  $\psi = 20^{\circ}$ , то максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 30^{\circ}$  на V отпайке ДГР. Кратность КП на секциях шин при этом может также достигать 11,89 (рис. 3.11-3.13).

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  $\varphi \approx 30^{\circ}$ . На I, II, III и IV отпайках при угле среза  $\psi = 20^{\circ}$  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 (табл. 3.2÷3.3), а время переходного процесса уменьшается, так как коэффициент затухания  $\delta$  – увеличивается. При угле сдвига фаз  $\varphi = 60^{\circ}$  ( $\cos\varphi = 0,5$ ) максимальная кратность коммутационных перенапряжений составляет 9,43 (прил. 3, рис. ПЗ.4) – данный режим достаточно редко, но встречается на практике, поэтому результаты теоретических исследований необходимо принимать во внимание. Частота коммутационного импульса и время переходного процесса практически не зависят от угла сдвига фаз. Из графиков (рис. 3.6 – 3.13) видно, что затухание перенапряжений на зажимах ДГР и на секциях шин происходит очень медленно за счет небольшого сопротивления ДГР.

В настоящее время для ограничения коммутационных 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.

Следовательно, необходимо рассмотреть математические модели, характеризующие влияние резистора на величину и характер переходного процесса при коммутационных перенапряжениях в УЭН.

Таблица 3.2 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ отпайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L, А$	$C_{с.ш.}, мкФ$	$f_{к.и.}, Гц$	$u_{N.св.маx}(t), В$	$u_{Амаx}(t), В$	$u_{Вмаx}(t), В$	$u_{Смаx}(t), В$	$K = u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A = u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{Вмаx}/U_{л}$	$K_C = u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	75750	83303	83456	83863	7,58	8,33	8,35	8,39
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	84291	91837	92009	92316	8,43	9,18	9,20	9,23
3	10000	5773,5	40	0,15	606	93039	100370	100237	100514	9,30	10,04	10,02	10,05
4	10000	5773,5	46,5	0,15	645	100198	107494	107778	107474	10,02	10,75	10,78	10,75
5	10000	5773,5	52	0,15	684	105969	113866	113502	113619	10,60	11,39	11,35	11,36

Таблица 3.3 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=20^0$  и угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ отпайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L, А$	$C_{с.ш.}, мкФ$	$f_{к.и.}, Гц$	$u_{N.св.маx}(t), В$	$u_{Амаx}(t), В$	$u_{Вмаx}(t), В$	$u_{Смаx}(t), В$	$K = u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A = u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{Вмаx}/U_{л}$	$K_C = u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	79355	86895	86363	87405	7,94	8,69	8,64	8,74
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	88073	95946	96155	96088	8,81	9,59	9,62	9,61
3	10000	5773,5	40	0,15	606	97435	104764	104464	104740	9,74	10,48	10,45	10,47
4	10000	5773,5	46,5	0,15	645	104933	112166	112586	112302	10,49	11,22	11,26	11,23
5	10000	5773,5	52	0,15	684	111002	118931	118440	118786	11,10	11,89	11,84	11,88

$u_{\text{Нсв}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.6 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

 $u_{\text{В}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.7 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

$u_A(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.8 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДТР}}=52 \text{ А}$ )

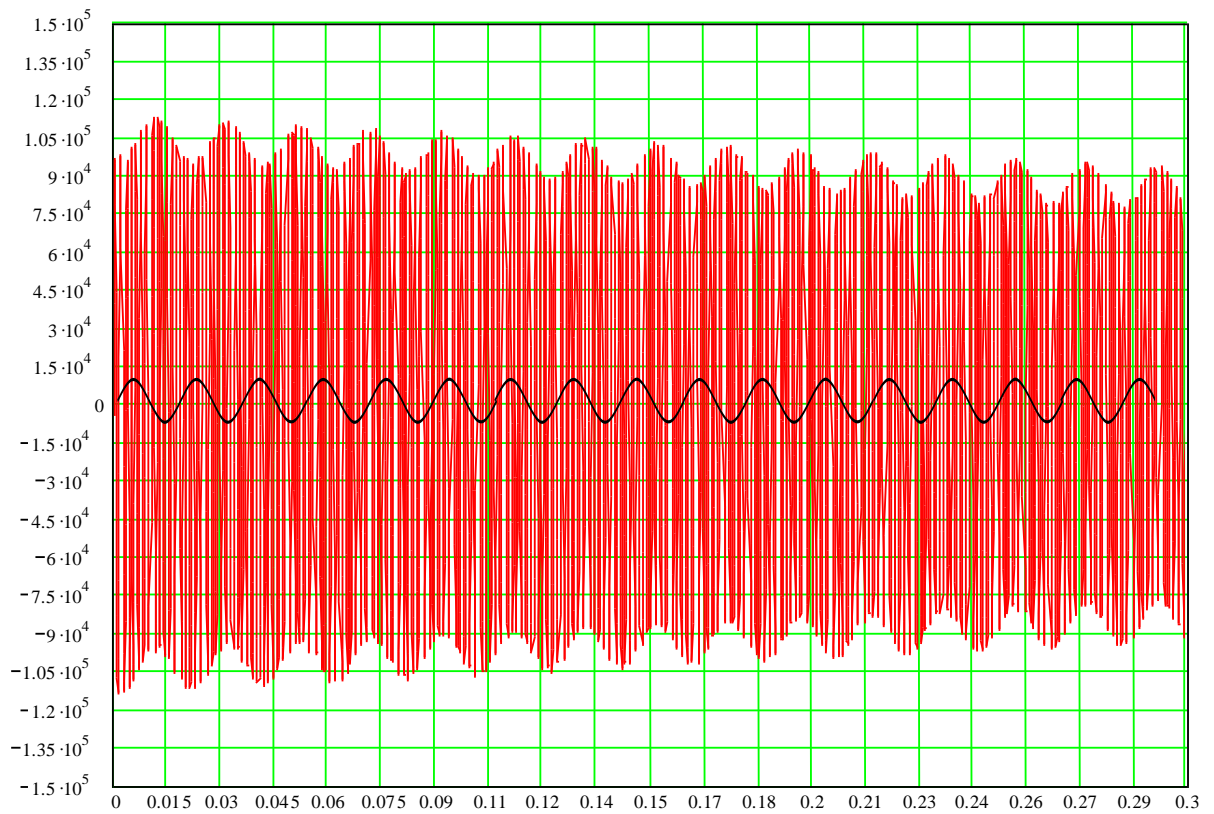
 $u_C(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.9 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДТР}}=52 \text{ А}$ )

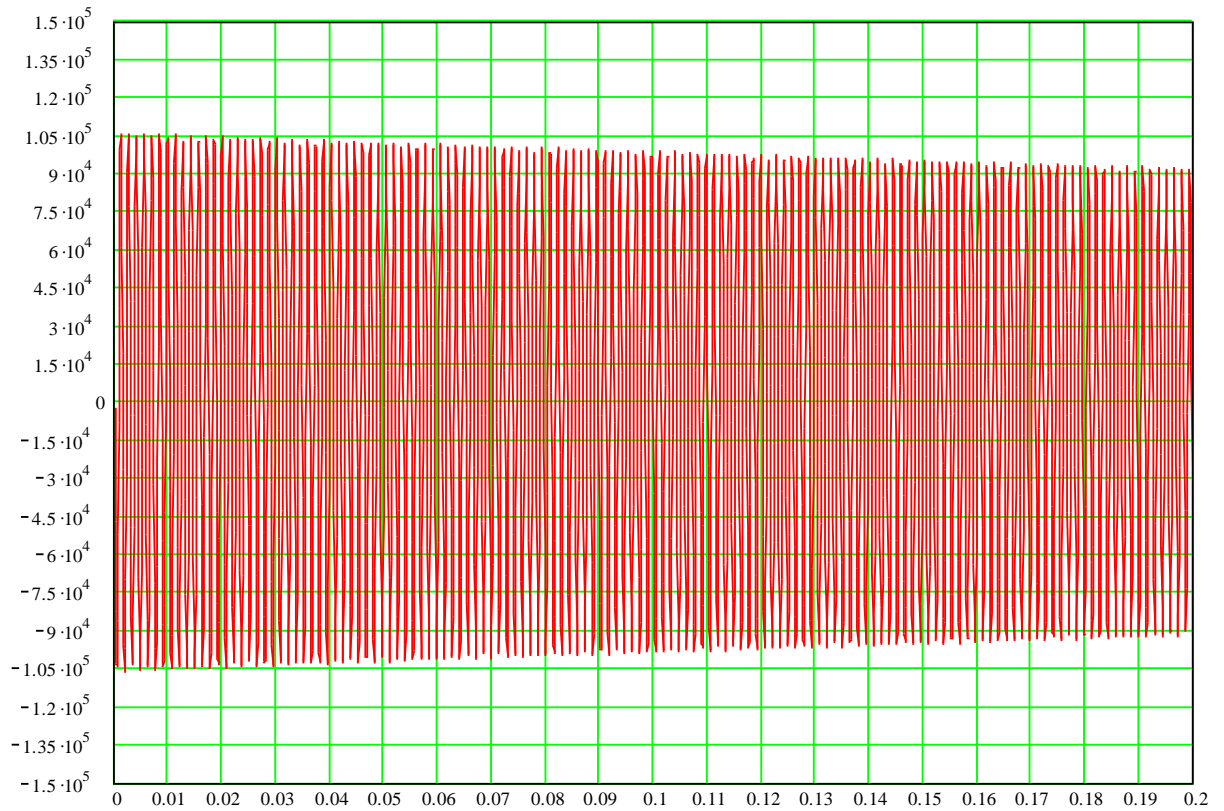
$u_{\text{NCB}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.10 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

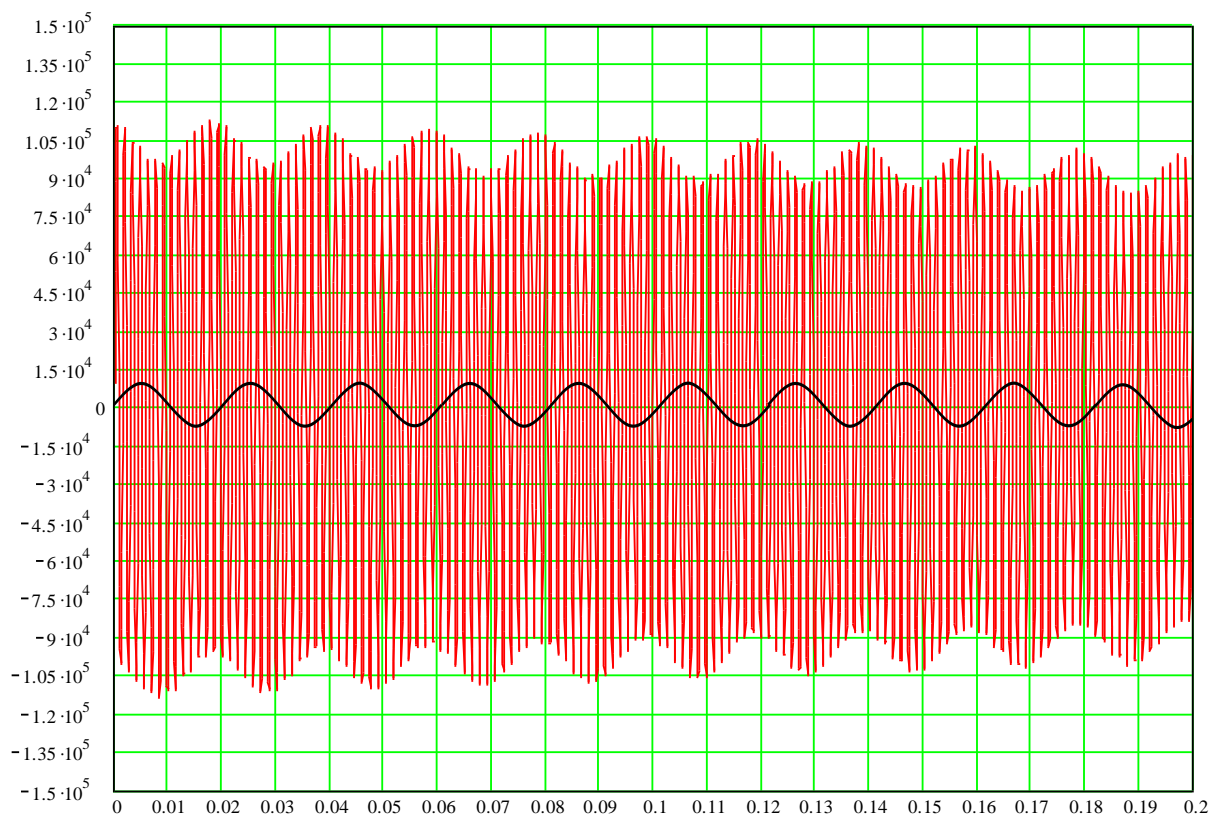
 $u_{\text{В}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.11 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

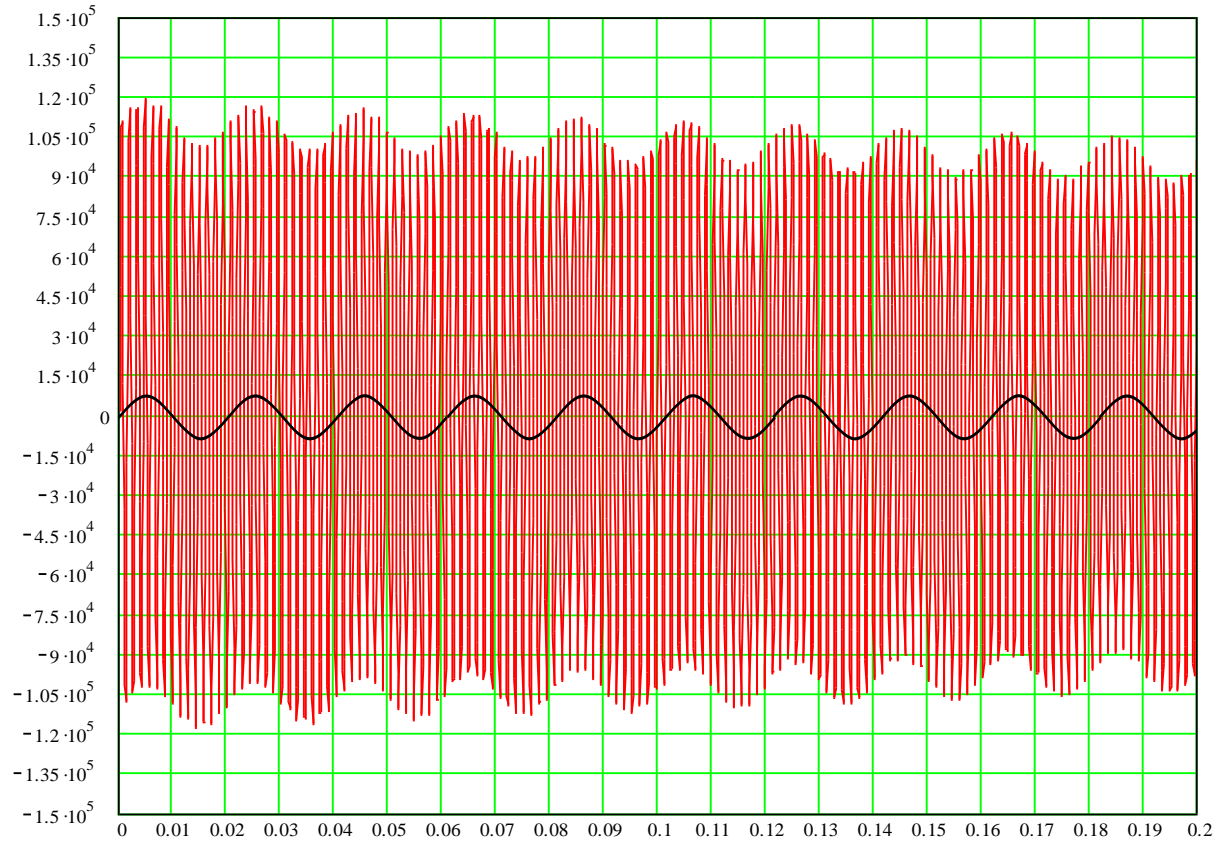
$u_A(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.12 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

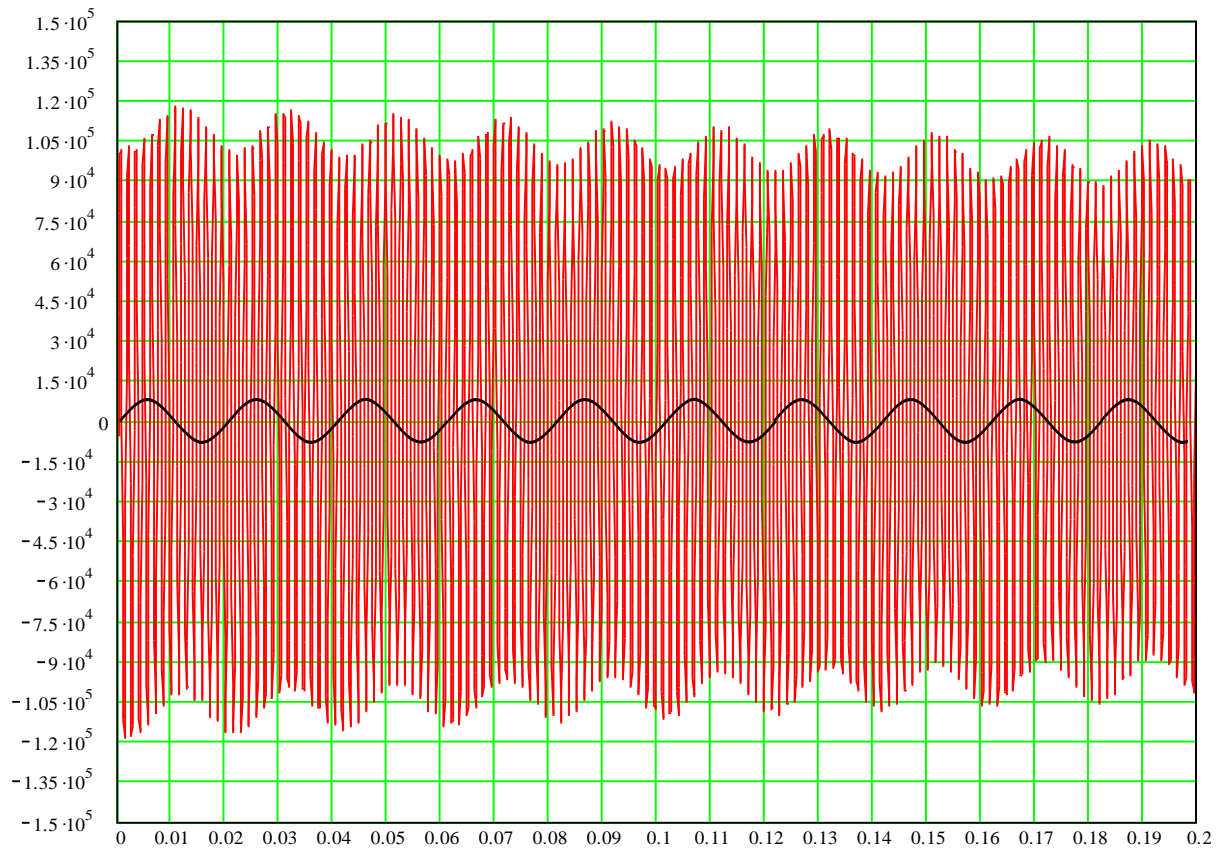
 $u_C(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.13 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

### 3.4 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в УЭН сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор и резистор и частичным заземлением через резистор

Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 6-10 кВ с использованием заземления нейтрали через дугогасящий реактор и резистор в случае группового отключения нагрузки в результате ОЗЗ имеет вид:

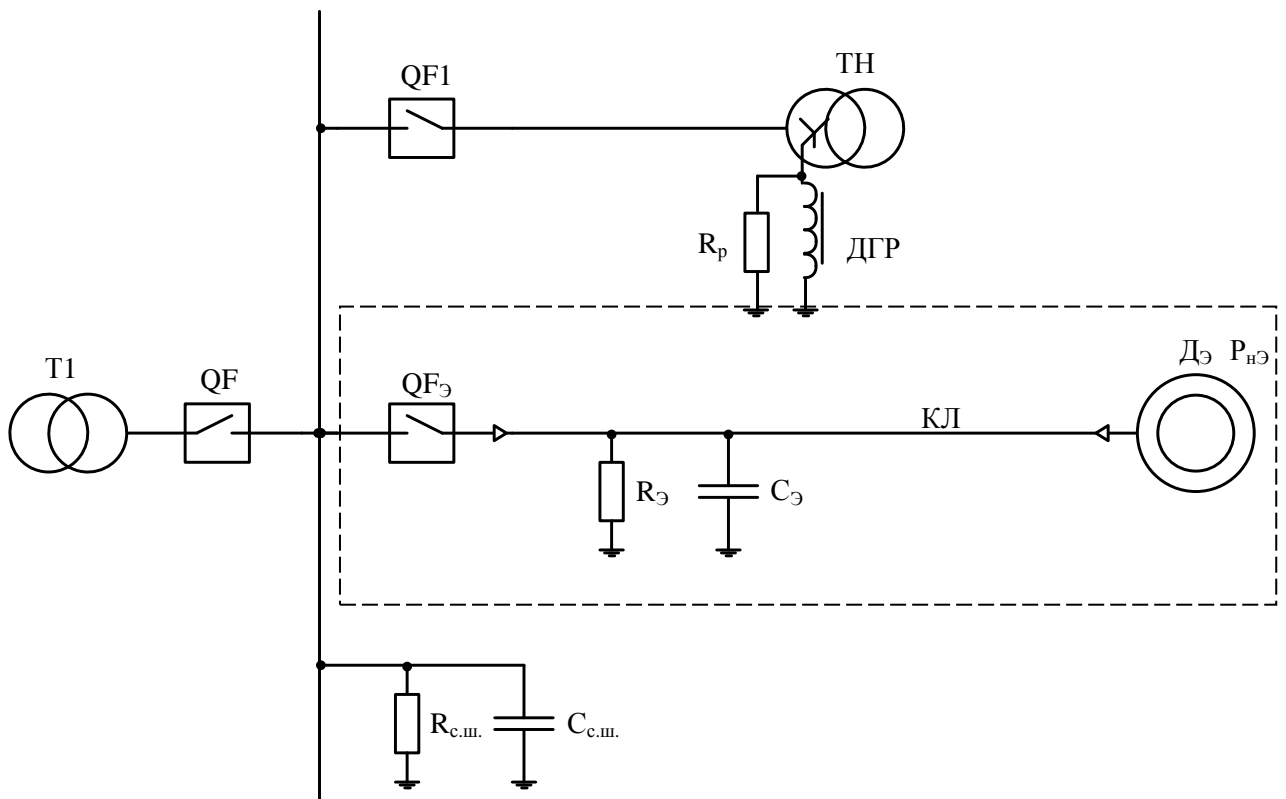


Рисунок 3.14 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10

кВ при групповом отключении нагрузки:  $C_{\text{Э}} = C_{\text{К1}} + C_{\text{К2}} + C_{\text{К3}}$  – эк-

вивалентная емкость кабельной линии РП;  $\frac{1}{R_{\text{Э}}} = \frac{1}{R_{\text{К1}}} + \frac{1}{R_{\text{К2}}} + \frac{1}{R_{\text{К3}}}$

– эквивалентная проводимость изоляции кабельных линий РП;

$P_{\text{нЭ}} = P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + P_{\text{н3}}$  – эквивалентная двигательная нагрузка

РП;  $R_{\text{с.ш.}}$  – активное сопротивление секции шин;  $C_{\text{с.ш.}}$  – ем-

кость секции шин;  $R_{\text{р}}$  – активное сопротивление резистора.

При математическом моделировании принимаем допущения, которые были описаны в пункте 3.3 данной работы:

В соответствии с этими допущениями, схема замещения при резистивно-индуктивном заземлении нейтрали с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид, представленный на рисунке 3.15.

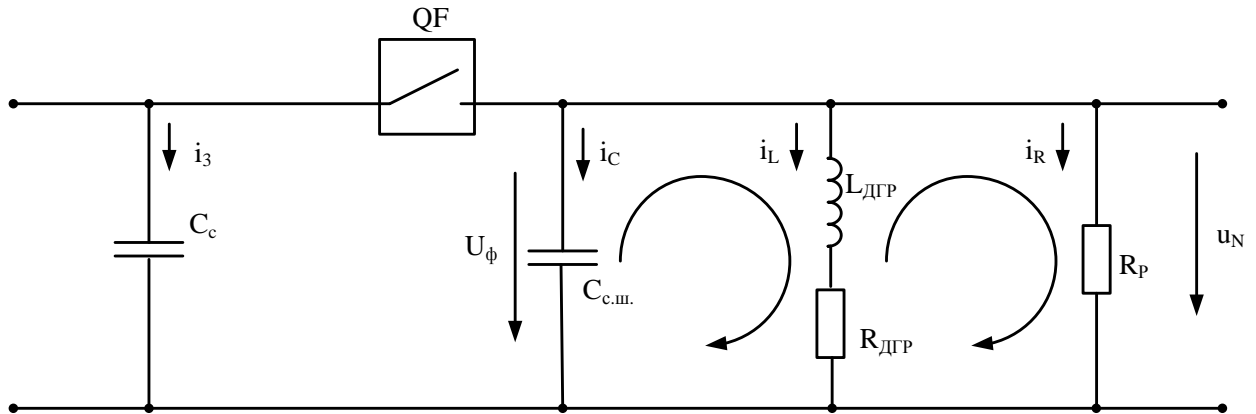


Рисунок 3.15 – Схема замещения УЭН при резистивно-индуктивном заземлении нейтрали сети:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора;  $R_p$  – активное сопротивление резистора;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Для данной схемы определим начальные условия.

В соответствии с первым и вторым законами коммутации получаем:

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_{C_{с.ш.}} = u_p \\ i_L(0_+) &= i_L(0_-) = i_{ост} \\ i_{ост} &= I_{мФДГР} \cdot \sin \varphi \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \varphi \right) \\ u_{C_{с.ш.}}(0_+) &= u_{C_{с.ш.}}(0_-) \\ u_N(0_-) &= U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Далее по законам Кирхгофа составляем систему дифференциальных уравнений полных токов и напряжений колебательного контура для двухконтурной схемы замещения  $R_{\text{ДГР}}, L_{\text{ДГР}}, C_{\text{с.ш.}}$  и  $R_{\text{ДГР}}, L_{\text{ДГР}}, R_{\text{Р}}$ :

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{C}} + i_{\text{L}} + i_{\text{R}} &= 0 \\ u_{\text{L}_{\text{ДГР}}} + u_{\text{R}_{\text{ДГР}}} - u_{\text{C}_{\text{с.ш.}}} &= 0 \\ u_{\text{R}_{\text{Р}}} - u_{\text{R}_{\text{ДГР}}} - u_{\text{L}_{\text{ДГР}}} &= 0 \\ i_{\text{R}} &= \frac{u_{\text{R}_{\text{Р}}}}{R_{\text{Р}}} \\ i_{\text{L}} &= \frac{1}{L_{\text{ДГР}}} \int u_{\text{L}_{\text{ДГР}}} dt \\ i_{\text{L}} &= \frac{u_{\text{R}_{\text{ДГР}}}}{R_{\text{ДГР}}} \\ i_{\text{C}} &= C_{\text{с.ш.}} \frac{du_{\text{C}_{\text{с.ш.}}}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Где  $u_{\text{C}_{\text{с.ш.}}} = u_{\text{N}}$ .

Решая данную систему дифференциальных уравнений относительно свободных составляющих полных напряжений, получим:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{с.ш.}} \cdot \frac{du_{\text{N}_{\text{св}}}}{dt} + \frac{1}{L_{\text{ДГР}}} \int u_{\text{L}_{\text{ДГР}_{\text{св}}}} dt + \frac{u_{\text{R}_{\text{св}}}}{R_{\text{Р}}} &= 0 \\ -u_{\text{N}_{\text{св}}} + u_{\text{L}_{\text{ДГР}_{\text{св}}}} + \frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}}} \int u_{\text{L}_{\text{ДГР}_{\text{св}}}} dt &= 0 \\ -\frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}}} \int u_{\text{L}_{\text{ДГР}_{\text{св}}}} dt - u_{\text{L}_{\text{ДГР}_{\text{св}}}} + u_{\text{R}_{\text{св}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Дальнейшие математические выкладки приведены в прил. 4.

Таким образом, переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор и параллельно ему включенным резистором, в результате группового отключения нагрузки описываются следующим уравнением:

$$u_{N_{CB}}(t) = \frac{U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \operatorname{arccctg} \left[ -\frac{(i_{ocT} \cdot R_p + U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{c.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} + \frac{\delta}{\omega_0} \right] \right\} \quad (3.23)$$

При определенных условиях, в частности, при снижении сопротивления резистора, включенного в нейтраль, корни характеристического уравнения становятся отрицательными разными, поэтому переходные процессы описываются следующим уравнением (математические выкладки приведены в прил. 5):

$$u_{N_{CB}} = \left( -\frac{(i_{ocT} \cdot R_p + U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{c.ш.} \cdot (p_1 - p_2)} - \frac{p_2 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{p_1 - p_2} \right) \cdot e^{p_1 t} + \left\{ U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) - \left( -\frac{(i_{ocT} \cdot R_p + U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{c.ш.} \cdot (p_1 - p_2)} - \frac{p_2 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{p_1 - p_2} \right) \right\} \cdot e^{p_2 t} \quad (3.24)$$

В свою очередь, напряжения на секции шин, согласно системе уравнений 3.1, будут иметь следующий вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{m\Phi A} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{N_{CB}} \\ u_B(t) &= U_{m\Phi B} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{N_{CB}} \\ u_C(t) &= U_{m\Phi C} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{N_{CB}} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Расчет перенапряжений, возникающих на секциях шин сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, выполнен на примере ДГР типа РЗДСОМ-380 квар.

Для исследования влияния активного сопротивления, включенного в нейтраль системы электроснабжения параллельно ДГР, на КП на секциях шин были использованы резисторы с активным сопротивлением: 5000, 2500, 1000, 500, 200 Ом, так как указанный класс резисторов используется для заземления нейтрали сетей напряжением 6(10) кВ [54].

По выражениям (3.23) и (3.24) были рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{N_{CB}}(t)$ . В табл. 3.4 и табл. П6.1÷П6.5 (прил. 6) приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения перенапряжений, возникающих на сек-

циях шин. Данные приведены в зависимости от угла среза тока  $\psi$  и от угла сдвига фаз  $\varphi$ . Анализ таблиц и графиков (рис. 3.16 ÷ 3.23), (прил. 7, рис. П7.1 ÷ П7.12) показывает, что при угле среза  $\psi = 10^0$  максимальные перенапряжения возникают, если угол сдвига фаз  $\varphi = 0^0$  (активная нагрузка) на V отпайке ДГР при использовании резистора в нейтрали сети сопротивлением 5000 Ом. Кратность КП на секциях шин в данных условиях может достигать 9,49 (рис. П.7.2). Таким образом, включение резистора в нейтраль сети приводит к снижению КП на секциях шин. Из графиков (рис. 3.20 ÷ 3.23) следует, что включение резистора с сопротивлением 500 Ом приводит к снижению перенапряжения на зажимах ДГР до 28621 В, а на секциях шин до 36818 В переходный процесс носит аperiodический характер. Также включение резистора в нейтраль сети параллельно дугогасящему реактору приводит к резкому снижению времени переходного процесса, так как увеличивается коэффициент затухания  $\delta$ , что также можно увидеть на графиках (рис. 3.17÷3.19). Если угол среза  $\psi = 20^0$ , то максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 30^0$  на V отпайке ДГР с использованием резистора 5000 Ом. В этом случае кратность КП на секциях шин может достигать 9,52 (прил. 6 табл. П6.4), (рис. П.7.9÷П7.10). Это объясняется характером нагрузки (силовые трансформаторы и высоковольтные электрические машины). На I и III отпайках при углах  $\varphi = 30^0$ ,  $\psi = 20^0$  и сопротивлении резистора 200÷5000 Ом максимальная кратность перенапряжения на секциях шин находится в пределах 0,82–8,2 (табл. П6.4), где начальное значение соответствует току реактора  $I_L = 26,5$  А и сопротивлению резистора 200 Ом, а конечное значение соответствует току реактора  $I_L = 40$  А и сопротивлению резистора 5000 Ом. Таким образом, с ростом индуктивного сопротивления реактора и сопротивления резистора, включенного параллельно, кратность КП увеличивается.

Из графиков (рис. 3.16 ÷ 3.23), (прил. 7, рис. П7.1 ÷ П7.12) видно, что затухание перенапряжений на зажимах ДГР и на секциях шин происходит в 3000 раз быстрее, чем в сетях без резистора в нейтрали (рис. П3.5 ÷ П3.6).

Таблица 3.4 – Максимальные значения КП на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки}, Гц$	$u_{N.св.мах}(t),$	$u_{Амах}(t),$	$u_{Вмах}(t),$	$u_{Смах}(t),$	$K =$	$K_A =$	$K_B =$	$K_C =$
							В	В	В	В	$u_{N.св.мах}/U_{л}$	$u_{Амах}/U_{л}$	$u_{Вмах}/U_{л}$	$u_{Смах}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	465	55879	56902	62383	48352	5,59	5,69	6,24	4,84
3	10000	5773,5	40			588	71913	72936	78417	64386	7,19	7,29	7,84	6,44
5	10000	5773,5	52			666	84629	85397	91284	77205	8,46	8,54	9,13	7,72
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	444	44276	45299	50780	36749	4,43	4,53	5,08	3,67
3	10000	5773,5	40			526	58671	59439	65327	51248	5,87	5,94	6,53	5,12
5	10000	5773,5	52			625	70652	71420	77308	63229	7,07	7,14	7,73	6,32
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000	200	26537	27305	33192	19113	2,65	2,73	3,32	1,91
3	10000	5773,5	40			354	37028	37796	43684	29605	3,70	3,78	4,37	2,96
5	10000	5773,5	52			455	45193	45705	51994	37880	4,52	4,57	5,20	3,79
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	-	15541	16054	22342	8228	1,55	1,61	2,23	0,82
3	10000	5773,5	40			-	22668	23180	29469	15354	2,27	2,32	2,95	1,54
5	10000	5773,5	52			-	28625	29137	35425	21311	2,86	2,91	3,54	2,13
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200	-	6778	10003	13717	8404	0,68	1,00	1,37	0,84
3	10000	5773,5	40			-	10110	10462	17049	8226	1,01	1,05	1,70	0,82
5	10000	5773,5	52			-	13031	13288	19971	8164	1,30	1,33	2,00	0,82

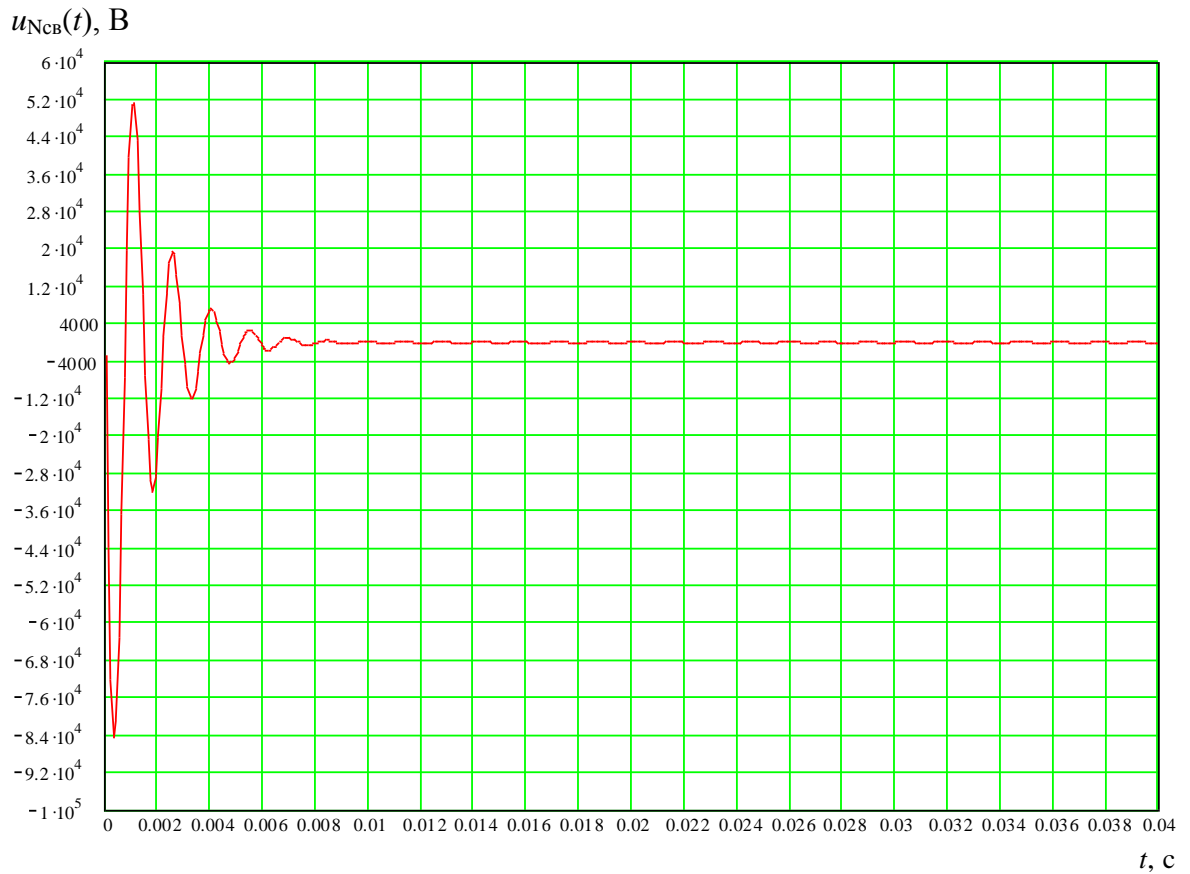


Рисунок 3.16 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)



Рисунок 3.17 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)

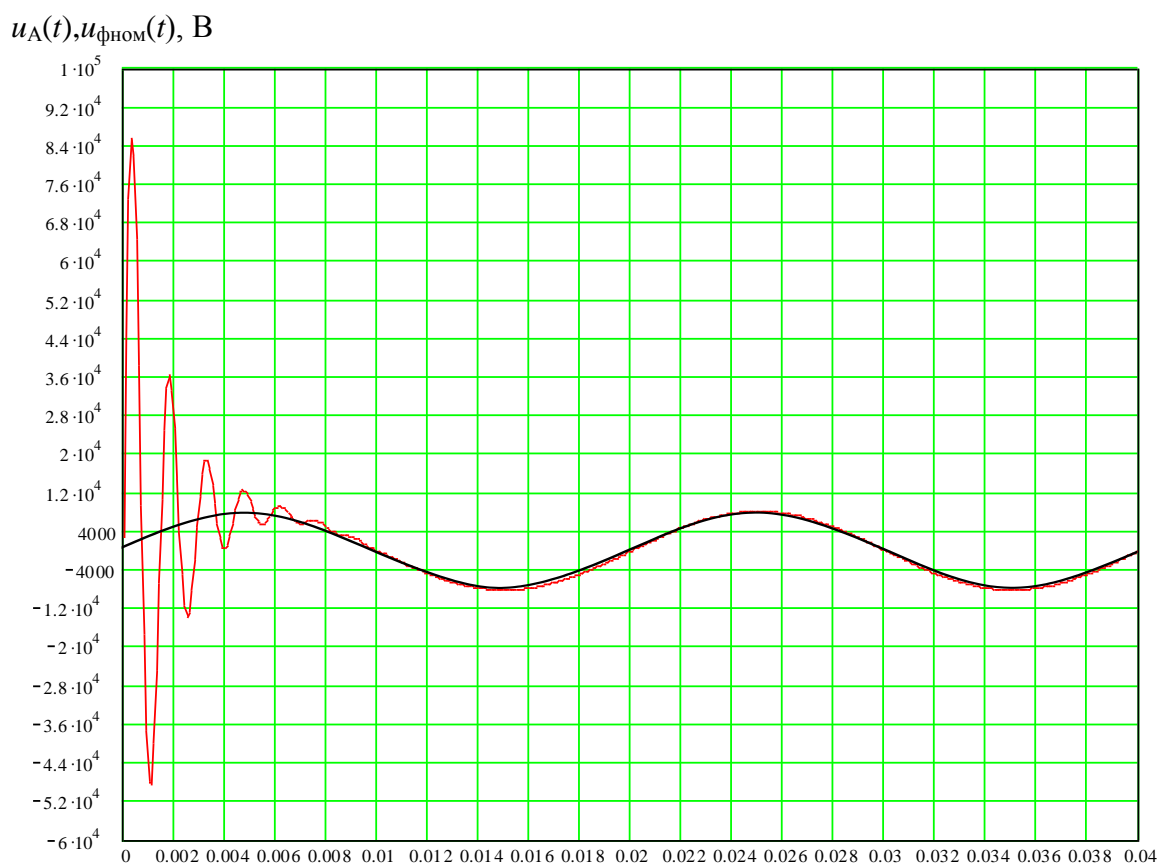


Рисунок 3.18 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

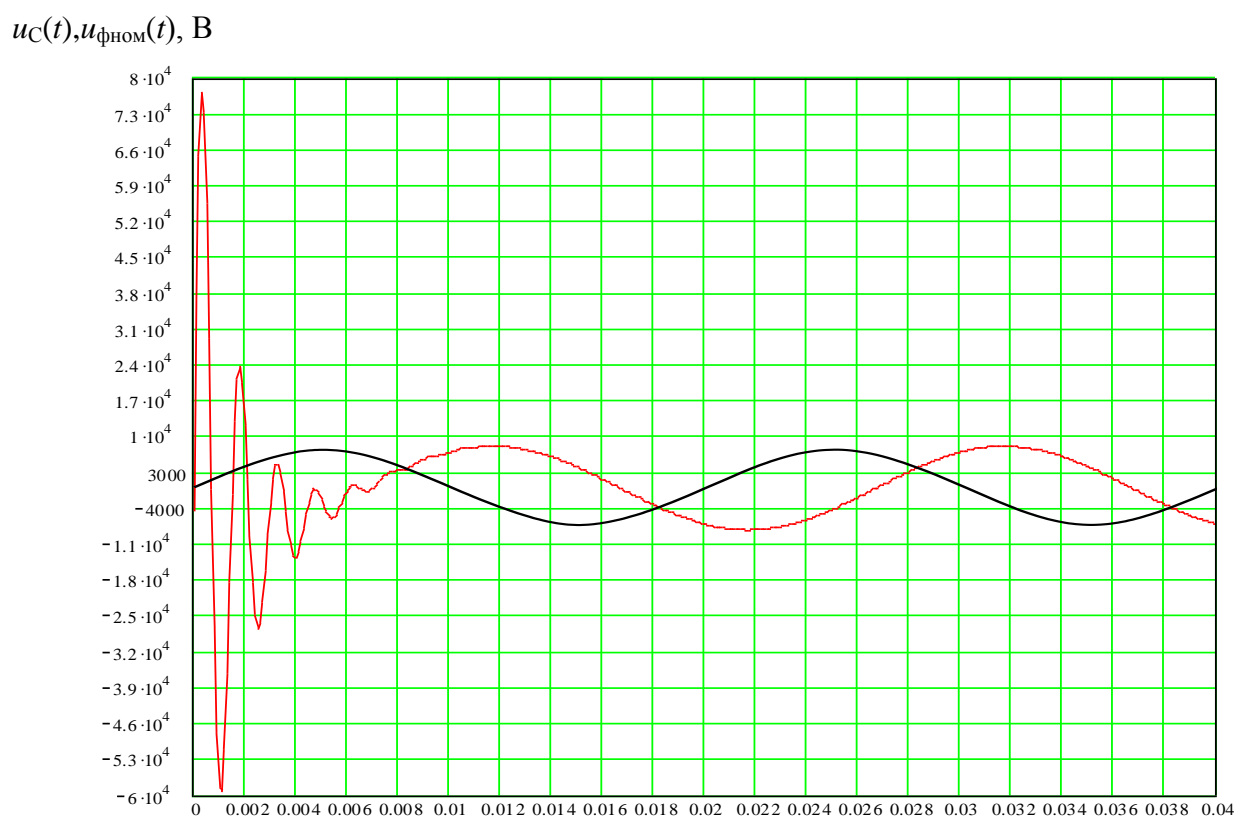


Рисунок 3.19 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

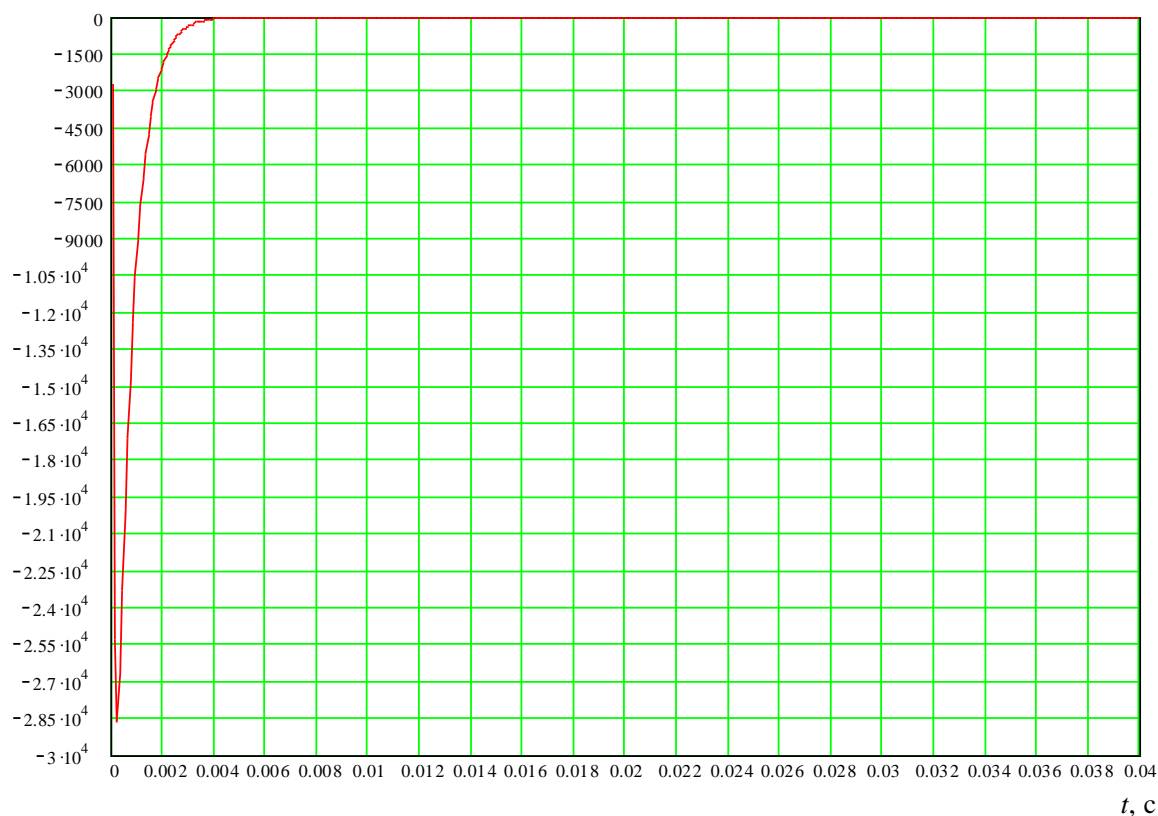
$u_{\text{Нсв}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.20 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

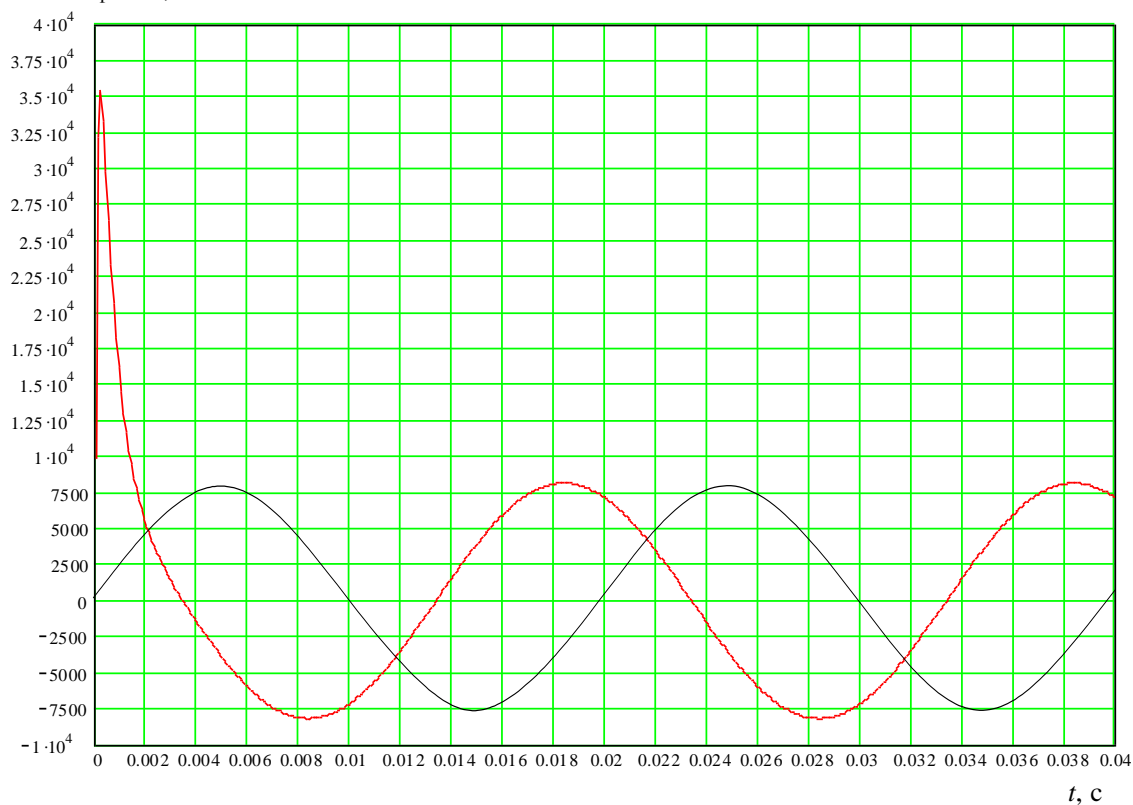
 $u_{\text{В}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.21 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

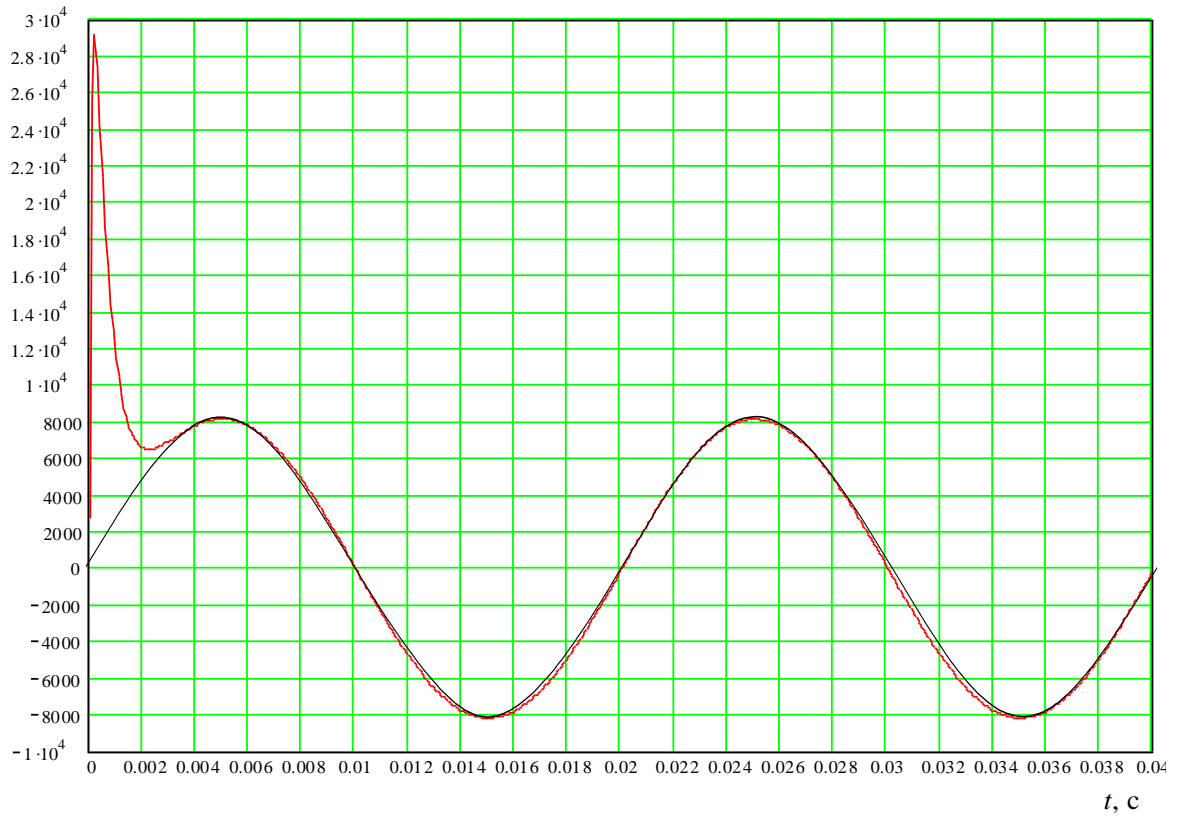
$u_A(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.22 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}}=52 \text{ А}$ )

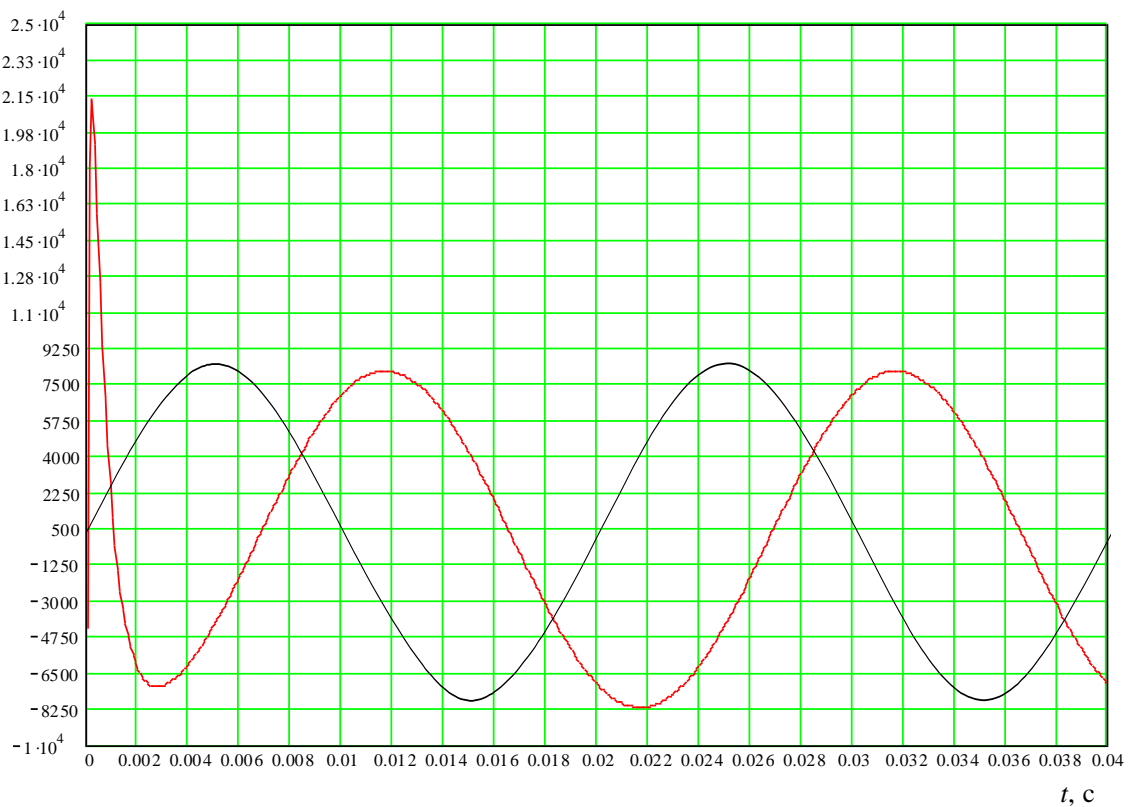
 $u_C(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.23 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}, I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

Время переходного процесса снижается с 12 с до 0,004 с.

Анализ проведенных исследований показывает, что в сетях с нейтралью, частично заземленной через резистор, при использовании реакторов с большими номинальными токами, а также высокоомных резисторов, КП снижаются по отношению к варианту без резистора. Однако кратность КП остается весьма высокой, что негативно отражается на электрооборудовании расположенном в непосредственной близости от УЭН.

### 3.5 Математическое моделирование коммутационных перенапряжений в УЭН сети с изолированной нейтралью

В сети с изолированной нейтралью эквивалентная схема замещения распределительной сети при групповом отключении нагрузки будет иметь вид:

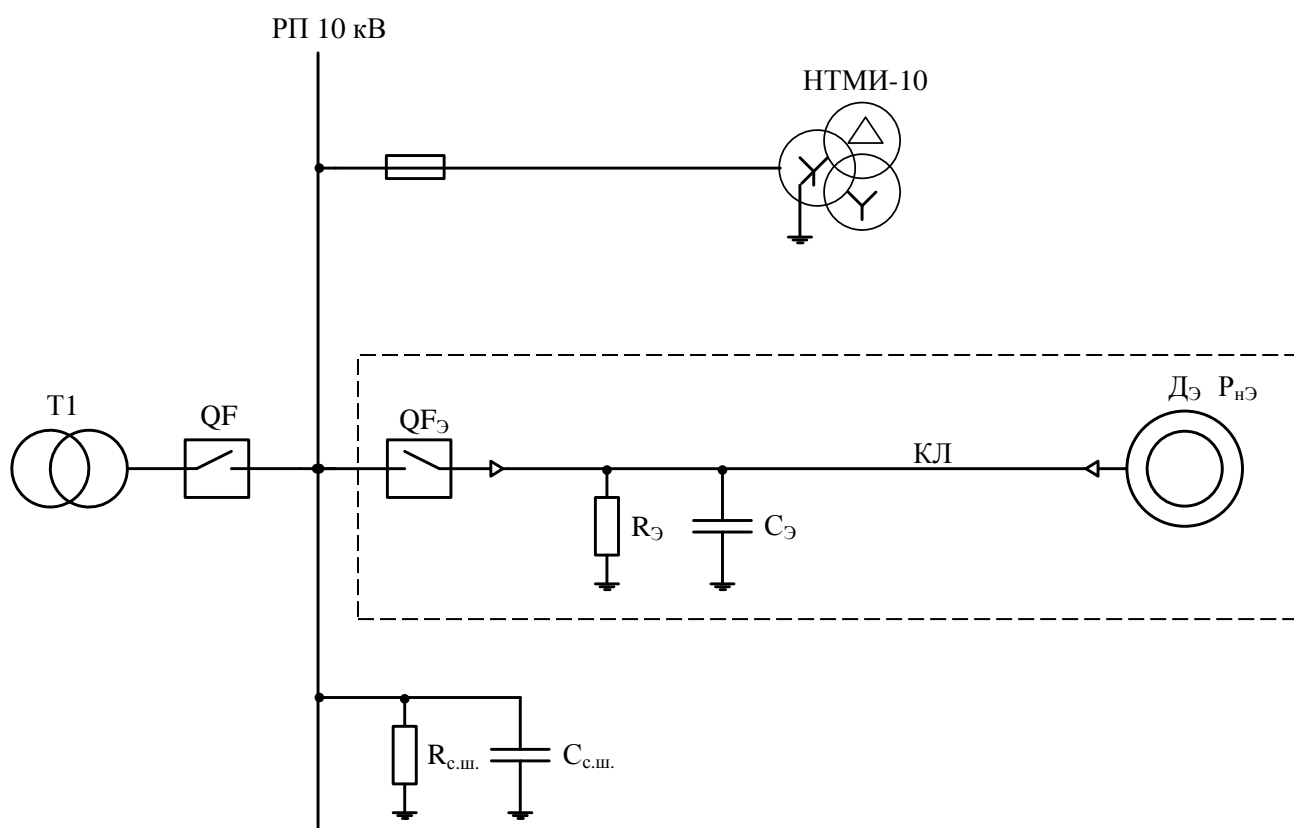


Рисунок 3.24 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10 кВ.

Отключение нагрузки производится вакуумным выключателем.

Срез тока, который происходит в вакуумной камере выключателя, приводит к появлению остаточного тока в высоковольтной обмотке измерительного трансформатора НТМИ, так как нейтральная точка данной обмотки заземлена, в результате чего в высоковольтной обмотке будет накапливаться электромагнитная энергия [2, 69]. Величина среза тока зависит от характера нагрузки, то есть от коэффициента мощности нагрузки ( $\cos \varphi$ ) и от угла среза тока  $\psi$ .

Схема замещения обмотки трансформатора с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид:

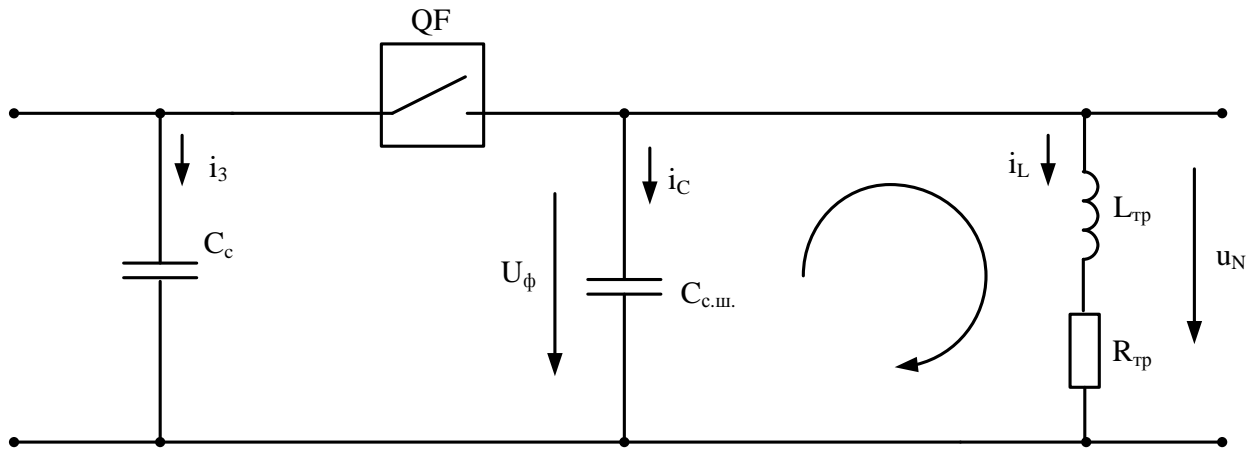


Рисунок 3.25 Схема замещения УЭН с трансформатором напряжения – НТМИ:

$C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность первичной обмотки трансформатора НТМИ;  $R_{тр}$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора НТМИ;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Как видно из рисунка, данная схема аналогична схеме замещения обмотки ДГР, поэтому, в соответствии с п. 3.3 данной главы, переходной процесс, возникающий в данном колебательном контуре, будет описываться аналогичным выражением:

$$u_{Ncb}(t) = \frac{U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \operatorname{arccctg} \left[ \frac{-(i_{ост} - U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{с.ш.})}{C_{с.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \right\} \quad (3.26)$$

Напряжения на секции шин, согласно системе уравнений 3.1, будут иметь следующий вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{\text{мфА}} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{\text{N CB}} \\ u_B(t) &= U_{\text{мфВ}} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{\text{N CB}} \\ u_C(t) &= U_{\text{мфС}} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{\text{N CB}} \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

В табл. 3.5 приведены параметры трансформатора напряжения НТМИ-10 [69].

Таблица 3.5 – Параметры трансформатора напряжения марки НТМИ – 10 в режиме ОЗЗ

$L_{\text{тр}}, \text{Гн}$	$I_{\text{Лтр}}, \text{А}$	$R_{\text{тр}}, \text{Ом}$
122	0,15	615

Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и высоковольтных обмотках трансформатора, приведены в табл. 3.6, графики переходного процесса представлены на рис. 3.26÷3.29.

При анализе данных, представленных в таблице 3.6, можно сделать вывод о том, что в сетях с изолированной нейтралью кратность перенапряжений не превышает 1,45. Однако, как видно из графиков рис. 3.26÷3.29, во время переходного процесса, который длится более 1 с, на высоковольтных обмотках трансформатора напряжения происходят, так называемые, биения напряжения, при которых значение амплитуды напряжений может колебаться от 2000 В до 14500 В на отдельных фазах НТМИ при номинальном линейном напряжении 10000 В. Следовательно, аналогичные биения 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.

Таблица 3.8 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах высоковольтной обмотки трансформатора напряжения НТМИ и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ отпайки	$U_L$ , В	$U_\phi$ , В	$I_L$ , А	$C_{с.ш.}$ , мкФ	$f_{к.и.}$ , Гц	$u_{N.св.мах}(t)$ , В	$u_{Амах}(t)$ , В	$u_{Вмах}(t)$ , В	$u_{Смах}(t)$ , В	$K = u_{N.св.мах}/U_L$	$K_A = u_{Амах}/U_L$	$K_B = u_{Вмах}/U_L$	$K_C = u_{Смах}/U_L$
1	10000	5773,5	0,15	15	50	6295	14452	13659	14050	0,63	1,45	1,37	1,41

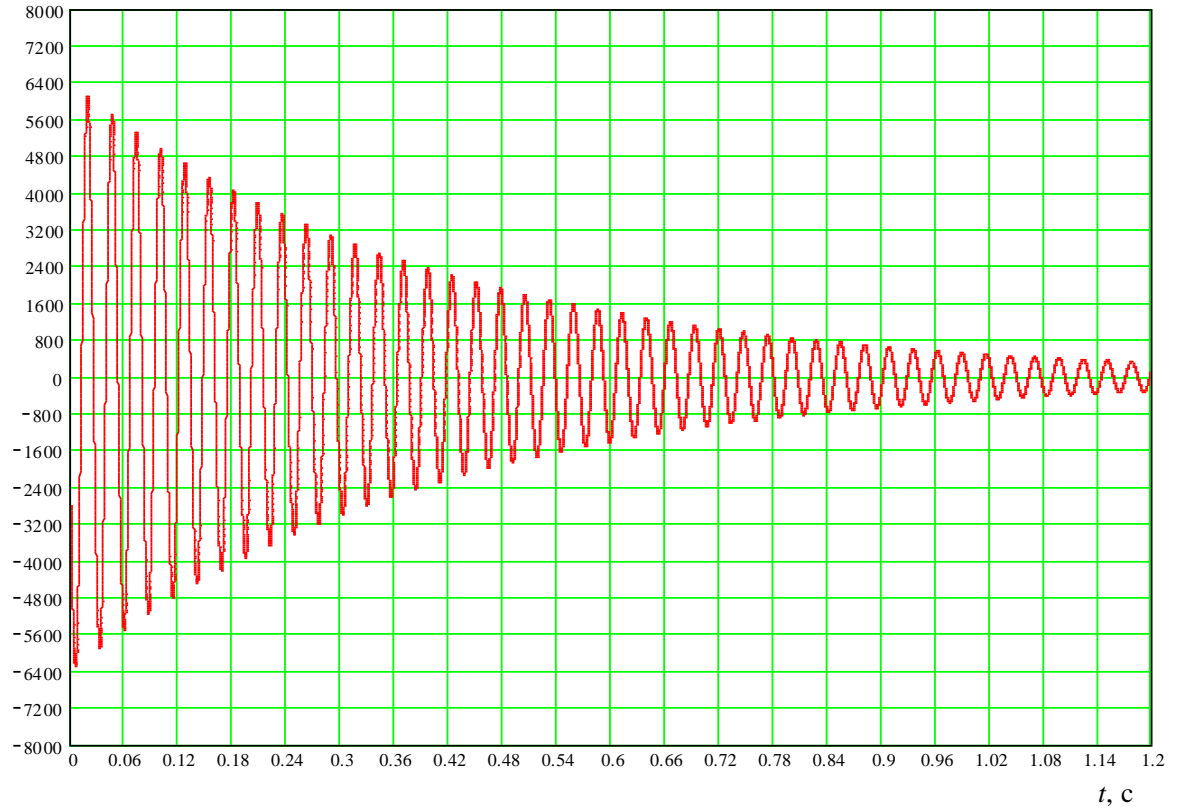
$u_{\text{Нсв}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.26 – Свободная составляющая напряжения смещения нейтрали при переходном процессе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

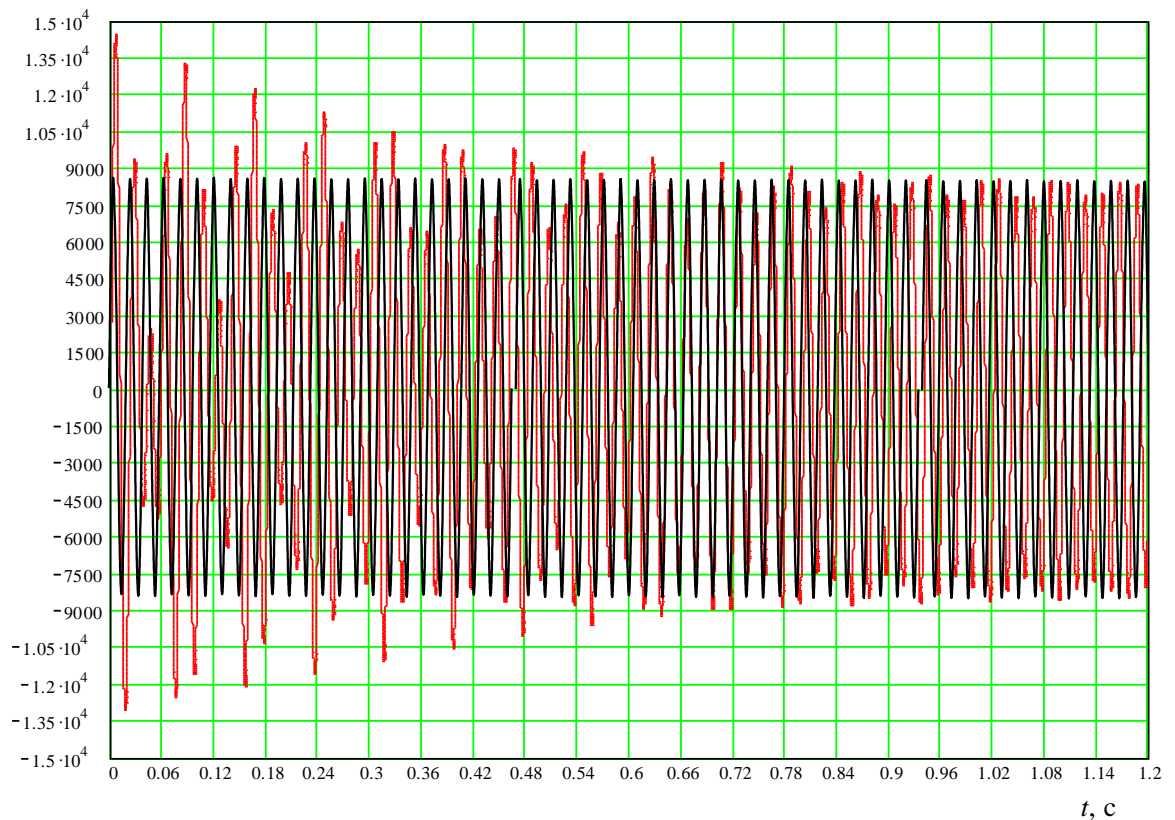
 $u_{\text{А}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 3.27 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )



Рисунок 3.28 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

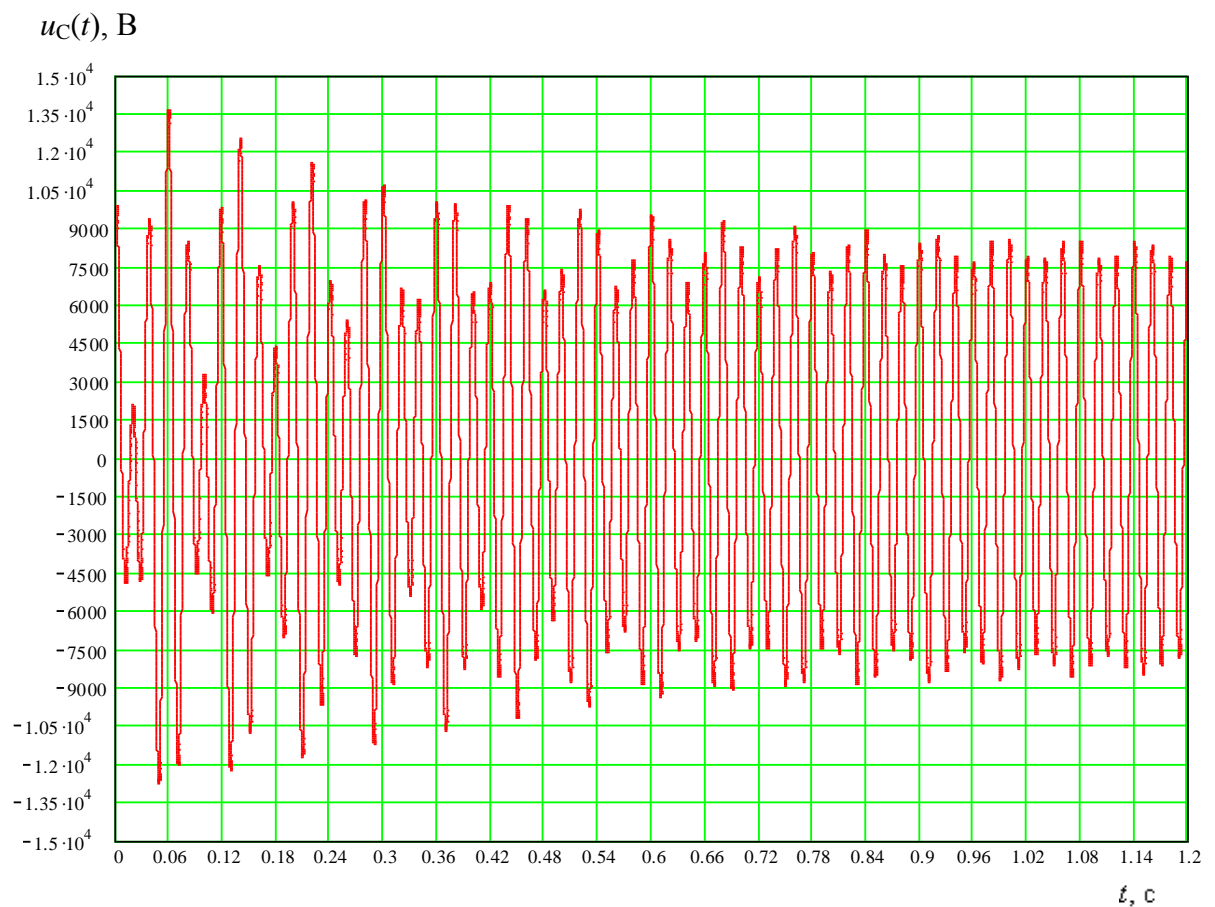


Рисунок 3.29 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

## Выводы по третьей главе

1. В сетях с компенсированной нейтралью, а также в сетях с компенсированной нейтралью и одновременным заземлением нейтрали через резистор в случае группового отключения нагрузки вакуумным выключателем перенапряжения в режиме ОЗЗ в УЭН превышают номинальное напряжение сети в 8 – 12 раз.
2. Кратность перенапряжений на секциях шин зависит от угла среза тока  $\psi$  и угла сдвига фаз –  $\varphi$ . Максимальные перенапряжения возникают в сети с компенсированной нейтралью и могут достигать  $11,89U_{ном}$ , при условии, что  $\psi = 20^{\circ}$ , а  $\varphi = 30^{\circ}$ .
3. В сетях с компенсированной нейтралью наибольшие перенапряжения возникают в резонансном режиме работы ДГР, т.к. в этом случае остаточный ток в ДГР имеет максимальное значение, в режиме недокомпенсации или перекомпенсации остаточный ток снижается, а, следовательно, снижаются и перенапряжения.
4. С увеличением номера ступени ДГР кратность перенапряжений возрастает. Это связано с тем, что возрастает остаточный индуктивный ток в ДГР. Также с уменьшением индуктивного сопротивления реактора частота коммутационного импульса –  $f_{к.и.}$  возрастает, а время переходного процесса уменьшается, так как коэффициент затухания  $\delta$  – увеличивается.
5. В сетях с нейтралью, одновременно заземленной через резистор и ДГР, максимальные перенапряжения возникают, если угол сдвига фаз  $\varphi = 0^{\circ}$  (активная нагрузка) на V отпайке ДГР при использовании резистора в нейтрали сети сопротивлением 5000 Ом. Кратность перенапряжений на секциях шин в данных условиях может достигать 9,49. При снижении сопротивления резистора до 500 Ом перенапряжения на секциях шин снижаются до 36818 В, переходный процесс носит апериодический характер.
6. В сетях с нейтралью, частично заземленной через резистор, при использовании реакторов с большими номинальными токами, а также высоко-

омных резисторов, КП снижаются по отношению к варианту без резистора. Однако кратность КП остается весьма высокой, что негативно отражается на электрооборудовании расположенном в непосредственной близости от УЭН.

7. В сетях с изолированной нейтралью кратность перенапряжений не превышает 1,45. Однако во время переходного процесса на высоковольтных обмотках трансформатора напряжения происходят биения напряжения, при которых значение амплитуды напряжений может колебаться от 2000 В до 14500 В на отдельных фазах НТМИ при номинальном линейном напряжении 10000 В. Аналогичные биения будут наблюдаться на секциях шин подстанций и на высоковольтных обмотках трансформатора собственных нужд подстанции. Это может привести к ложному срабатыванию защиты, необоснованному отключению цепей управления на самой подстанции.

#### **4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ОГРАНИЧЕНИЮ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

*Проведено обоснование допустимой кратности коммутационных перенапряжений в УЭН. Выполнен сравнительный анализ коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН с допустимой кратностью перенапряжения. Сделан анализ влияния РС – ограничителей на величину КП в УЭН, разработаны рекомендации по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в УЭН, определены параметры РС – ограничителя, предназначенного для подключения к УЭН.*

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные во второй и третьей главе, показывают, что максимальные перенапряжения, возникающие на секциях шин, в случае неселективной работы защит от ОЗЗ могут превышать напряжение сети в 10 – 12 раз. Таким примером может послужить групповое отключение нагрузки от секции шин подстанции 110/35 на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате. От подстанции 110/35 кВ были запитаны два печных трансформатора, сеть подстанции компенсировалась с помощью ДГР типа ЗРОМ–35. Ток компенсации составлял 56А. В режиме однофазного замыкания на землю сначала отключилась неповрежденная линия, а затем линия с ОЗЗ. В результате данного аварийного режима, за счет больших уровней перенапряжения, произошло электрическое перекрытие (пробой) воздушных промежутков между секциями шин, что привело к выходу из строя всей подстанции. На ликвидацию последствий и ремонт подстанции ушло 12 рабочих дней. Можно предположить, что основой электрического перекрытия (пробоя) послужило коммутационное перенапряжение, возникшее на секциях шин за счет неселективной работы защит в режиме ОЗЗ. Аварии подобного рода происходили также на предприятиях ОАО «АГК», ОАО «АНПЗ» и на Надеждинском металлургическом заводе в сетях 6 – 10 кВ. [51].

#### 4.1 Обоснование допустимой кратности коммутационных перенапряжений в УЭН

Коммутационные перенапряжения, возникающие в УЭН, в основном, оказывают серьезное воздействие на изоляцию электрооборудования и кабельных линий, которые непосредственно связаны с УЭН. К такому электрооборудованию можно отнести измерительные трансформаторы напряжения НТМИ–6(10), ЗНОМ–6(10), трансформаторы собственных нужд, разделки кабельных линий (концевые муфты), связанные с фидерными выключателями, ячейки фидерных выключателей, опорные изоляторы, проходные изоляторы.

Состояние изоляции вышеперечисленного оборудования в процессе эксплуатации в значительной степени определяет надежность работы электрической сети. Поэтому важным является вопрос об адекватном определении уровня гарантированной электрической прочности изоляции и его координации с возникающими коммутационными перенапряжениями.

Изоляция нового электрооборудования подстанций обладает высокой диэлектрической прочностью. Однако в течение всего срока эксплуатации происходит существенное снижение уровня прочности под действием всевозможных факторов: окружающая среда (температура, влажность, запыленность); неустойчивый термический режим работы электрооборудования; механические воздействия во время ремонтно-профилактических работ; воздействия внутренних перенапряжений.

Вследствие этого при определении уровня допустимых перенапряжений на секциях шин распределительных подстанций необходимым является учет его эксплуатационного износа.

Нормированное значение испытательного напряжения  $U_{исп}$  для электрооборудования распределительных подстанций, согласно ПУЭ, не должно превышать 42 кВ для электроустановок напряжением 10 кВ и 32 кВ для электроустановок напряжением 6 кВ. Данные показатели можно принимать за основу при определении допустимых уровней перенапряжений. Указанные значения

справедливы, как правило, для электрооборудования со сроком службы до 10 лет. При определении допустимых уровней перенапряжения электрооборудования распределительных подстанций со сроком службы более 10 лет необходимо учитывать коэффициент износостойкости  $K_{и}$ , который для данного срока службы составляет 0,8. [1, 69, 71, 74]. Поэтому допустимые уровни перенапряжения для электрооборудования со сроком службы более 10 лет не должны превышать значения  $U_{пер} = U_{исп} \cdot K_{и} = 33,6$  кВ для электроустановок напряжением 10 кВ и 25,6 кВ для электроустановок напряжением 6 кВ. Полученные значения перенапряжений имеют предельные значения.

Средства защиты от внутренних перенапряжений должны обеспечивать ограничение перенапряжений с определенным коэффициентом запаса. По разным источникам [23, 24, 71], данный коэффициент находится в пределах  $1,2 \div 1,25$ . Таким образом, 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.

#### **4.2 Сравнительный анализ коммутационных перенапряжений, возникающих в УЭН, с допустимой кратностью перенапряжений**

Принимая во внимание полученные допустимые кратности перенапряжений, сделаем анализ влияния основных факторов на величину и характер коммутационных перенапряжений в УЭН. Исследования, выполненные в третьей главе, показали, что основными факторами, влияющими на коммутационные перенапряжения в УЭН, являются: режим нейтрали сети, характер нагрузки ( $\cos \varphi$ ) и угол среза тока в вакуумном выключателе  $\psi$ . Влияние последних двух факторов можно свести к минимуму за счет выбора режима заземления нейтрали сети.

Рассмотрим влияние режима заземления нейтрали сети на величину и характер коммутационных перенапряжений.

Учитывая, что оборудование напряжением 10 кВ менее устойчиво к КП, анализ выполним для данных сетей. Далее будут рассмотрены электрооборудование и узлы электрических нагрузок напряжением 10 кВ.

Исходя из данных, полученных в результате экспериментальных измерений и аналитических исследований переходных процессов, возникающих в УЭН (результаты второй, третьей главы данной работы), можно сделать вывод, что при компенсации емкостных токов ОЗЗ величиной 26,5; 33,5; 40; 46,5; 52 А с помощью ДГР типа РЗДСОМ – 380 квар в сети с компенсированной нейтралью, максимальная кратность КП, возникающих в УЭН, соответственно, будет равна 8,7; 9,6; 10,4; 11,2; 11,8. Данные значения превышают допустимый уровень коммутационных перенапряжений, соответственно, в 3,1; 3,3; 3,7; 4; 4,2 раза. Это указывает на то, что в случае группового отключения нагрузки от секции шин распределительной подстанции, в режиме ОЗЗ может наступить электрический пробой изоляции высоковольтных обмоток трансформаторов собственных нужд или измерительных трансформаторов напряжения, что подтверждается опытом эксплуатации указанного электрооборудования.

Включение высокоомных резисторов сопротивлением 5000 Ом, 2500 Ом, 1000 Ом в нейтраль сети с компенсированной нейтралью, предназначенных для ограничения перенапряжений в режиме однофазного дугового замыкания на землю, приводит к незначительному снижению КП в УЭН. Так, при компенсации емкостных токов со значениями 26,5; 33,5; 40; 46,5; 52 А при заземлении через резистор 5000 Ом перенапряжения в УЭН снизятся до 6,2; 6,9; 7,8; 8,5; 9,1 – кратного значения, при заземлении через резистор 2500 Ом до 5,08; 5,98; 6,53; 7,13; 7,73 – кратного значения соответственно.

Таким образом, использование высокоомных резисторов не приводит к эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в УЭН.

Рассмотрим влияние низкоомных резисторов на величину коммутационных перенапряжений. В случае подключения к ДГР резистора сопротивлением

500 Ом перенапряжения в УЭН для компенсируемых токов ОЗЗ – 26,5; 33,5; 40; 46,5; 52 А не будут превышать 2,23; 2,71; 2,95; 3,21 3,54 – кратного значения соответственно. Из приведенных данных видно, что если ток однофазного замыкания на землю не будет превышать 33,5 А, кратность КП В УЭН будет ниже допустимого значения – 2,8. При токах однофазного замыкания на землю, превышающих указанное значение, величина КП будет выше допустимого значения, что приведет к пробое изоляции электрооборудования подстанции.

Снижение сопротивления резистора, подключаемого к нейтрали сети, до 200 Ом, приводит к существенному снижению уровней КП, величина которых для указанных токов ОЗЗ не будет превышать значений – 1,37; 1,52; 1,7; 1,84; 2,0, что ниже допустимого значения кратности перенапряжений.

Аналитические исследования показали, что при использовании ДГР типа РЗДСОМ-380 квар максимальное значение сопротивления резистора, при котором перенапряжения в УЭН будут ниже допустимого уровня, составляет 350 Ом. В этом случае для указанных выше компенсируемых емкостных токов коммутационные перенапряжения будут ниже допустимых уровней.

Однако использование резисторов сопротивлением 200 – 350 Ом приводит к резкому увеличению активной составляющей тока однофазного замыкания на землю за счет наложения дополнительного активного тока, возникающего в результате заземления нейтрали через низкоомный резистор, на реактивную составляющую тока ОЗЗ. Кроме этого, существует разбалансировка дугогасящего реактора, которая может достигать  $5 \div 20\%$ . В этом случае ток ОЗЗ будет превышать допустимые значения [58]. Это видно из табл. 4.1.

В табл. 4.1 указаны значения реактивной составляющей тока ОЗЗ  $I_X$ , обусловленной разбалансировкой ДГР, активной составляющей тока ОЗЗ  $I_R$ , обусловленной активным сопротивлением резистора в нейтрали, активной составляющей тока ОЗЗ  $I_r$ , обусловленной активным сопротивлением изоляции и суммарного тока  $I_\Sigma$  однофазного замыкания на землю, в зависимости от компенсации реактором емкостной составляющей тока ОЗЗ  $I_c$  со значениями – 26,5; 33,5; 40; 46,5; 52 А.

Таблица 4.1 – Значения суммарного тока ОЗЗ в зависимости от сопротивления резистора и компенсируемой реактором емкостной составляющей тока ОЗЗ

Сопротивление резистора $R_p$ , Ом		200				300				400				500			
Разбаланси- ровка реактора	Составляющая тока ОЗЗ, А	$I_X$	$I_T$	$I_R$	$I_\Sigma$	$I_X$	$I_T$	$I_R$	$I_\Sigma$	$I_X$	$I_T$	$I_R$	$I_\Sigma$	$I_X$	$I_T$	$I_R$	$I_\Sigma$
5%	26,5	1,3	2,6	30,0	32,6	1,3	2,6	20,0	22,6	1,3	2,6	15,0	17,7	1,3	2,6	12,0	14,7
	33,5	1,6	3,3	30,0	33,3	1,6	3,3	20,0	23,4	1,6	3,3	15,0	18,4	1,6	3,3	12,0	15,4
	40	2,0	4,0	30,0	34,0	2,0	4,0	20,0	24,0	2,0	4,0	15,0	19,1	2,0	4,0	12,0	16,1
	46,5	2,3	4,6	30,0	34,7	2,3	4,6	20,0	24,7	2,3	4,6	15,0	19,7	2,3	4,6	12,0	16,8
	52	2,6	5,2	30,0	35,3	2,6	5,2	20,0	25,3	2,6	5,2	15,0	20,3	2,6	5,2	12,0	17,4
10%	26,5	2,6	2,6	30,0	32,7	2,6	2,6	20,0	22,8	2,6	2,6	15,0	17,8	2,6	2,6	12,0	14,8
	33,5	3,3	3,3	30,0	33,5	3,3	3,3	20,0	23,5	3,3	3,3	15,0	18,6	3,3	3,3	12,0	15,7
	40	4,0	4,0	30,0	34,2	4,0	4,0	20,0	24,3	4,0	4,0	15,0	19,4	4,0	4,0	12,0	16,4
	46,5	4,6	4,6	30,0	34,9	4,6	4,6	20,0	25,0	4,6	4,6	15,0	20,1	4,6	4,6	12,0	17,2
	52	5,2	5,2	30,0	35,5	5,2	5,2	20,0	25,7	5,2	5,2	15,0	20,8	5,2	5,2	12,0	17,9
15%	26,5	3,9	2,6	30,0	32,8	3,9	2,6	20,0	23,0	3,9	2,6	15,0	18,0	3,9	2,6	12,0	15,1
	33,5	5,0	3,3	30,0	33,7	5,0	3,3	20,0	23,8	5,0	3,3	15,0	19,0	5,0	3,3	12,0	16,1
	40	6,0	4,0	30,0	34,5	6,0	4,0	20,0	24,7	6,0	4,0	15,0	19,9	6,0	4,0	12,0	17,0
	46,5	6,9	4,6	30,0	35,3	6,9	4,6	20,0	25,6	6,9	4,6	15,0	20,8	6,9	4,6	12,0	18,0
	52	7,8	5,2	30,0	36,0	7,8	5,2	20,0	26,3	7,8	5,2	15,0	21,6	7,8	5,2	12,0	18,8
20%	26,5	5,3	2,6	30,0	33,0	5,3	2,6	20,0	23,2	5,3	2,6	15,0	18,4	5,3	2,6	12,0	15,5
	33,5	6,7	3,3	30,0	34,0	6,7	3,3	20,0	24,2	6,7	3,3	15,0	19,5	6,7	3,3	12,0	16,7
	40	8,0	4,0	30,0	34,9	8,0	4,0	20,0	25,3	8,0	4,0	15,0	20,6	8,0	4,0	12,0	17,8
	46,5	9,3	4,6	30,0	35,8	9,3	4,6	20,0	26,3	9,3	4,6	15,0	21,7	9,3	4,6	12,0	19,0
	52	10,4	5,2	30,0	36,7	10,4	5,2	20,0	27,2	10,4	5,2	15,0	22,7	10,4	5,2	12,0	20,0

Реактивная составляющая тока ОЗЗ  $I_X$  определяется выражением:

$$I_X = I_c \cdot \Delta\%, \quad (4.1)$$

где  $\Delta\%$  – разбалансировка реактора.

Активная составляющая тока ОЗЗ определяется из выражения:

$$I_R = \frac{U_N}{R_p}, \quad (4.2)$$

где  $U_N = U_\Phi$  – напряжение смещения нейтрали,  $R_p$  – активное сопротивление резистора в нейтрали сети.

Активная составляющая тока ОЗЗ  $I_r$  зависит от условий среды и в осенне-весенний период может достигать  $0,1I_c$ .

Суммарный ток ОЗЗ определяется из выражения:

$$I_\Sigma = \sqrt{(I_R + I_r)^2 + I_X^2}, \quad (4.3)$$

Из табл. 4.1 видно, что минимально допустимое значение сопротивления резистора, который можно использовать в сочетании с ДГР, составляет 500 Ом, в противном случае величина тока ОЗЗ может превысить  $I_{OЗЗ} = 20$  А, что по ПУЭ для электроустановок напряжением 10 кВ недопустимо.

Таким образом, использование резистора сопротивлением 500 Ом, включенного параллельно реактору, позволяет ограничить значения КП до допустимых значений, если компенсируемый емкостной ток ОЗЗ не будет превышать 33,5 А. Для сетей, в которых емкостная составляющая тока ОЗЗ будет превышать указанный предел, могут возникнуть коммутационные перенапряжения, для ограничения которых необходимо предусмотреть дополнительные меры.

### **4.3 Выбор средств защиты от коммутационных перенапряжений в узлах электрических нагрузок**

В настоящее время для ограничения КП, возникающих на зажимах двигателей и трансформаторов, используются нелинейные ограничители коммута-

ционных перенапряжений (ОПН) и 3-х фазные РС – ограничители. Опыт эксплуатации указанных средств ограничения КП показал, что РС – ограничители по эффективности превосходят ОПН практически в два раза: уровень ограничения перенапряжений РС – ограничителями находится в диапазоне  $1,4 \div 1,7U_{ном}$ , в то время как уровень ограничения коммутационных перенапряжений ОПН находится в диапазоне  $2,4 \div 3,2U_{ном}$  (табл. 4.2).

В табл. 4.2 приведены основные характеристики данных средств защиты от коммутационных перенапряжений.

Таблица 4.2 – Основные характеристики средств защиты от коммутационных перенапряжений

Тип ограничителя	Завод-изготовитель	Масса, кг	Габариты Н×L×М, мм	Срок службы	$U_{н.огр}$ кВ	$U_{ост}$ кВ	$K_{огр}$	$K_{огр} < K_{доп}$ $K_{доп}=2,8$
ОПН-П1-6П УХЛ1	«ЗЭТО» г. Великие Луки	3,6	215x230x84	25	6	17,6	2,93	Нет
ОПН-П1-10П УХЛ1		5,4	265x230x84	25	10	29,5	2,95	Нет
ОПН-РС/TEL-6	«Таврида электрик» г. Москва	1,8	130x100x10	25	6	18,9	3,15	Нет
ОПН-РС/TEL-10		2,5	190x100x10	25	10	31,5	3,15	Нет
ОПН-КС/TEL-6		1,8	120x80x80	25	6	14	2,33	Да
ОПН-КС/TEL-10		2,5	160x80x80	25	10	24,9	2,49	Да
ОПН-6/6,5-10(1) УХЛ2	«Феникс-88» г. Новосибирск	2	270x80x80	25	6	15,2	2,53	Да
ОПН-10/10,5-10(1) УХЛ2		2,5	315x80x80	25	10	23,4	2,34	Да
РС - ограничитель	«Рутас» г. Красноярск	5,6	315x170x110	25	6	9	1,4-1,7	Да

Узел электрических нагрузок должен обладать высокой надежностью по отношению к внутренним перенапряжениям. В противном случае, выход из строя любого электрооборудования подстанций может привести к необоснованному простоя электроприемников.

Учитывая то, что кратность коммутационных перенапряжений для электрооборудования распределительных подстанций не должна превышать  $2,8U_{ном}$ , а также анализируя данные таблицы 4.2, можно сделать вывод о том, что для эффективного ограничения КП в УЭН можно использовать нелинейные ограничители перенапряжения, выпускаемые ООО «Таврида электрик» г. Москва и ЗАО «Феникс-88» г. Новосибирск, а также RC – ограничители, выпускаемые ООО «РУТАС» г. Красноярск.

Опыт эксплуатации ОПН на угольных разрезах и промышленных предприятиях показывает, что данные устройства ограничения перенапряжений подвержены термическому разрушению в режиме однофазного замыкания на землю, если уровень перенапряжений на неповрежденных фазах превышает порог срабатывания ОПН [28, 38, 41]. В данных условиях возникает кратковременное двухфазное короткое замыкание по цепи: ОПН (т.к. его сопротивление стремится к нулю) – земля – поврежденная фаза. Это может привести к тому, что ОПН разрушается. Термическое разрушение ОПН приводит к тому, что защищаемый объект остается без средств защиты от коммутационных перенапряжений. Повреждения такого рода очень сложно обнаружить визуально, для этого необходимо выполнить специальные испытания в лабораторных условиях, что влечет за собой большие затраты времени и средств.

Опыт эксплуатации резистивно-емкостных ограничителей перенапряжения показывает, что данный вид устройств имеет высокий уровень термической устойчивости к режиму ОЗЗ. Как показали исследования, выполненные авторами [40], максимальное увеличение тока через RC – ограничитель в режиме ОЗЗ может достигать двукратного значения. Например, в сетях 10 кВ в нормальном режиме через каждую фазу стандартного RC – ограничителя ( $C_{огр} = 0,25$  мкФ,  $R_{огр} = 50$  Ом) протекает ток, равный 0,45 А. В режиме ОЗЗ величина тока может достигать 0,9 А. Мощность резистора, который используется в RC – ограничителе, составляет 60 Вт. Следовательно, в нормальном режиме эксплуатации мощность, выделяемая на резисторе, составляет 10 Вт, а в режиме ОЗЗ – 40,5 Вт, что ниже номинальной мощности резистора, т.е. резистор не будет выхо-

дить из строя и, соответственно, РС – ограничитель будет термически устойчив в режиме ОЗЗ.

Выясним, возможно ли возникновение режима двухфазного короткого замыкания через ОПН, если их устанавливать в УЭН для ограничения КП. Для этого необходимо найти временной интервал, на котором сработают, как минимум, два ограничителя.

Используя данные математического моделирования, выполненного в третьей главе, рассмотрим графики переходных процессов, возникающих на отдельных фазах секции шин в случае группового отключения нагрузки в режиме ОЗЗ.

На рис. 4.1 представлены переходные процессы изменения напряжения на отдельных фазах секции шин сети с компенсированной нейтралью и емкостным током ОЗЗ равным 26,5 А. При условии, что ограничение КП до уровня  $2,8U_{\text{ном}}$  осуществляется с помощью ОПН.

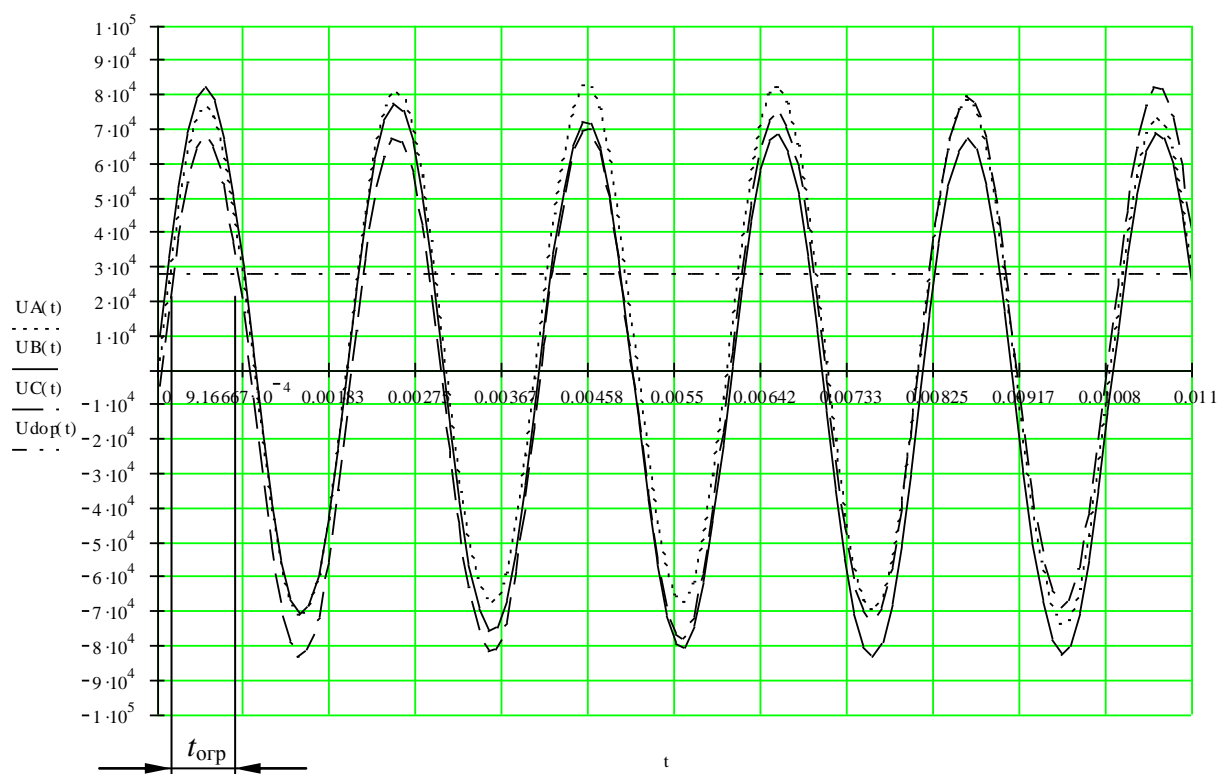


Рисунок 4.1 – Перенапряжения на фазах А, В, С ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5$  А)

Из графиков рис. 4.1 видно, что в случае возникновения перенапряжений в УЭН средства ограничения перенапряжения будут работать во всех трех фа-

зах. Время совместной работы ограничителей во всех трех фазах ( $t_{огр}$ ) будет составлять  $7 \cdot 10^{-4}$  с, т.е. в случае применения для защиты от перенапряжения ОПН, через них возможно возникновение кратковременного трехфазного короткого замыкания, которое будет длиться в течение  $7 \cdot 10^{-4}$  с. Соответственно, в сетях с емкостными токами замыкания на землю более 26,5 А время работы ограничителей будет немного уменьшаться однако амплитуда перенапряжений будет намного больше, например, для сети с  $I_{ОЗЗ} = 52$  А время работы ограничителей составит  $6 \cdot 10^{-4}$  с.

Для сетей с комбинированной нейтралью, в случае применения для заземления нейтрали резистора сопротивлением 5000 Ом и реактора, работающего на пятой отпайке ( $I_{ДГР} = 52$  А), время трехфазного короткого замыкания ОПН будет составлять приблизительно  $5 \cdot 10^{-4}$  с (рис. 4.2).

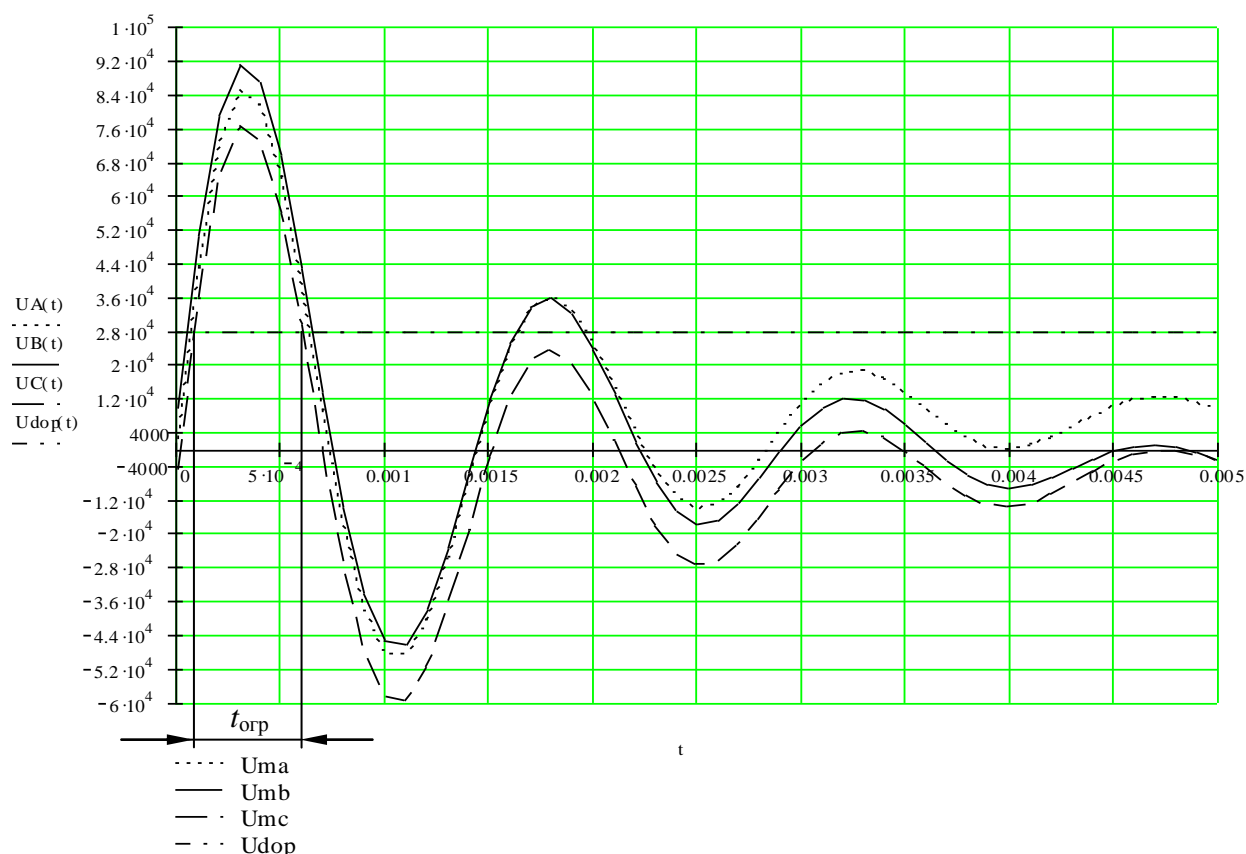


Рисунок 4.2 – Перенапряжения на фазах А, В, С ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{ДГР} = 52$  А,  $R_p = 5000$  Ом)

Для сетей с комбинированной нейтралью, в случае применения для заземления нейтрали резистора сопротивлением 500 Ом и реактора, работающего на пятой отпайке ( $I_{ДГР} = 52$  А), возможно появление только двухфазного корот-

кого замыкания через ОПН, время которого будет составлять  $1,25 \cdot 10^{-4}$  с (рис. 4.3).

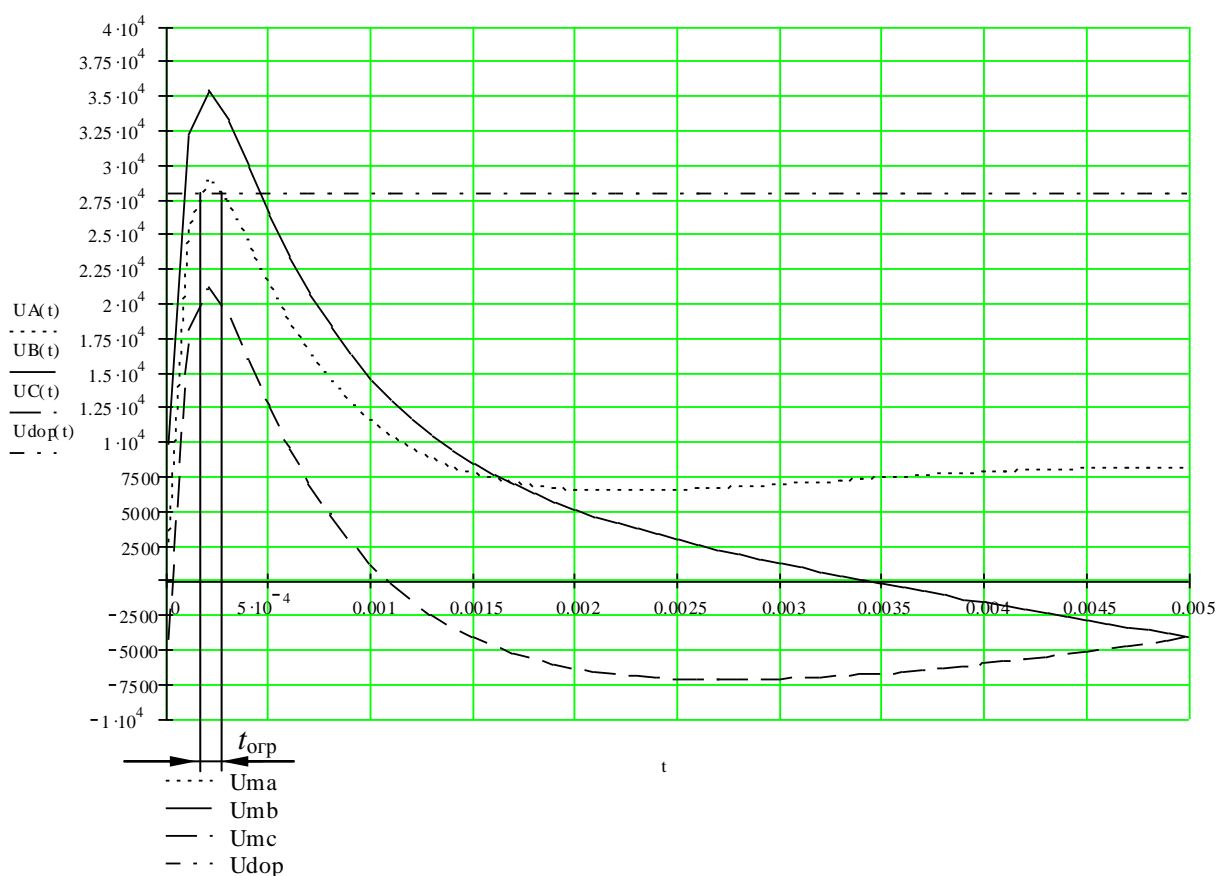


Рисунок 4.3 – Перенапряжения на фазах А, В, С ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{ДГР} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом)

Для сетей с комбинированной нейтралью, в случае применения для заземления нейтрали резистора сопротивлением 500 Ом и реактора, компенсирующего емкостной ток ОЗЗ меньше 52 А, двух и трехфазные короткие замыкания ограничителей возникать не будут (рис. 4.4), т.к. ОПН сработает только в одной фазе.

Таким образом, в сетях с компенсированной нейтралью защита от перенапряжений с помощью ОПН будет неэффективна, так как возможно термическое разрушение ограничителей в режимах двухфазного и трехфазного короткого замыкания. В сетях с комбинированным заземлением нейтрали применение ОПН возможно только в случае, когда нейтраль заземлена через резистор сопротивлением 500 Ом, а емкостной ток ОЗЗ не превышает 52 А.

В остальных случаях возможно термическое разрушение ОПН в результате короткого замыкания.

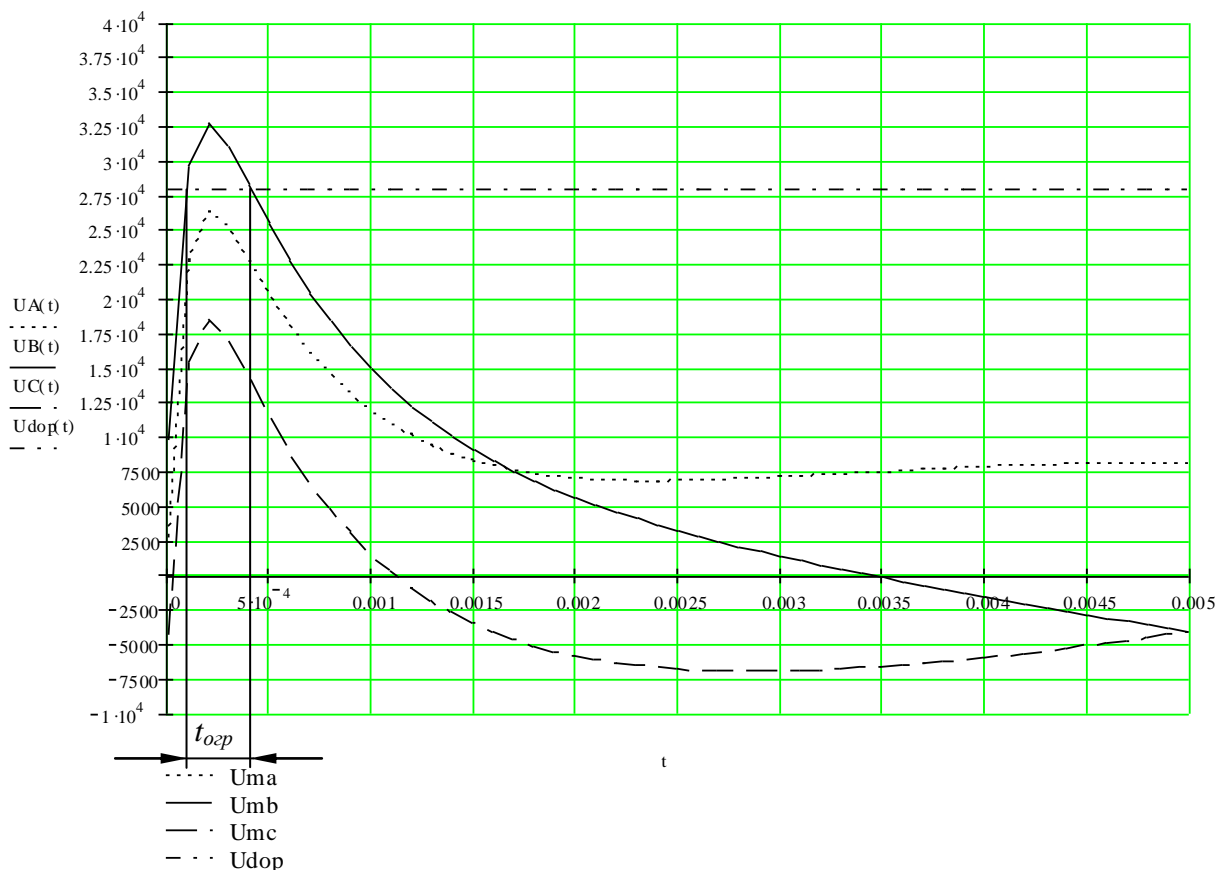


Рисунок 4.4 Перенапряжения на фазах А, В, С ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{ДГР} = 46,5$  А,  $R_p = 500$  Ом)

Следовательно, более надежными средствами защиты от коммутационных перенапряжений в узлах электрических нагрузок являются RC - ограничители.

Рассмотрим влияние стандартных RC – ограничителей с параметрами  $C_{огр} = 0,25$  мкФ,  $R_{огр} = 50$  Ом на уровень коммутационных перенапряжений в УЭН в сетях с компенсированной нейтралью и сетях, нейтраль которых заземлена через ДГР и резистор (сеть с комбинированной нейтралью).

#### 4.4 Влияние стандартных RC – ограничителей на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с компенсированной нейтралью

В настоящее время для эффективного ограничения перенапряжений на двигателях и трансформаторах широко используется универсальный RC – ограничитель с параметрами  $C_{огр} = 0,25$  мкФ,  $R_{огр} = 50$  Ом. Рассмотрим вариант использования данных ограничителей для ограничения перенапряжений на секциях шин сети с компенсированной нейтралью.

При использовании RC – ограничителей эквивалентная схема замещения распределительной сети с компенсированной нейтралью РП 10 кВ, в случае группового отключения нагрузки в режиме ОЗЗ, имеет вид, представленный на рис. 4.5.

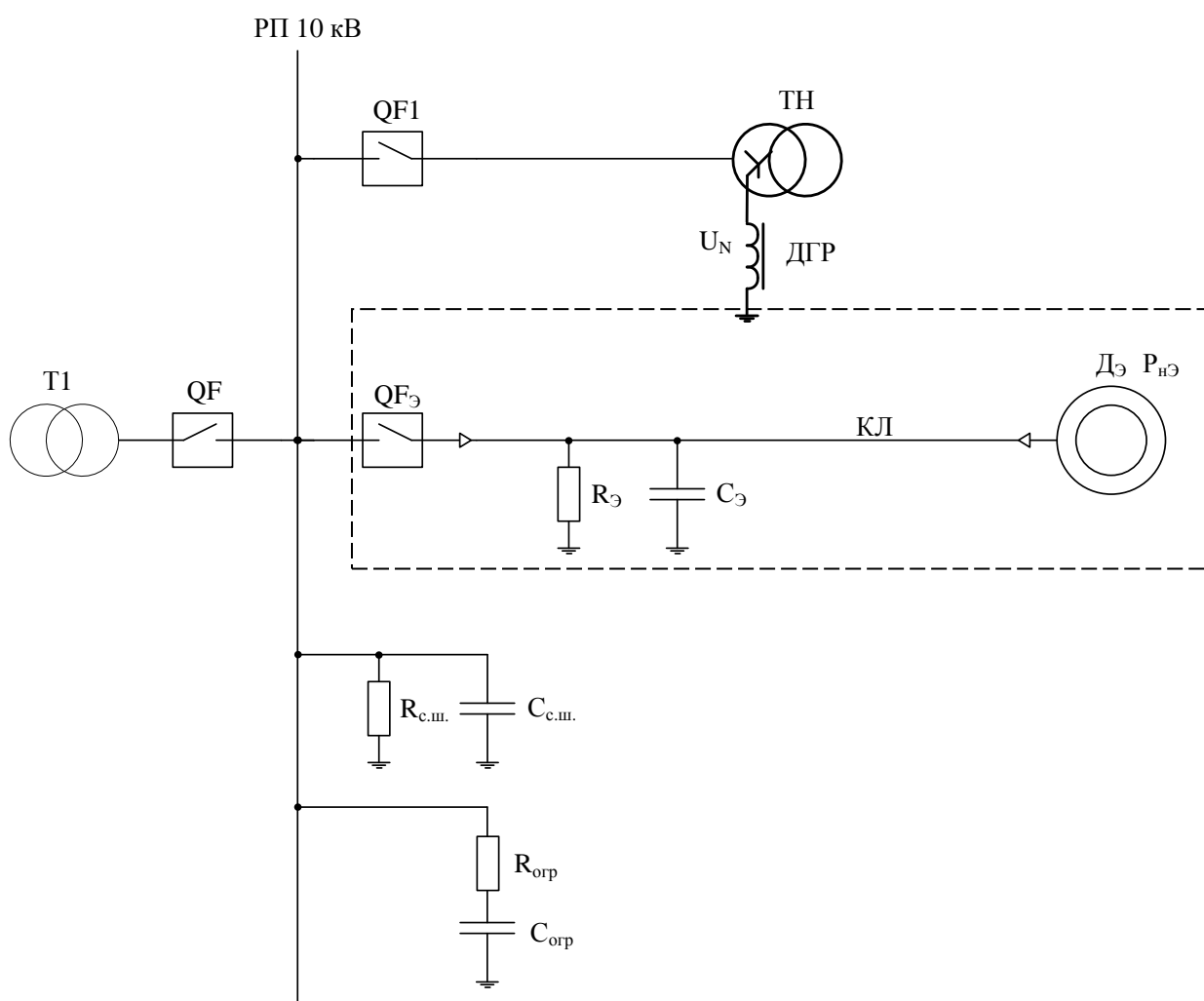


Рисунок 4.5 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10 кВ в случае группового отключения нагрузки:  $C_э = C_{к1} + C_{к2} + C_{к3}$  – эквивалентная емкость кабельной линии;  $P_{нэ} = P_{н1} + P_{н2} + P_{н3}$  – эквивалентная двигательная нагрузка РП;  $R_{огр}$  – активное

сопротивление  $RC$  – ограничителя;  $C_{огр}$  – емкость  $RC$  – ограничителя.

Схема замещения узла электрических нагрузок сети с компенсированной нейтралью с учетом использования  $RC$  – ограничителя, а также с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид:

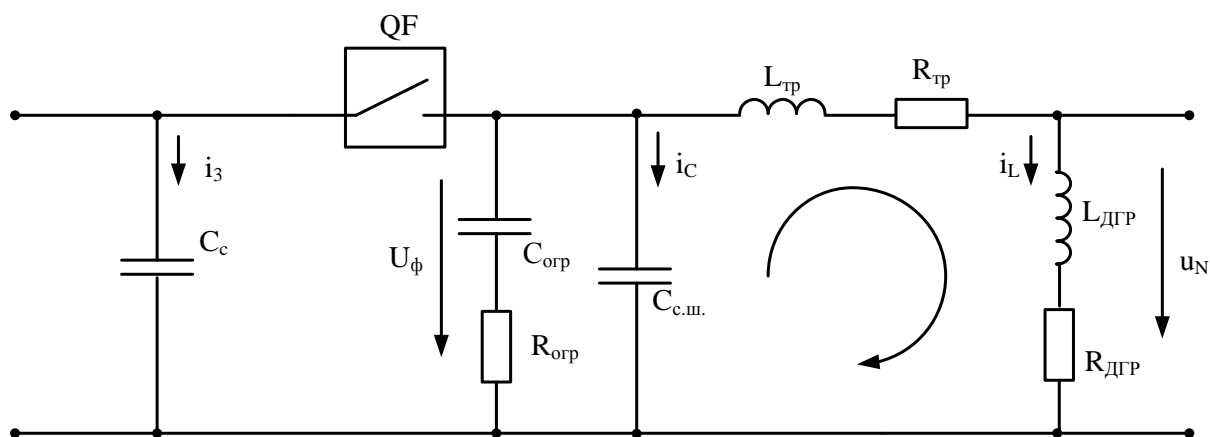


Рисунок 4.6 – Схема замещения УЭН сети с компенсированной нейтралью:

$C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность трансформатора;  $R_{тр}$  – активное сопротивление трансформатора;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора;  $C_{огр.}$  – емкость  $RC$  – ограничителя;  $R_{огр.}$  – активное сопротивление  $RC$  – ограничителя;  $C_{с.}$  – емкость распределительной сети.

При математическом моделировании принимаем ряд допущений:

1. Межвитковую емкость в ДГР не учитываем, ввиду ее незначительности – 8% от емкости фазы по отношению к земле.
2. Обмотка ДГР является линейной цепью.
3. Емкостное сопротивление секции шин и  $RC$  – ограничителя намного больше активного сопротивления секции шин и  $RC$  – ограничителя, а также емкость  $RC$  – ограничителя намного больше емкости секции шин:  $X_{C_{с.ш.}} \gg R_{C_{с.ш.}}$ ,  $X_{C_{огр.}} \gg R_{C_{огр.}}$  и  $C_{огр.} \gg C_{с.ш.}$ .

В соответствии с вышепринятыми допущениями, схема замещения узла электрических нагрузок сети с компенсированной нейтралью, с учетом использования RC – ограничителя, имеет вид:

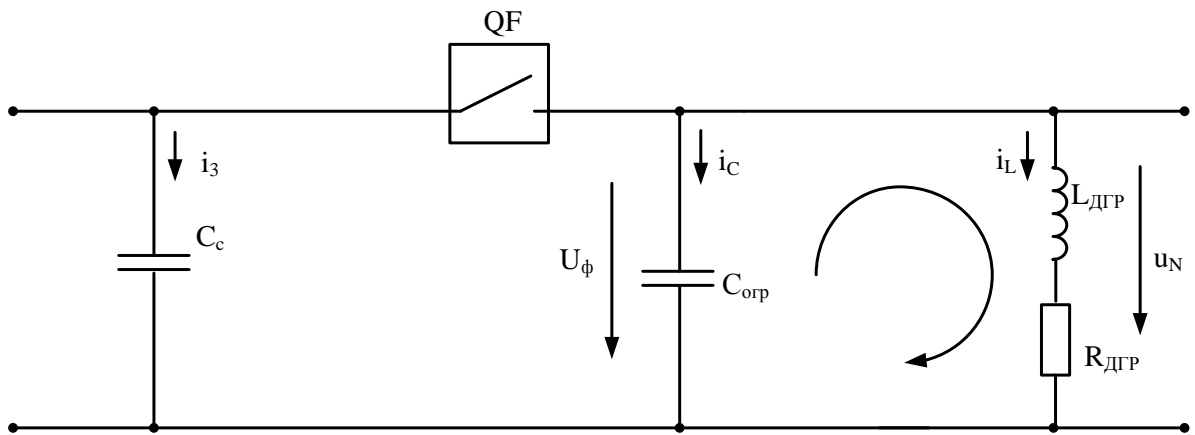


Рисунок 4.7 – Схема замещения УЭН сети с компенсированной нейтралью при использовании RC – ограничителя:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора;  $C_{огр}$  – емкость RC – ограничителя;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Как видно из рис. 4.7, схема замещения обмотки ДГР при использовании RC – ограничителя не отличается от схемы без использования RC – ограничителя (рис. 3.5), следовательно, переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сети с компенсированной нейтралью при использовании RC – ограничителя в результате группового отключения нагрузки, описываются следующим уравнением:

$$u_{Ncb}(t) = \frac{U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \text{arctg} \left[ \frac{-(i_{ост} - U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{огр})}{C_{огр} \cdot \omega_0 \cdot U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \right\} \quad (4.4)$$

В свою очередь, напряжения на секции шин, согласно системе уравнений 3.1, будут иметь следующий вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{\text{мфА}} \cdot \sin \omega_{50}t - u_{\text{N CB}} \\ u_B(t) &= U_{\text{мфВ}} \cdot \sin(\omega_{50}t - 120^\circ) - u_{\text{N CB}} \\ u_C(t) &= U_{\text{мфС}} \cdot \sin(\omega_{50}t - 240^\circ) - u_{\text{N CB}} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Расчет перенапряжений, возникающих на зажимах дугогасящего реактора и секциях шин сети с компенсированной нейтралью, выполнен на примере ДГР типа РЗДСОМ – 380 квар и стандартного РС – ограничителя с емкостью  $C_{\text{огр}} = 3 \cdot C_{\Phi} = 3 \cdot 0,25 = 0,75$  мкФ.

По выражению (4.4) рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{\text{N CB}}(t)$ .

Из пунктов 3.3 и 3.4 данной работы следует, что результаты измерений при углах среза  $\psi = 10^\circ$  и  $\psi = 20^\circ$  практически не отличаются друг от друга, поэтому для дальнейшего анализа будем использовать угол среза  $\psi = 10^\circ$ , который позволяет оценить характер переходных процессов, возникающих в УЭН при групповом отключении нагрузки от секции шин.

В табл. 4.3, П8.1, П8.2 (прил. 8) приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения напряжения, возникающего на секциях шин, при использовании РС – ограничителя. Данные приведены в зависимости от угла сдвига фаз –  $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ . Из таблиц и графиков (прил. 9, рис. П9.1÷9.10) видно, что при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^\circ$ , максимальные перенапряжения возникают на V отпайке ДГР. Кратность перенапряжений на секциях шин в данных условиях достигает  $4,31U_{\text{ном}}$  (табл. П8.1), (рис. П9.4). На I, II, III и IV отпайках максимальная кратность перенапряжения на секциях шин соответственно составляет 3,26; 3,61; 3,86; 4,12 (прил. 8, табл. П8.1). При угле сдвига фаз  $\varphi = 30^\circ$  максимальные перенапряжения возникают также на V отпайке ДГР и составляют 55154 В, на I отпайке максимальная кратность перенапряжения составляет  $4,19U_{\text{ном}}$  (рис. 4.8, 4.9).

Таким образом, при использовании РС – ограничителя с емкостью  $C_{\text{огр}} = 3 \cdot C_{\Phi} = 3 \cdot 0,25 = 0,75$  мкФ КП в УЭН снижаются до  $5,5U_{\text{ном}}$  при  $I_{\text{ОЗЗ}} = 52$  А и до  $4,18U_{\text{ном}}$  при  $I_{\text{ОЗЗ}} = 26,5$  А.

Таблица 4.3 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ отпайки	$U_L$ , В	$U_\phi$ , В	$I_L$ , А	$C_{с.ш.}$ , мкФ	$f_{к.и.}$ , Гц	$u_{N.св.мах}(t)$ , В	$u_{Амах}(t)$ , В	$u_{Вмах}(t)$ , В	$u_{Смах}(t)$ , В	$K = u_{N.св.мах}/U_L$	$K_A = u_{Амах}/U_L$	$K_B = u_{Вмах}/U_L$	$K_C = u_{Смах}/U_L$
1	10000	5773,5	26,5	15	500	33943	41932	41942	41829	3,39	4,19	4,19	4,18
2	10000	5773,5	33,5	15	555	38098	46252	45509	45559	3,81	4,63	4,55	4,56
3	10000	5773,5	40	15	606	41661	49644	49093	49438	4,17	4,96	4,91	4,94
4	10000	5773,5	46,5	15	645	44888	52599	52477	52686	4,49	5,26	5,25	5,27
5	10000	5773,5	52	15	684	47451	55133	55154	55387	4,75	5,51	5,52	5,54

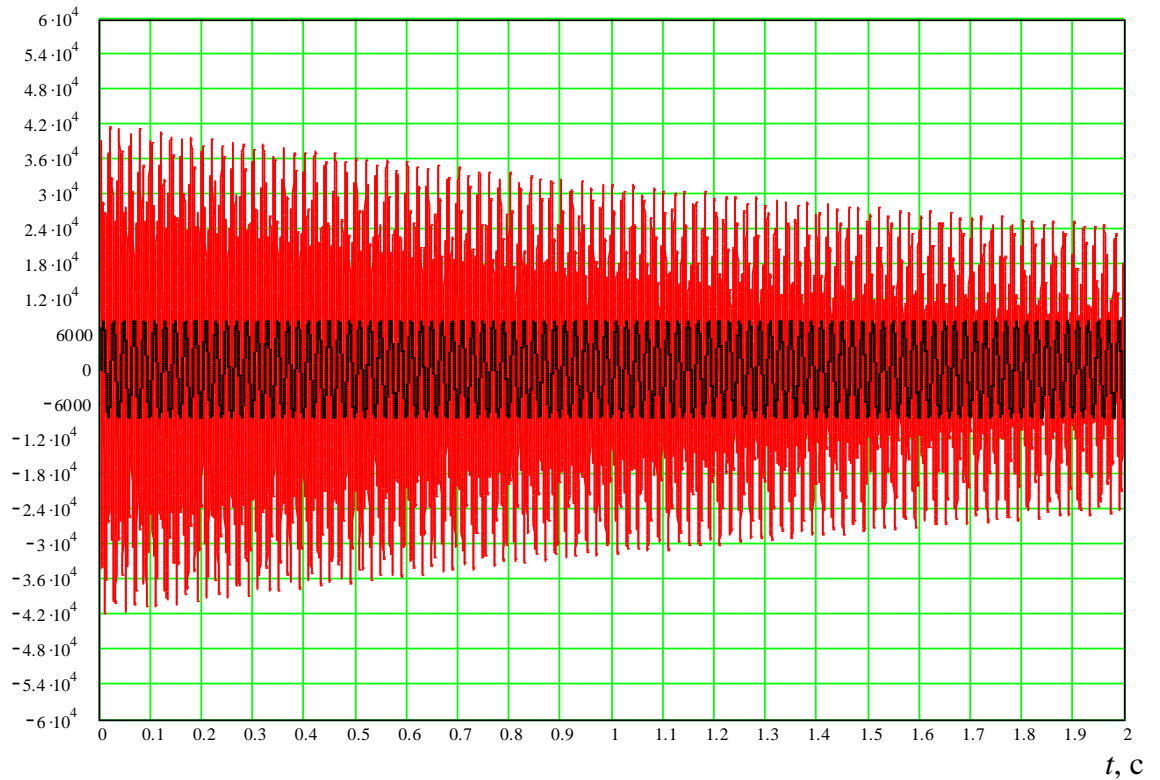
$u_B(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.8 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi=10^0$ ,  $\varphi=30^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5 \text{ А}$ )

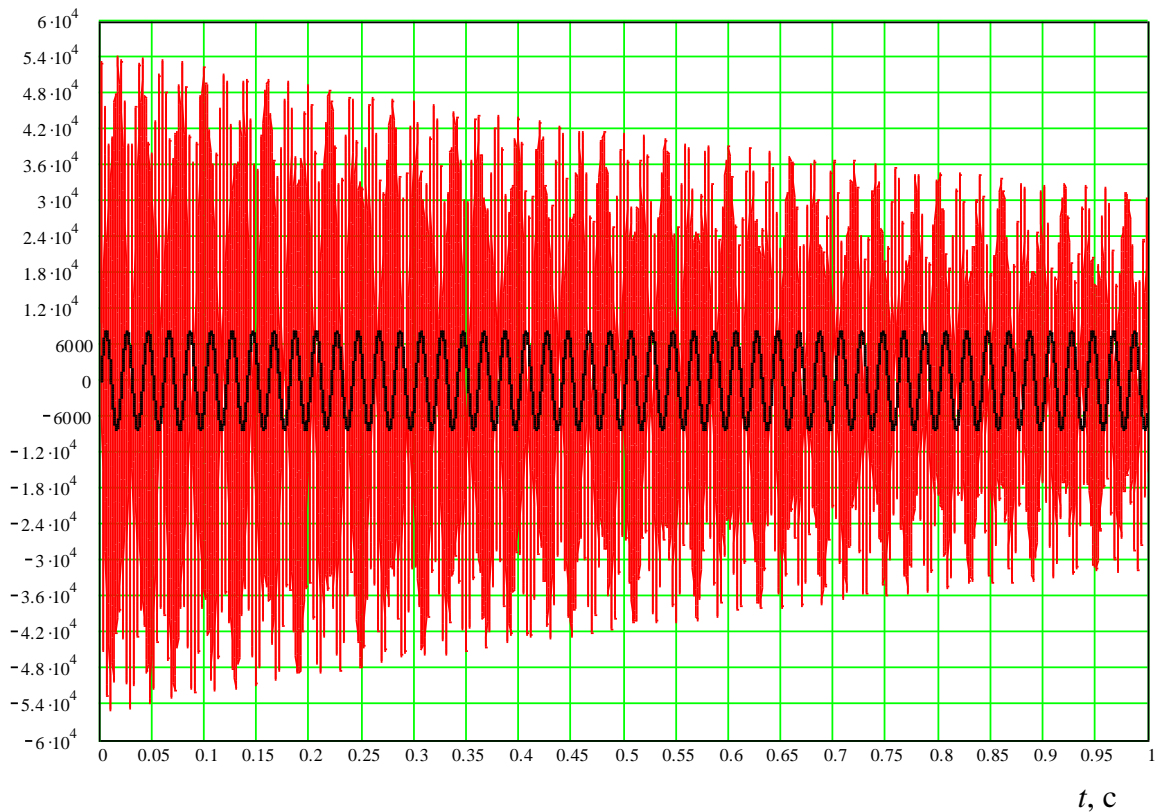
 $u_B(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.9 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi=10^0$ ,  $\varphi=30^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

Как видно из графиков рис. 4.8, 4.9, стандартный RC – ограничитель не пригоден для защиты от КП в УЭН сети с компенсированной нейтралью, т.к. не ограничивает перенапряжения в УЭН до допустимого значения.

Поэтому для дальнейшего снижения кратности перенапряжений необходимо применение дополнительных мер, позволяющих ограничить опасные перенапряжения: частичное заземление нейтрали сети через резистор с использованием RC – ограничителя на секциях шин.

#### 4.5 Влияние стандартных RC – ограничителей на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с комбинированной нейтралью

При использовании RC – ограничителей эквивалентная схема замещения распределительной сети с комбинированным режимом нейтрали РП 10 кВ в случае группового отключения нагрузки в результате ОЗЗ имеет вид:

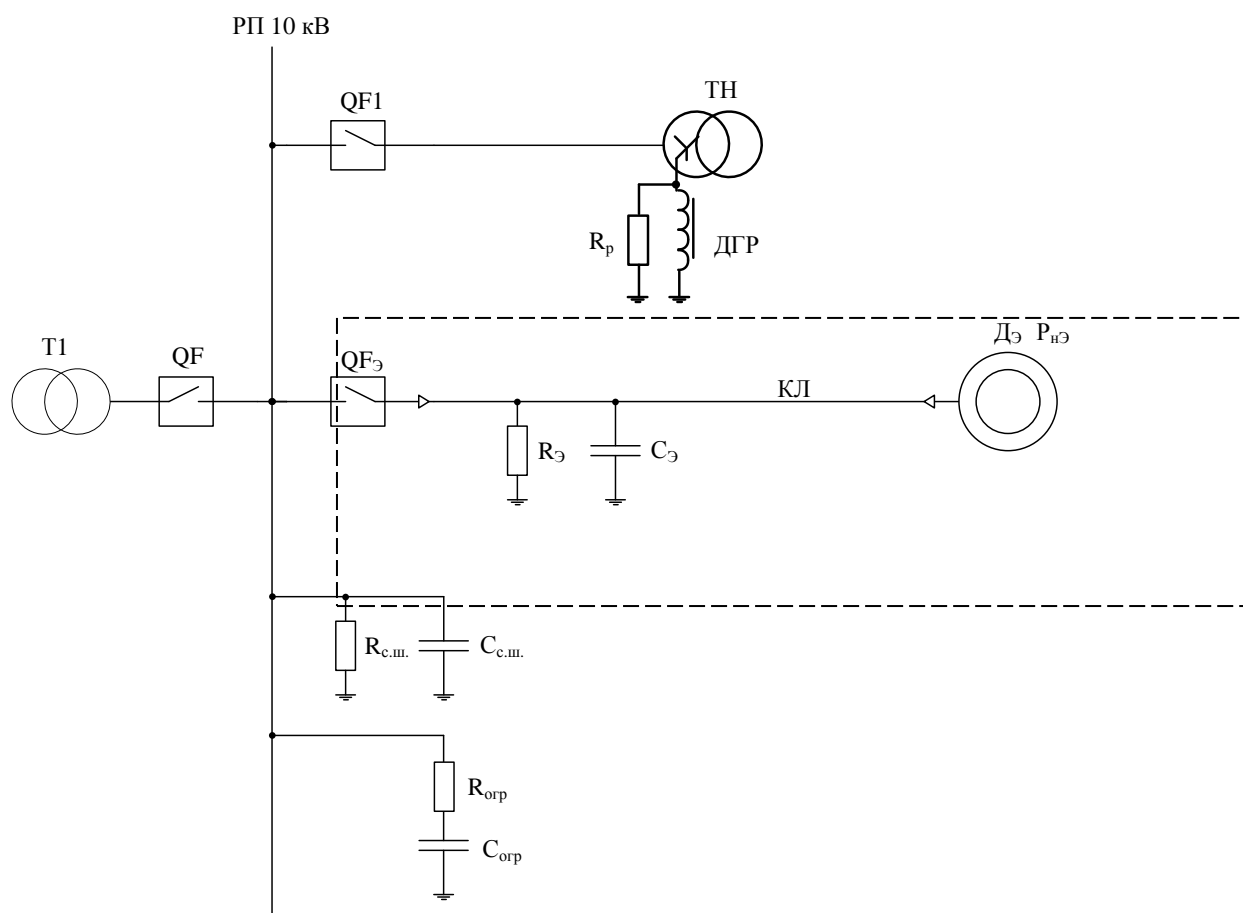


Рисунок 4.10 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10 кВ

Схема замещения УЭН сети с комбинированным режимом нейтрали с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид:

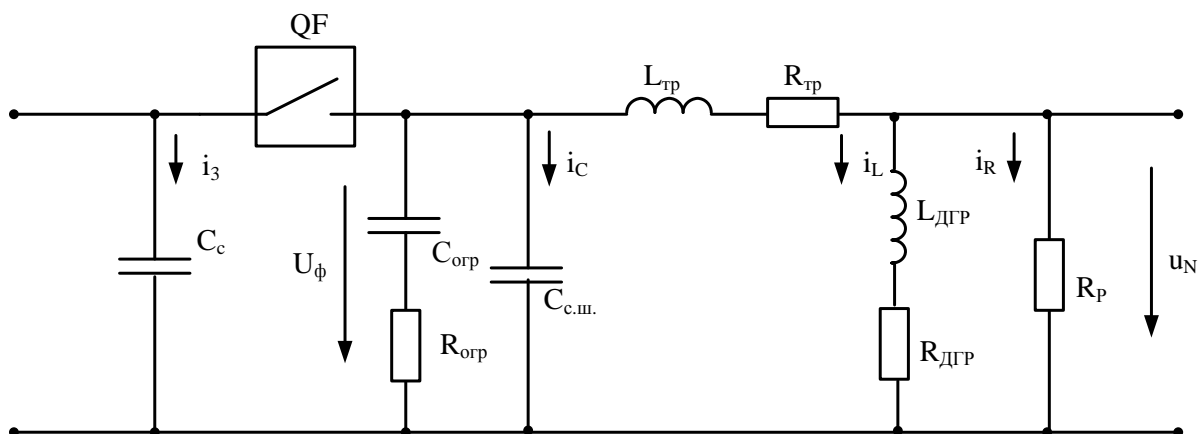


Рисунок 4.11 – Схема замещения УЭН сети с комбинированной нейтралью при использовании RC – ограничителя:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность трансформатора;  $R_{тр}$  – активное сопротивление трансформатора;  $L_{ДГР}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{ДГР}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора;  $R_p$  – активное сопротивление резистора,  $R_{огр}$  – активное сопротивление RC – ограничителя;  $C_{огр.}$  – емкость RC – ограничителя;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

При математическом моделировании принимаем ряд допущений:

1. Межвитковую емкость в ДГР не учитываем, ввиду ее незначительности – 8% от емкости фазы по отношению к земле.
2. Обмотка ДГР является линейной цепью.
3. В диапазоне частот от 50 Гц до 125 КГц индуктивность обмотки ДГР остается практически постоянной.

5. Емкостное сопротивление секции шин и RC – ограничителя намного больше активного сопротивления секции шин и RC – ограничителя, а также емкость RC – ограничителя намного больше емкости секции шин:  $X_{C_{с.ш.}} \gg R_{C_{с.ш.}}$ ,  $X_{C_{огр.}} \gg R_{C_{огр.}}$  и  $C_{огр.} \gg C_{с.ш.}$

В соответствии с этими допущениями, схема замещения при резистивно-индуктивном заземлении нейтрали с учетом емкости RC – ограничителя имеет вид, представленный на рисунке 4.12.

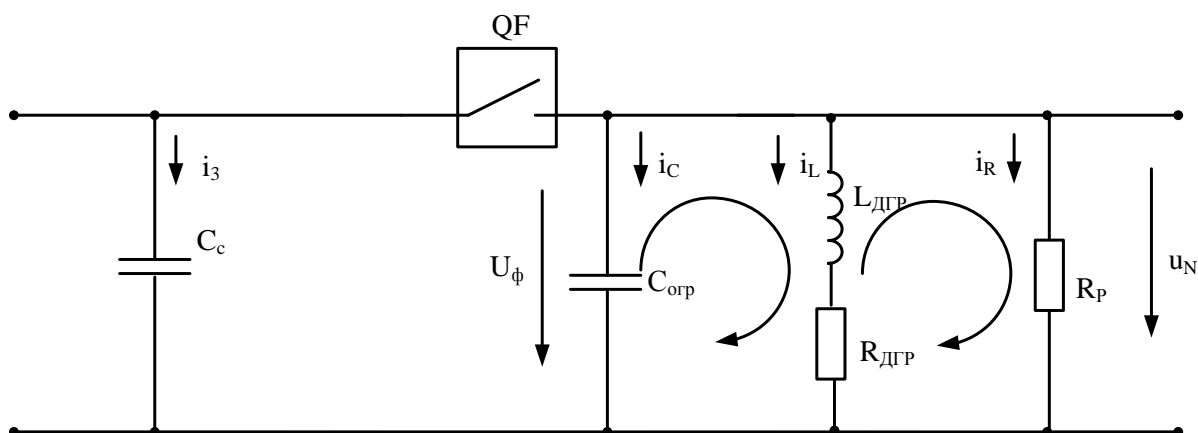


Рисунок 4.12 – Схема замещения УЭН сети с комбинированной нейтралью при использовании RC – ограничителя:  $L_{\text{ДГР}}$  – индуктивность дугогасящего реактора;  $R_{\text{ДГР}}$  – активное сопротивление дугогасящего реактора;  $R_{\text{р}}$  – активное сопротивление резистора,  $R_{\text{огр}}$  – активное сопротивление RC – ограничителя;  $C_{\text{огр}}$  – емкость RC – ограничителя;  $C_{\text{с}}$  – 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 уравнением:

$$u_{\text{Ncb}}(t) = \frac{U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta \cdot t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \text{arcctg} \left[ -\frac{(i_{\text{ост}} \cdot R_{\text{р}} + U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}} \cdot \omega_0 \cdot U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} + \frac{\delta}{\omega_0} \right] \right\} \quad (4.6)$$

Напряжения на секции шин имеют вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{A}}(t) &= U_{\text{мФA}} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{\text{Ncb}} \\ u_{\text{B}}(t) &= U_{\text{мФB}} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{\text{Ncb}} \\ u_{\text{C}}(t) &= U_{\text{мФC}} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{\text{Ncb}} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

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 500 Ом и РС – ограничителя с емкостью  $C_{огр} = 3 \cdot C_{\Phi} = 3 \cdot 0,25 = 0,75$  мкФ.

По выражению (4.6) были рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{Ncb}(t)$ .

В табл. 4.4 приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения напряжения, возникающего на секциях шин при использовании РС – ограничителя с резистивным заземлением нейтрали. Данные приведены в зависимости от угла сдвига фаз –  $\varphi = 30^0$  и угла среза  $\psi = 20^0$ . Из таблицы и графиков (рис. 4.13, 4.14) видно, что максимальные перенапряжения возникают на V отпайке ДГР. Кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин в данных условиях достигает 2,92 (рис. 4.14), что превышает допустимое значение кратности коммутационных перенапряжений. Переходный процесс носит апериодический характер.

Таким образом, из анализа табл. 4.4 и графиков (рис. 4.13, 4.14) видно, что при токе ОЗЗ, превышающем 46,5 А, стандартный ограничитель не осуществляет эффективное ограничение коммутационных перенапряжений.

Поэтому для сетей с токами замыкания на землю больше 46,5 А емкость РС – ограничителя должна быть увеличена до значения 0,5 мкФ на фазу, а зная емкость РС – ограничителя, предназначенного для установки в УЭН, можно рассчитать окончательные параметры данного РС - ограничителя.

Таблица 4.4 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 30^0$

№ от- пайки	$U_L, В$	$U_{\phi}, В$	$I_L, А$	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.max}(t),$ В	$u_{Amax}(t),$ В	$u_{Bmax}(t),$ В	$u_{Cmax}(t),$ В	$K =$	$K_A =$	$K_B =$	$K_C =$
											$u_{N.св.max}/$ $U_{л}$	$u_{Amax}/$ $U_{л}$	$u_{Bmax}/$ $U_{л}$	$u_{Cmax}/$ $U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,75	500	453	13403	15315	19443	8164	1,34	1,53	1,94	0,82
2	10000	5773,5	33,5			566	16199	17979	22373	8481	1,62	1,80	2,24	0,85
3	10000	5773,5	40			670	18726	20323	24908	11016	1,87	2,03	2,49	1,10
4	10000	5773,5	46,5			681	21101	22630	27282	13390	2,11	2,26	2,73	1,34
5	10000	5773,5	52			696	22978	24507	29217	15268	2,30	2,45	2,92	1,53



Рисунок 4.13 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, I_{ДГР} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом,  $C_{огр} = 0,25$  мкФ на фазу)

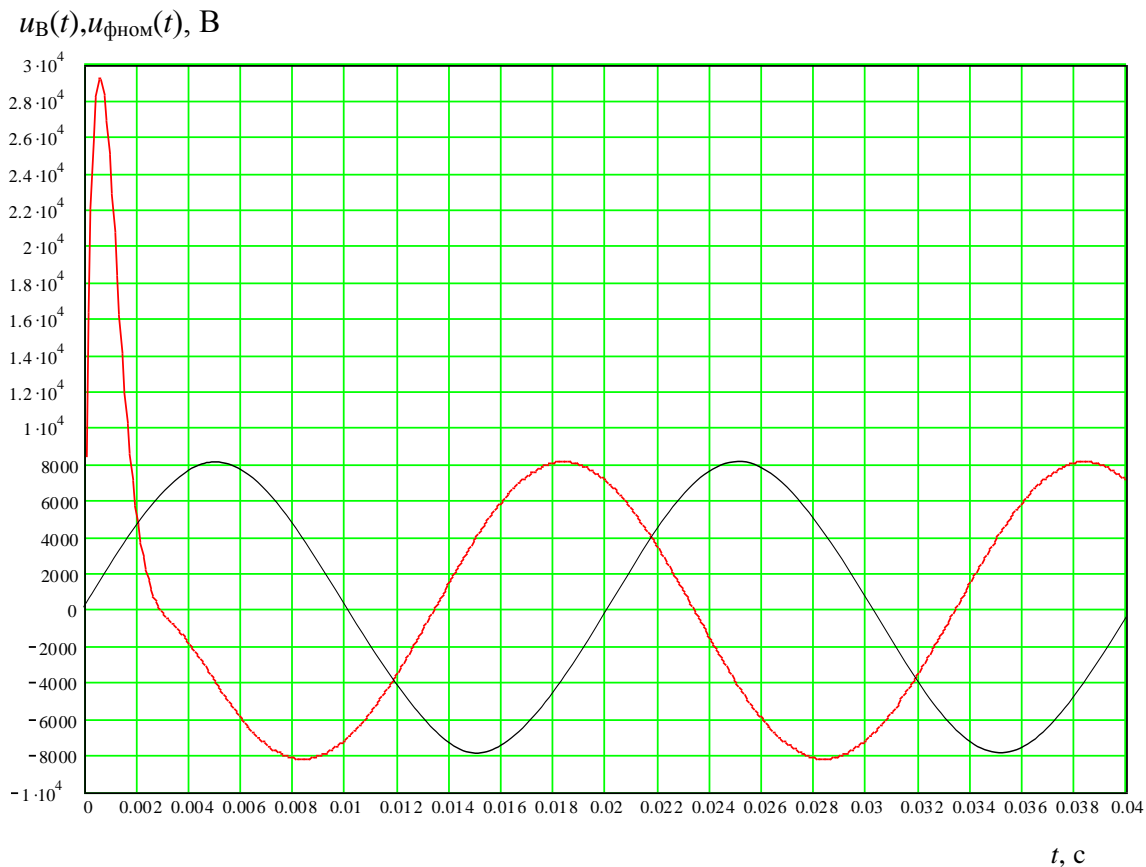


Рисунок 4.14 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, R_p = 500$  Ом,  $C_{огр} = 0,25$  мкФ на фазу)

#### **4.6 Влияние RC – ограничителей с емкостью $C_{\text{огр}}=0,5$ мкФ на величину коммутационных перенапряжений в УЭН сети с комбинированной нейтралью**

Схема замещения распределительной сети РП 10 кВ в случае группового отключения нагрузки от секции шин в режиме однофазного замыкания на землю имеет вид, представленный на рис. 4.5.

Схема замещения обмотки УЭН сети с комбинированным режимом нейтрали, с учетом допущений, имеет вид, представленный на рис. 4.7.

Переходные процессы, возникающие на зажимах ДГР сетей с нейтралью, частично заземленной через резистор с добавлением RC – ограничителя, в результате группового отключения нагрузки, описываются выражением (4.4).

Напряжения на секции шин имеют вид (4.5).

По выражениям (4.4), (4.5) были рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{\text{Нсв}}(t)$ . В таблицах 4.5, П10.1, П10.2 (прил.10) приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения напряжения, возникающего на секциях шин при использовании RC – ограничителя с резистивным заземлением нейтрали. Данные приведены в зависимости от угла сдвига фаз –  $\varphi = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}$ . Из таблиц и графиков (рис. 4.15 ÷ 4.18), (прил. 11, рис. П11.1 ÷ П11.12) видно, что максимальные перенапряжения возникают при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^{\circ}$  на V отпайке ДГР, при использовании резистора в нейтрали сети сопротивлением 5000 Ом (рис. П11.3 ÷ 11.4).

Таблица 4.5 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ от- пайки	$U_L$ , В	$U_\phi$ , В	$I_L$ , А	$C_{с.ш.}$ , мкФ	$R_p$ , ОМ	$f_{ки}$ , Гц	$u_{N.св.маx}(t)$ В	$u_{Aмаx}(t)$ , В	$u_{Bмаx}(t)$ , В	$u_{Cмаx}(t)$ , В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_L$	$K_A =$ $u_{Aмаx}/U_L$	$K_B =$ $u_{Bмаx}/U_L$	$K_C =$ $u_{Cмаx}/U_L$
1	10000	5773,5	26,5	1,5	5000	159	21742	25376	26473	22542	2,17	2,54	2,65	2,25
3	10000	5773,5	40			192	27134	30138	32287	29195	2,71	3,01	3,23	2,92
5	10000	5773,5	52			204	31152	33904	36616	33840	3,12	3,39	3,66	3,38
1	10000	5773,5	26,5	1,5	2500	166	19767	23295	24626	17960	1,98	2,33	2,46	1,80
3	10000	5773,5	40			198	25064	28029	30336	24171	2,51	2,80	3,03	2,42
5	10000	5773,5	52			211	29111	31690	34575	28514	2,91	3,17	3,46	2,85
1	10000	5773,5	26,5	1,5	1000	172	15483	18682	20673	10258	1,55	1,87	2,07	1,03
3	10000	5773,5	40			208	20347	23063	25812	12361	2,03	2,31	2,58	1,24
5	10000	5773,5	52			215	24109	26552	29761	18140	2,41	2,66	2,98	1,81
1	10000	5773,5	26,5	1,5	500	188	11238	14095	16816	8174	1,12	1,41	1,68	0,82
3	10000	5773,5	40			215	15357	17766	21081	8314	1,54	1,78	2,11	0,83
5	10000	5773,5	52			221	18621	20803	24455	10757	1,86	2,08	2,45	1,08
1	10000	5773,5	26,5	1,5	200	-	6023	10097	12251	8367	0,60	1,01	1,23	0,84
3	10000	5773,5	40			-	8626	10619	14828	8199	0,86	1,06	1,48	0,82
5	10000	5773,5	52			-	10827	12562	17028	8169	1,08	1,26	1,70	0,82

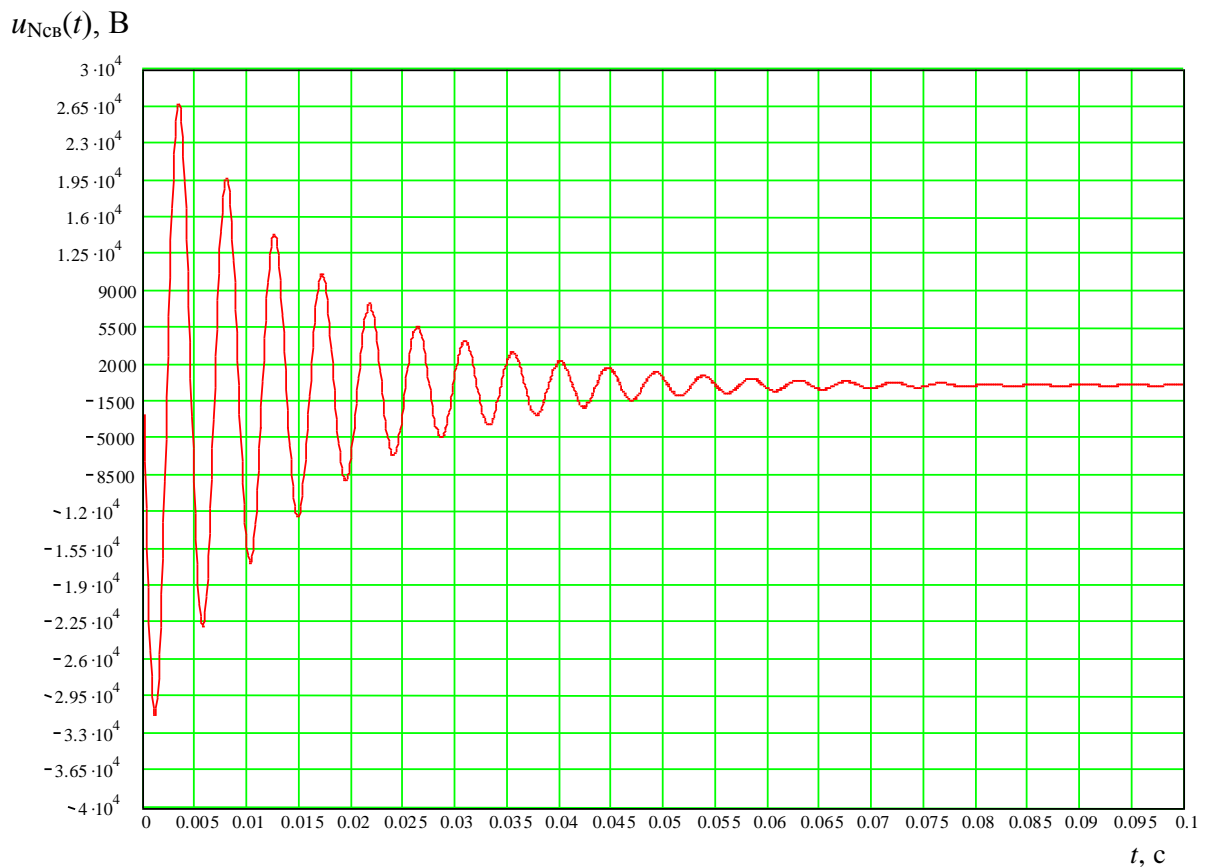


Рисунок 4.15 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52$  А,  $R_p = 5000$  Ом,  $C_{\text{огр}} = 0,5$  мкФ на фазу)

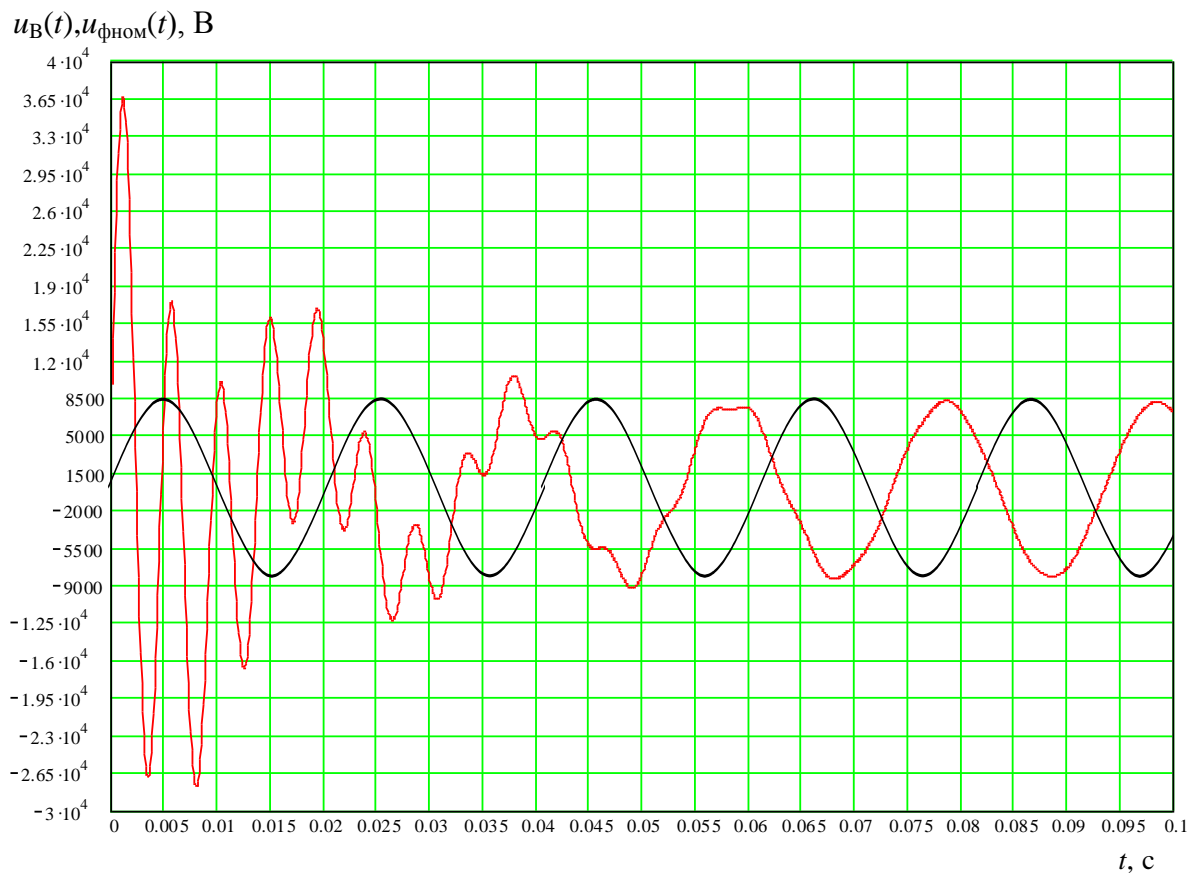


Рисунок 4.16 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{ДГР}} = 52$  А,  $R_p = 5000$  Ом,  $C_{\text{огр}} = 0,5$  мкФ на фазу)

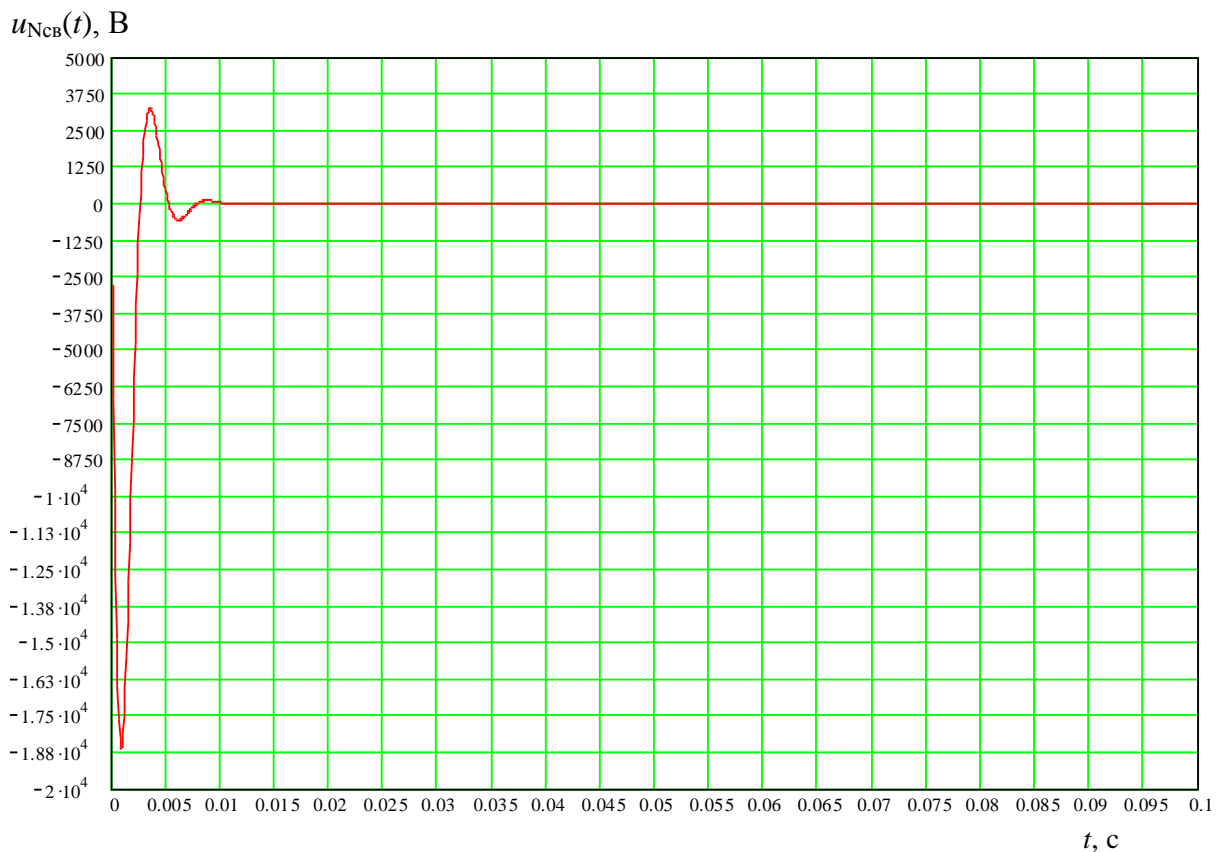


Рисунок 4.17 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{ДГР} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом,  $C_{огр} = 0,5$  мкФ на фазу)

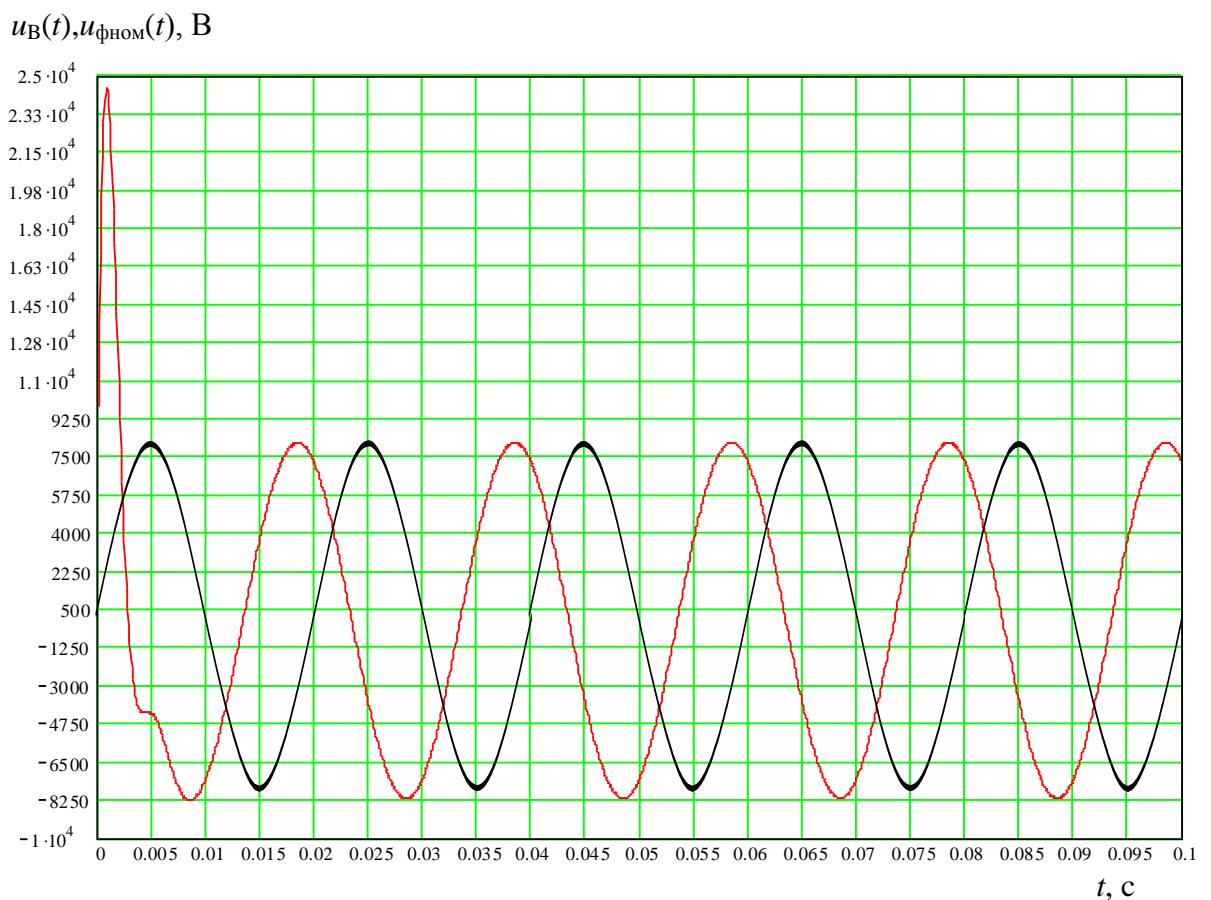


Рисунок 4.18 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{дгр} = 52$  А,  $R_p = 500$  Ом,  $C_{огр} = 0,5$  мкФ на фазу)

Кратность перенапряжений на секциях шин в данных условиях достигает 3,79 (рис. П11.4).

При включении резистора с сопротивлением 500 Ом перенапряжения на секциях шин снижаются до 25514 В (рис. П11.6).

Рассмотренный вариант является наиболее благоприятным для электрооборудования, находящегося в непосредственной близости от УЭН, так как кратность перенапряжения снижается с 11,89 до 2,55.

Данные перенапряжения допустимы для высоковольтного электрооборудования. Таким образом, при использовании RC – ограничителя с емкостью  $C_{огр} = 3 \cdot C_{Ф} = 3 \cdot 0,5 = 1,5$  мкФ и резистора 500 Ом коммутационные перенапряжения снижаются до  $2,5U_{ном}$ .

#### **4.7 Влияние RC – ограничителя и резистора, предназначенного для заземления нейтрали сети, на характер биений напряжения в сетях с изолированной нейтралью**

В сети с изолированной нейтралью и токами однофазного замыкания на землю до 20 А коммутационные перенапряжения не превышают 1,42, что ниже допустимого значения, то есть УЭН данной сети можно использовать без дополнительных средств ограничения перенапряжений. Однако, учитывая то, что переходные процессы в данной сети длятся, как минимум, 1с и более, то в результате этого на фазах будут наблюдаться биения напряжения, которые могут негативно повлиять на работу защит и вторичных цепей на самой подстанции.

Рассмотрим влияние резистора, включенного в нейтраль данной сети, на характер биений напряжения.

Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 6 –10 кВ с использованием заземления нейтрали через резистор, в случае группового отключения нагрузки в результате ОЗЗ, будет иметь вид:

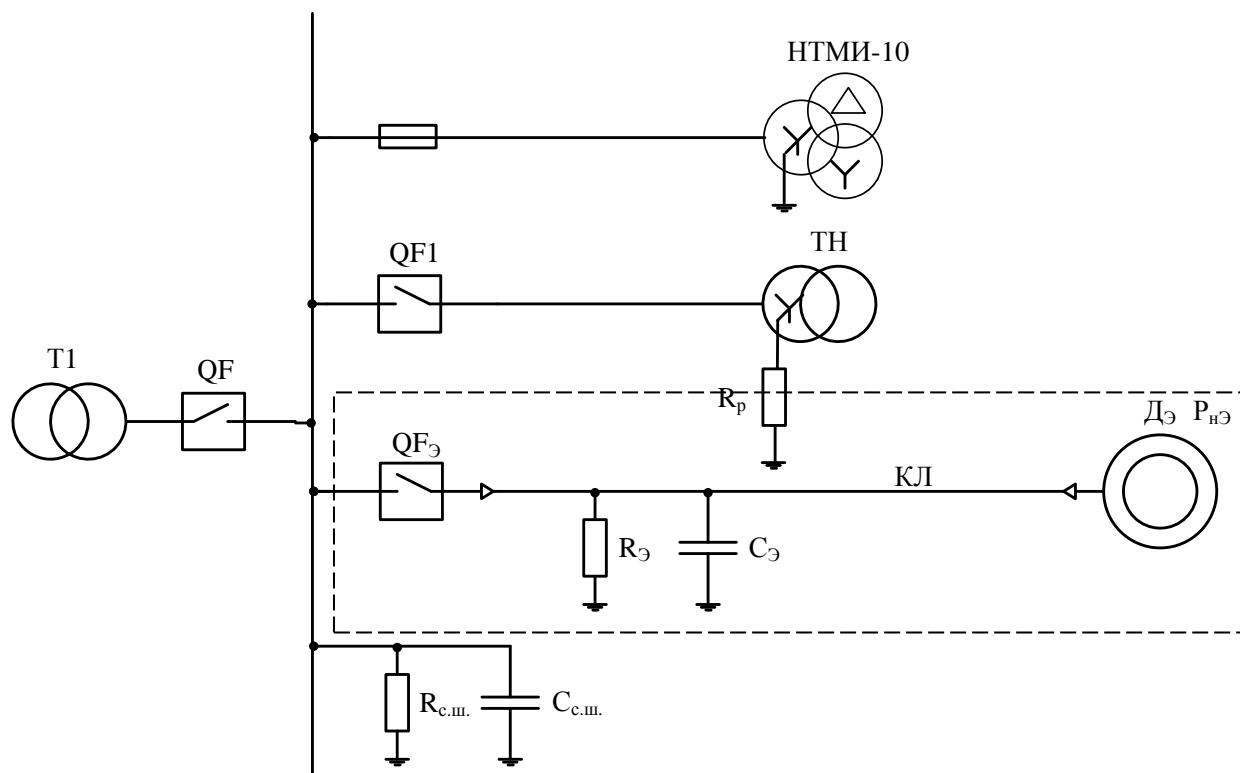


Рисунок 4.19 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети

$\frac{1}{R_{\text{э}}} = \frac{1}{R_{\text{к1}}} + \frac{1}{R_{\text{к2}}} + \frac{1}{R_{\text{к3}}}$  – эквивалентная проводимость изоляции кабельных линий;  $C_{\text{э}} = C_{\text{к1}} + C_{\text{к2}} + C_{\text{к3}}$  – эквивалентная емкость кабельной линии;  $P_{\text{нэ}} = P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + P_{\text{н3}}$  – эквивалентная двигательная нагрузка;  $R_{\text{с.ш.}}$  – активное сопротивление секции шин;  $C_{\text{с.ш.}}$  – емкость секции шин;  $R_{\text{р}}$  – активное сопротивление резистора.

При математическом моделировании принимаем допущения, которые были описаны в пункте 3.5.

В соответствии с этими допущениями, схема замещения при резистивном заземлении нейтрали с учетом емкости секции шин по отношению к земле имеет вид, представленный на рис. 4.20.

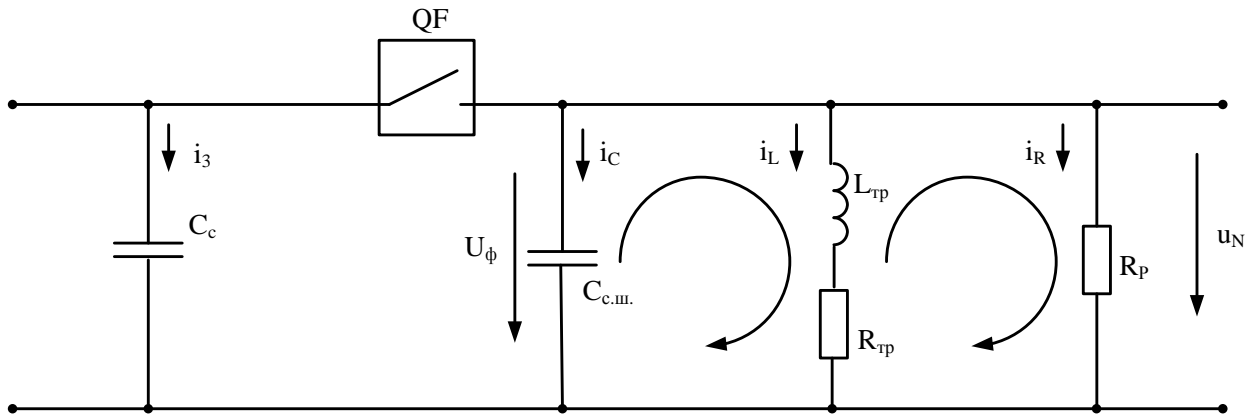


Рисунок 4.20 – Схема замещения УЭН с трансформатором напряжения – НТМИ и резистором в нейтрали сети:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность трансформатора;  $R_{тр}$  – активное сопротивление трансформатора;  $R_p$  – активное сопротивление резистора;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Как видно из рис. 4.20, данная схема аналогична схеме замещения УЭН с комбинированной нейтралью, поэтому, в соответствии с п. 3.3 данной главы, переходной процесс, возникающий в данном колебательном контуре, будет описываться аналогичным выражением:

$$u_{N_{св}}(t) = \frac{U_{м\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta \cdot t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \operatorname{arctg} \left[ -\frac{(i_{ост} \cdot R_p + U_{м\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{с.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{м\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} + \frac{\delta}{\omega_0} \right] \right\} \quad (4.8)$$

Напряжения на секции шин, согласно системе 3.1 (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{м\Phi A} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{N_{св}} \\ u_B(t) &= U_{м\Phi B} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{N_{св}} \\ u_C(t) &= U_{м\Phi C} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{N_{св}} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Емкость секции шин РП, РУ, ТП, ГПП находится в пределах  $C_{с.ш.} = 0,05$  мкФ. Параметры трансформатора напряжения приведены в п. 3.5.

Для исследования влияния активного сопротивления, включенного в нейтраль системы электроснабжения, на биения, возникающие на секциях шин, были использованы резисторы с активным сопротивлением: 5000, 1000, 500 Ом.

Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и высоковольтных обмотках трансформатора напряжения, приведены в табл. 4.6, графики переходного процесса представлены на рис. 4.21 ÷ 4.24.

При анализе данных, представленных в таблице 4.6, можно сделать вывод о том, что при резистивном заземлении нейтрали сети с изолированной нейтралью кратность коммутационных перенапряжений не превышает 0,99, а биения, возникающие в сети с изолированной нейтралью, исчезают. Как видно из графиков рис. 4.21 ÷ 4.24, уровень перенапряжений практически не зависит от сопротивления резистора.

Рассмотрим влияние RC – ограничителя на биения напряжения в УЭН.

Таблица 4.6 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах трансформатора и секциях шин и угле среза

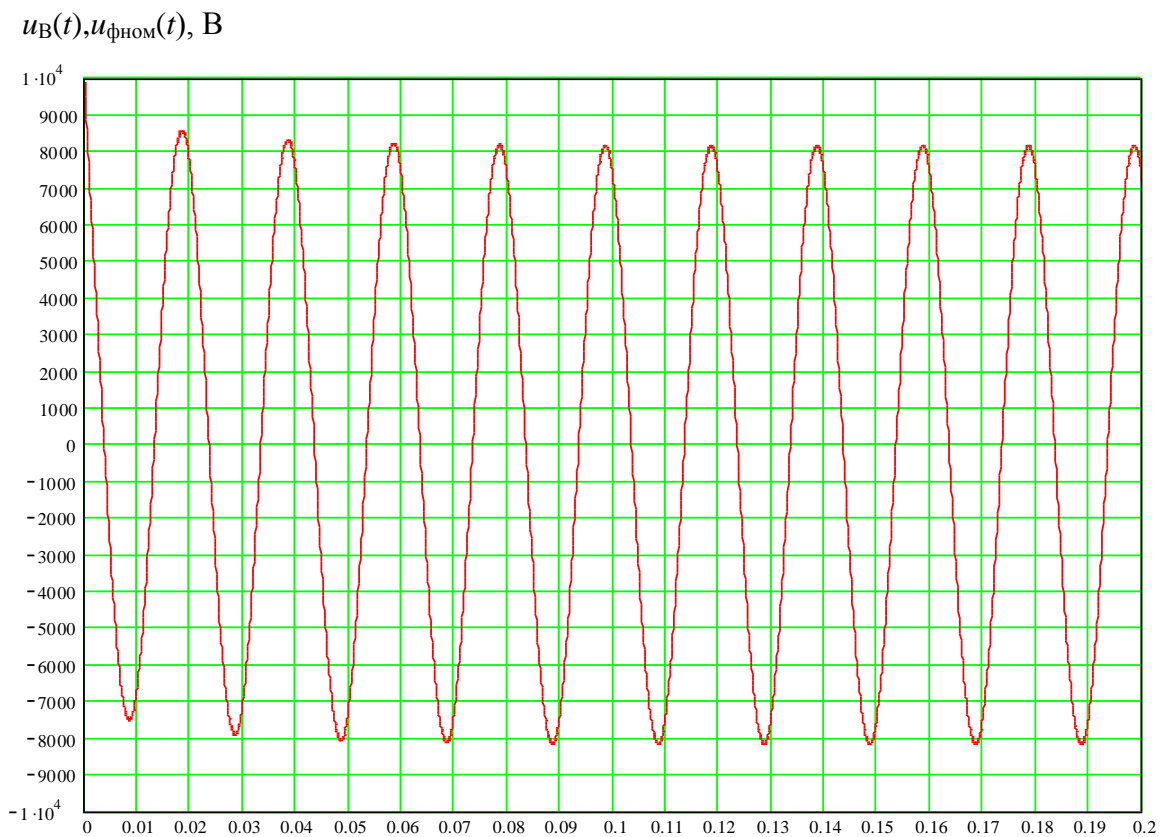
$\psi=10^0$  при угле сдвига фаз  $\varphi=0^0$

$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_{л}, А$	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_{р},$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.мах}(t),$ В	$u_{Амах}(t),$ В	$u_{Вмах}(t),$ В	$u_{Смах}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.мах}/U_{л}$	$K_{А=}$ $u_{Амах}/U_{л}$	$K_{В=}$ $u_{Вмах}/U_{л}$	$K_{С=}$ $u_{Смах}/U_{л}$
10000	5773,5	0,15	15	5000	476	2792	8936	9863	8725	0,28	0,89	0,99	0,87
10000	5773,5	0,15	15	1000	476	2792	8348	9863	8333	0,28	0,83	0,99	0,83
10000	5773,5	0,15	15	500	476	2792	8259	9863	8841	0,28	0,83	0,99	0,88



$t, \text{с}$

Рисунок 4.21 – Свободная составляющая напряжения смещения нейтрали при переходном процессе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000 \text{ Ом}$ )



$t, \text{с}$

Рисунок 4.22 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 5000 \text{ Ом}$ )

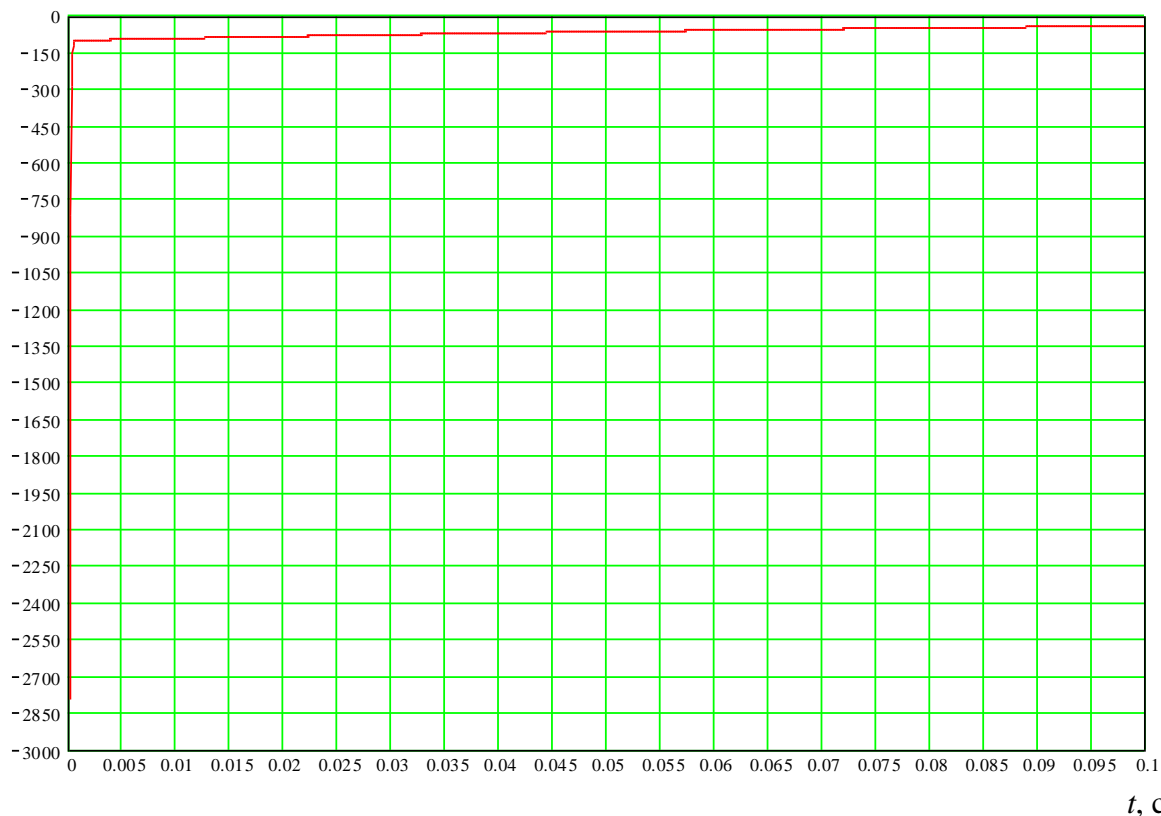
$u_{\text{Нсв}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.23 – Свободная составляющая напряжения смещения нейтрали при переходном процессе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}$ )

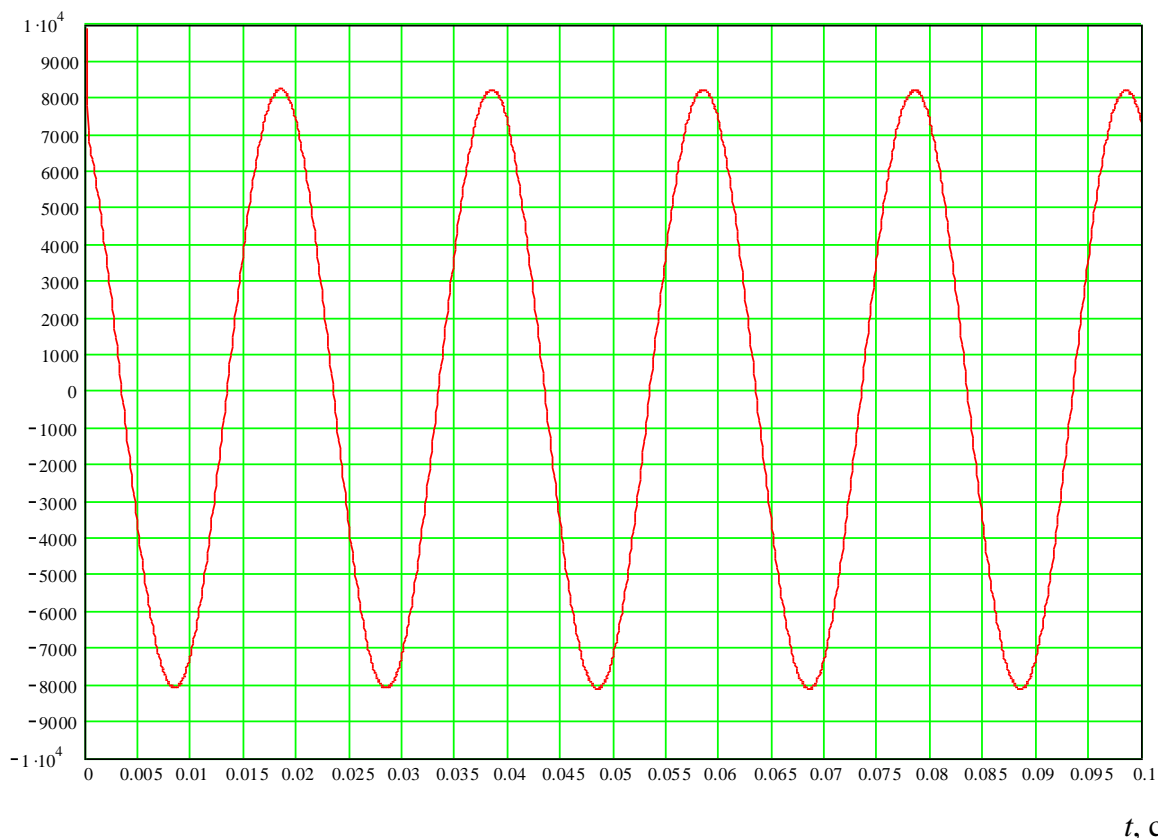
 $u_{\text{В}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.24 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, R_p = 500 \text{ Ом}$ )

Эквивалентная схема замещения распределительной сети с изолированной нейтралью при использовании RC – ограничителя, в случае группового отключения нагрузки в режиме ОЗЗ, имеет вид, представленный на рис. 4.25.

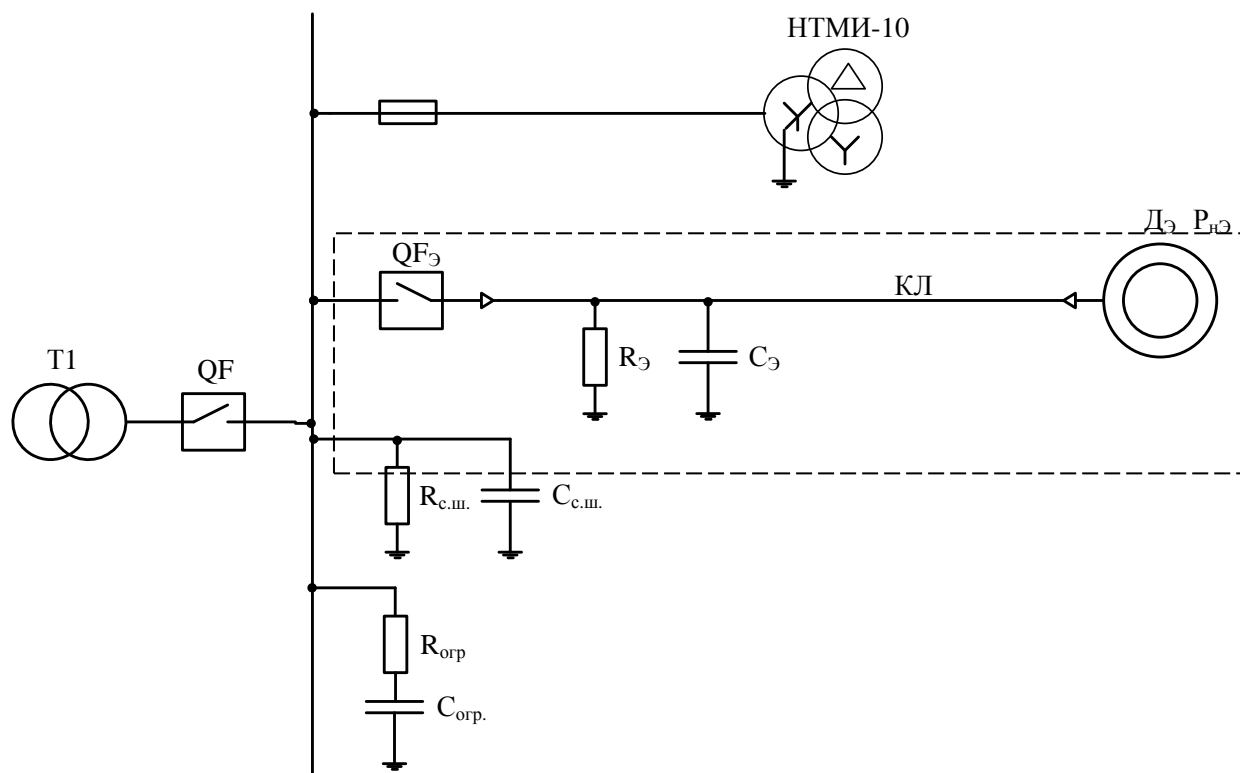


Рисунок 4.25 – Эквивалентная схема замещения распределительной сети РП 10

кВ:  $\frac{1}{R_{\text{Э}}} = \frac{1}{R_{\text{К1}}} + \frac{1}{R_{\text{К2}}} + \frac{1}{R_{\text{К3}}}$  – эквивалентная проводимость изоляции кабельных линий РП;  $C_{\text{Э}} = C_{\text{К1}} + C_{\text{К2}} + C_{\text{К}}$  – эквивалентная емкость кабельной линии РП;  $P_{\text{н3}} = P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + P_{\text{н3}}$  – эквивалентная двигательная нагрузка РП;  $R_{\text{с.ш.}}$  – активное сопротивление секции шин;  $C_{\text{с.ш.}}$  – емкость секции шин;  $R_{\text{огр}}$  – активное сопротивление RC – ограничителя;  $C_{\text{огр}}$  – емкость RC – ограничителя.

При математическом моделировании принимаем допущения, которые были описаны в пункте 3.5 данной работы. Кроме того, емкостное сопротивление секции шин и RC – ограничителя намного больше активного сопротивления секции шин и RC – ограничителя, а также емкость RC – ограничителя намного больше емкости секции шин:  $X_{\text{с.ш.}} \gg R_{\text{с.ш.}}$ ,  $X_{\text{огр.}} \gg R_{\text{огр.}}$  и  $C_{\text{огр.}} \gg C_{\text{с.ш.}}$ .

В соответствии с вышепринятыми допущениями, схема замещения УЭН при использовании RC – ограничителя будет иметь вид:

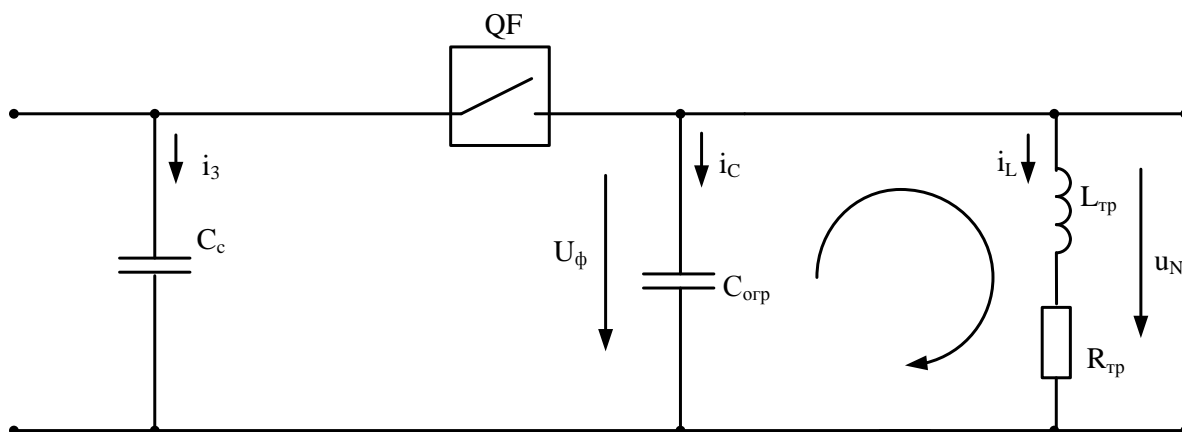


Рисунок 4.26 – Схема замещения УЭН с трансформатором напряжения – НТМИ и RC – ограничителем:  $C_{с.ш.}$  – емкость секции шин относительно земли;  $L_{тр}$  – индуктивность трансформатора;  $R_{тр}$  – активное сопротивление трансформатора;  $C_{огр.}$  – емкость RC – ограничителя;  $C_c$  – емкость распределительной сети.

Переходный процесс, возникающий в данном колебательном контуре, будет описываться выражением:

$$u_{Ncb}(t) = \frac{U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \cdot e^{-\delta \cdot t} \times \sin \left\{ \omega_0 t + \text{arcctg} \left[ \frac{-(i_{ост} - U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{огр.})}{C_{огр.} \cdot \omega_0 \cdot U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \right\} \quad (4.10)$$

Напряжения на секции шин имеют следующий вид (в зависимости от фазы):

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_{мфA} \cdot \sin \omega_{50} t - u_{Ncb} \\ u_B(t) &= U_{мфB} \cdot \sin(\omega_{50} t - 120^\circ) - u_{Ncb} \\ u_C(t) &= U_{мфC} \cdot \sin(\omega_{50} t - 240^\circ) - u_{Ncb} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и высоковольтных обмотках трансформатора

напряжения, приведены в табл. 4.7, графики переходного процесса представлены на рис. 4.27 ÷ 4.23.

Таблица 4.7 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах высоковольтной обмотки трансформатора напряжения НТМИ и секциях шин при угле среза  $\psi = 10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 30^0$

$U_{л},$ кВ	$U_{ф}$ кВ	$I_{L},$ А	$C_{с.ш.}$ мкФ	$u_{N,св.мах}$ $(t), В$	$u_{A-}$ $мах(t),$ В	$u_{B-}$ $мах(t),$ В	$u_{C-}$ $мах(t),$ В	$K =$ $u_{N,св.мах}/$ $U_{л}$	$K_{A=} =$ $u_{A-}$ $мах/U_{л}$	$K_{B=} =$ $u_{B-}$ $мах/U_{л}$	$K_{C=} =$ $u_{C-}$ $мах/U_{л}$
10	5,7	0,15	1,5	3309	11413	11091	11332	0,33	1,14	1,11	1,13

При анализе данных, представленных в табл. 4.7, можно сделать вывод о том, что при использовании РС – ограничителя с емкостью  $C_{огр}=0,5$  мкФ кратность перенапряжений не превышает значения 1,14, что ниже допустимого уровня, но больше значения при резистивном заземлении нейтрали. Биения, присутствующие в сети с изолированной нейтралью, немного сглаживаются, но все равно могут негативно сказаться на параметрах сети (рис. 4.27 ÷ 4.30).

Таким образом, в сети с изолированной нейтралью для ликвидации перенапряжений и биения амплитуды напряжения рационально использовать резистивное заземление нейтрали через резистор сопротивлением от 500 до 800 Ом. Однако снижение величины сопротивления резистора должно быть ограничено величиной тока ОЗЗ таким образом, чтобы данный ток не превышал 20 А для сетей напряжением 10 кВ и 30 А для сетей напряжением 6 кВ.

Следовательно, в подобных сетях установку средств ограничения перенапряжений можно не производить.

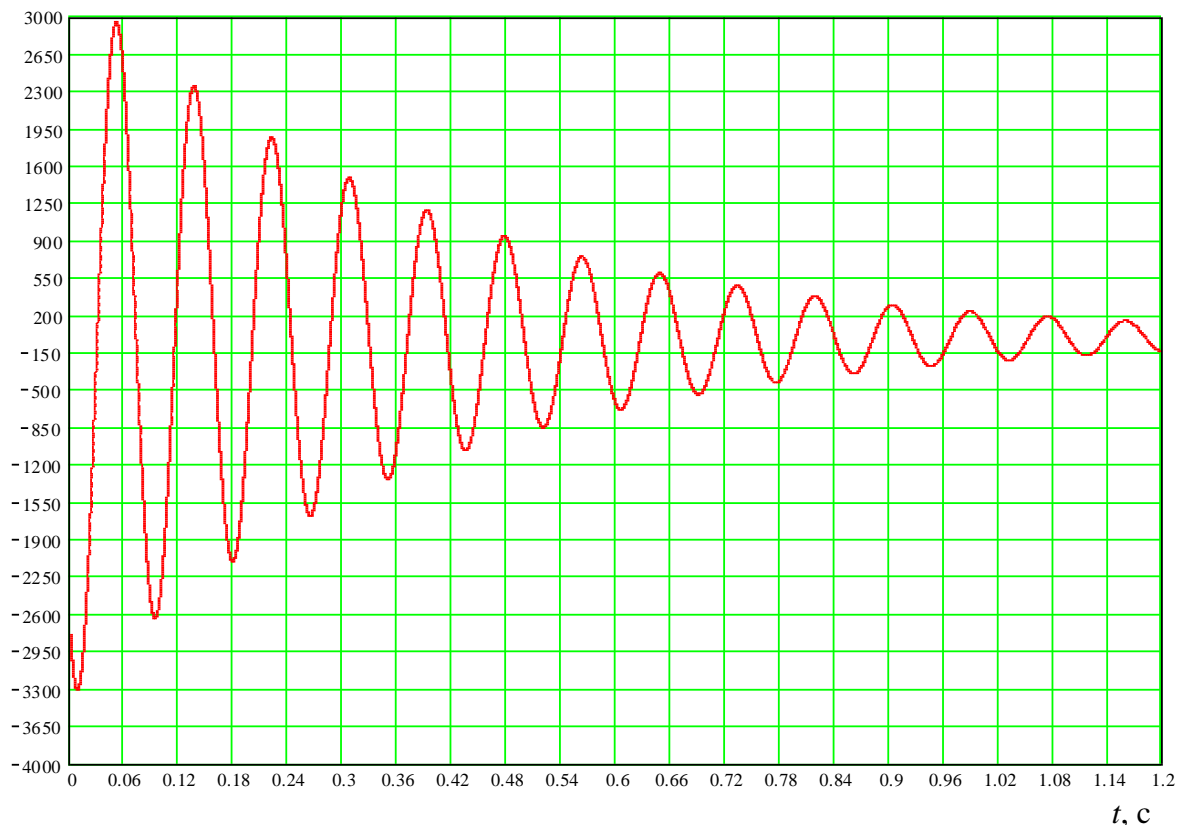
$u_{\text{Нсв}}(t), \text{В}$ 

Рисунок 4.27 – Свободная составляющая напряжения смещения нейтрали при переходном процессе ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

 $u_{\text{В}}(t), \text{В}$ 

Рисунок 4.28 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

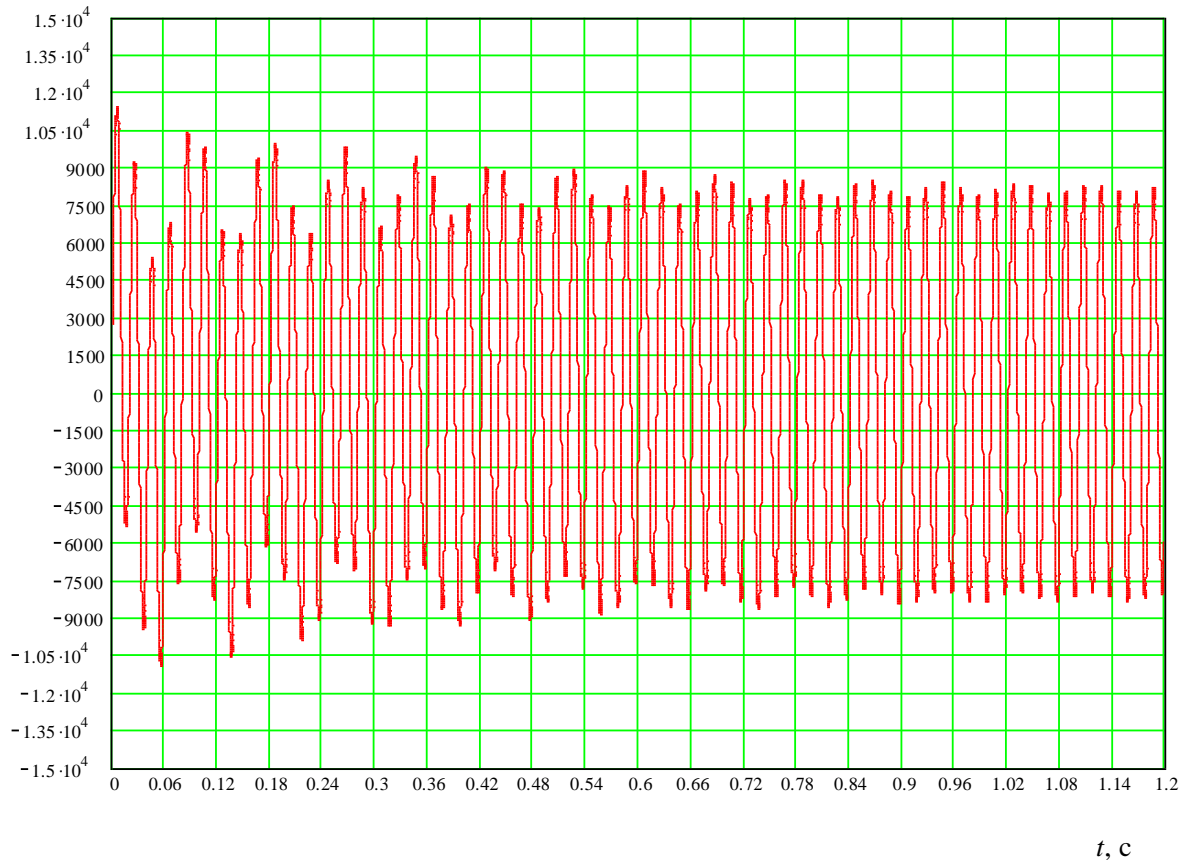
$u_A(t), \text{ В}$ 

Рисунок 4.29 – Перенапряжения на фазе А секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

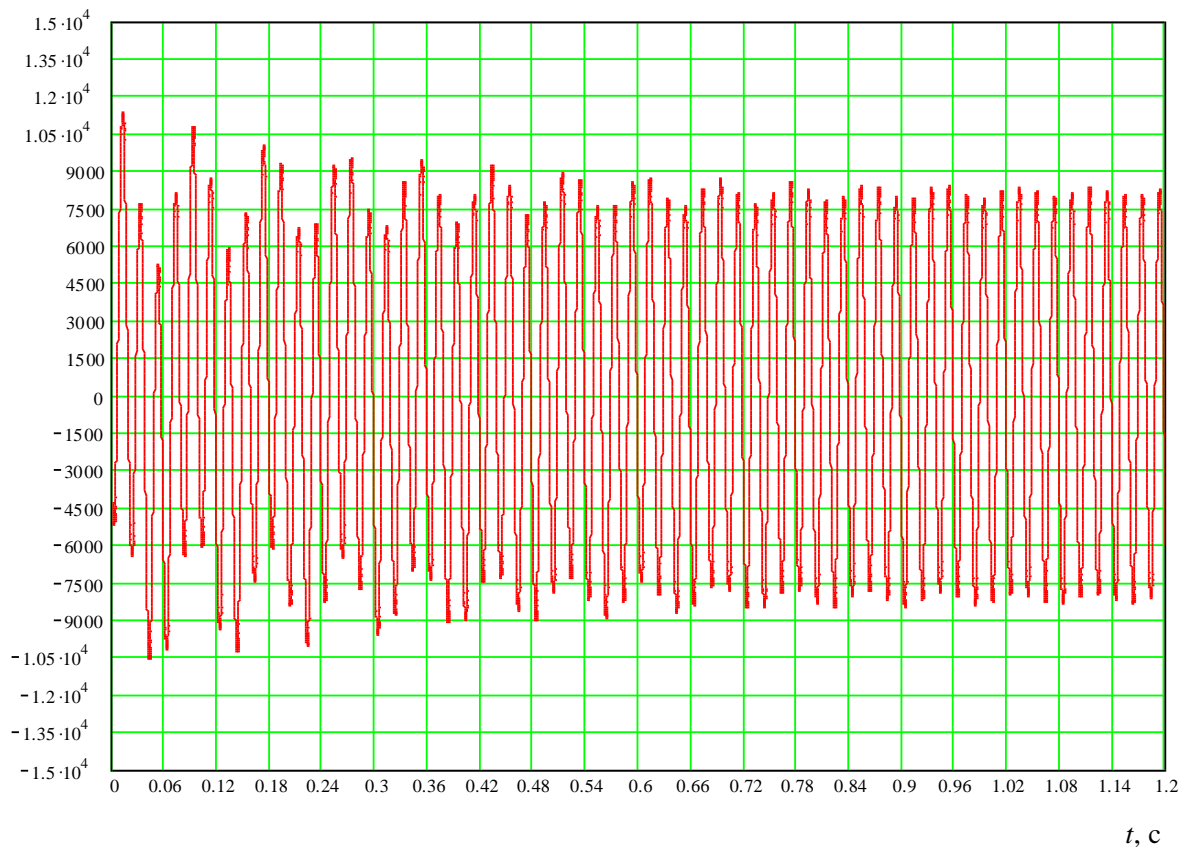
 $u_C(t), \text{ В}$ 

Рисунок 4.30 – Перенапряжения на фазе С секции шин ( $\psi = 10^0, \varphi = 30^0, I_{\text{тр}} = 0,15 \text{ А}$ )

#### 4.8 Расчет параметров RC – ограничителя, предназначенного для установки в узлах электрических нагрузок

На базе аналитических исследований установлено, что оптимальное значение емкости конденсатора RC – ограничителя должно составлять  $C_{огр} = 0,5$  мкФ на фазу. Однако, известно, что во время продолжительной эксплуатации конденсаторов происходит снижение их емкости на 15-20 % [44], поэтому необходимо выяснить, как повлияет снижение емкости RC – ограничителя на величину КП в УЭН. Для этого воспользуемся схемой замещения, представленной выше на рисунке 4.12.

При условии, что с течением времени емкость RC – ограничителя снижается на 15-20 %, то есть до значения  $C_{огр} = 0,4$  мкФ, выполним расчет перенапряжений, возникающих на секциях шин сети с нейтралью, частично заземленной через резистор 500 Ом, включенный параллельно ДГР, типа РЗДСОМ-380 квар. По выражениям (4.6), (4.7) рассчитаны переходные процессы изменения  $u_{NCB}(t)$ . В табл. 4.6 приведены максимальные значения свободной составляющей напряжения, возникающего на зажимах ДГР, и максимальные значения напряжения, возникающего на секциях шин при использовании RC – ограничителя с резистивным заземлением нейтрали.

Данные приведены в зависимости от угла сдвига фаз –  $\varphi = 30^0$  и угла среза  $\psi = 20^0$ . Из табл. 4.8 и графиков (рис. 4.31, 4.32) видно, что снижение емкости конденсатора на 20 % не приводит к росту КП в УЭН выше допустимого значения – максимальная кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин в данных условиях достигает 2,66 (табл. 4.8).

Однако дальнейшее снижение емкости конденсатора RC – ограничителя, применяемого для защиты электрооборудования в УЭН, может привести к возникновению недопустимых перенапряжений и, соответственно, выходу из строя данного оборудования.

Таблица 4.8 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ от- пайки	$U_L$ , В	$U_\phi$ , В	$I_L$ , А	$C_{с.ш.}$ , мкФ	$R_p$ , ОМ	$u_{N.св.маx}(t)$ , В	$u_{Aмаx}(t)$ , В	$u_{Bмаx}(t)$ , В	$u_{Cмаx}(t)$ , В	$K =$ $u_{N.св.маx}/$ $U_L$	$K_A =$ $u_{Aмаx}/$ $U_L$	$K_B =$ $u_{B-}$ $маx/U_L$	$K_C =$ $u_{Cмаx}/$ $U_L$
1	10000	5773,5	26,5	1,2	500	12259	14875	17942	8166	1,23	1,49	1,79	0,82
2	10000	5773,5	33,5			14754	17118	20531	8164	1,48	1,71	2,05	0,82
3	10000	5773,5	40			16911	19106	22746	9048	1,69	1,91	2,27	0,90
4	10000	5773,5	46,5			18964	20993	24851	11100	1,90	2,10	2,49	1,11
5	10000	5773,5	52			20571	22596	26582	12780	2,06	2,26	2,66	1,28

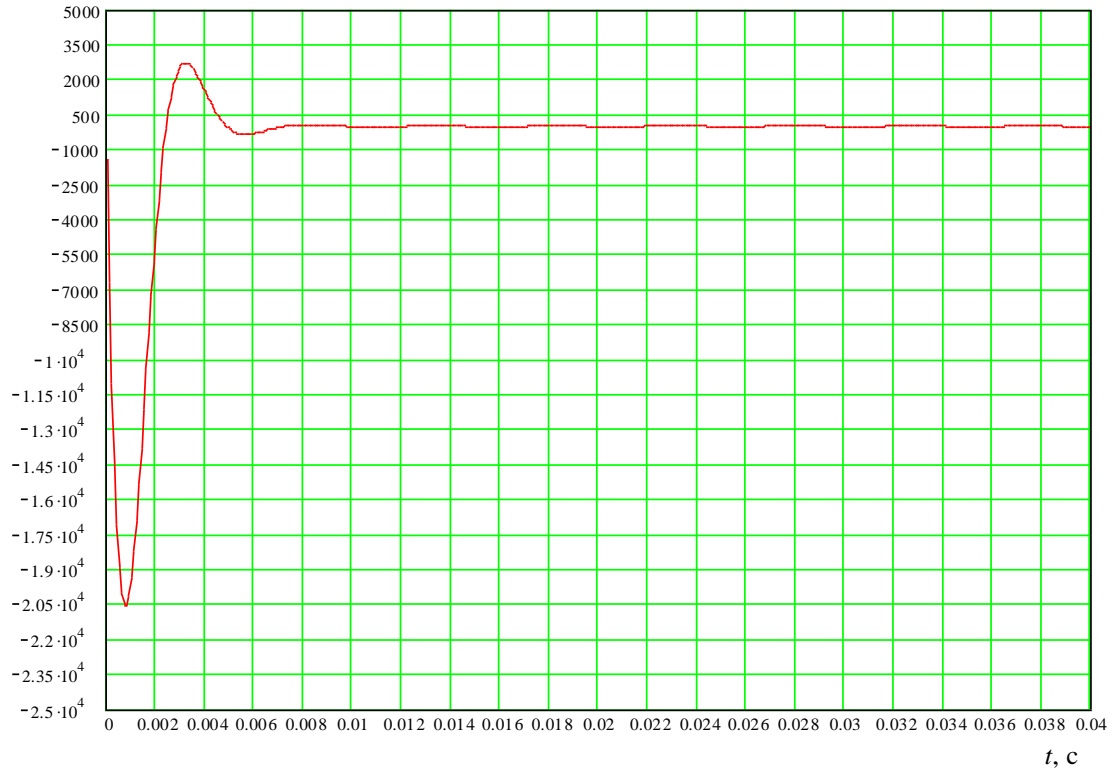
$u_{\text{Нсв}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.31 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, I_{\text{дгр}} = 52 \text{ А}, R_p = 500 \text{ А}, C_{\text{огр}} = 0,4 \text{ мкФ}$ )

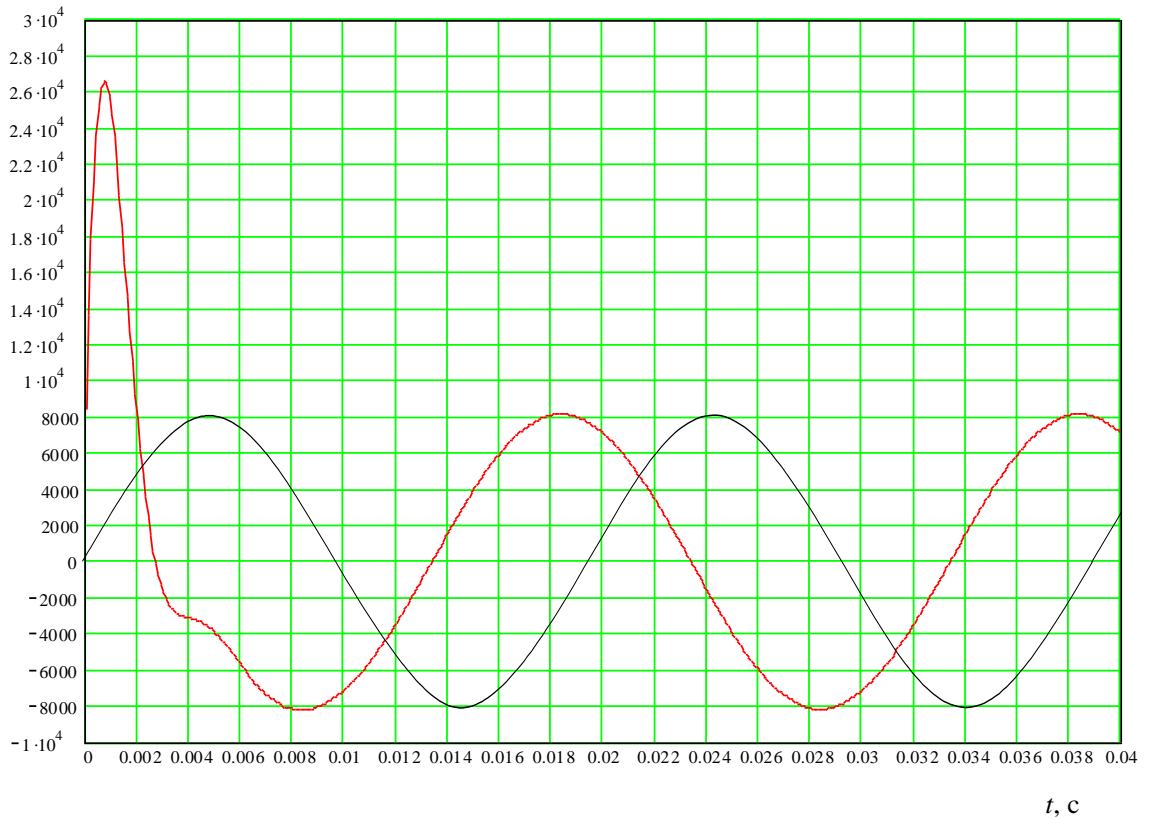
 $u_{\text{В}}(t), u_{\text{фном}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок 4.32 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^\circ, \varphi = 30^\circ, I_{\text{дгр}} = 52 \text{ А}, R_p = 500 \text{ А}, C_{\text{огр}} = 0,4 \text{ мкФ}$ )

Увеличение же емкости конденсатора RC – ограничителя, как было сказано раньше, может привести к недопустимому увеличению емкостного тока замыкания на землю. Соответственно оптимальная емкость RC – ограничителя составляет 0,5 мкФ на фазу.

Для определения активного сопротивления RC – ограничителя воспользуемся методикой, предложенной профессором А.Ф. Гончаровым, которая изложена в [17]. Согласно данной методике, активное сопротивление RC – ограничителя рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{огр}} = \frac{3}{8} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot L_s \cdot C_s^3}{C_{\text{огр}} (C_s + C_{\text{огр}})^3}}, \quad (4.12)$$

где  $L_s$ ,  $C_s$  – индуктивность и емкость нагрузки, к которой подключен RC – ограничитель.

Учитывая, что в нашем случае в качестве нагрузки выступает УЭН, то  $C_s = C_{\text{с.ш.}}$ , а  $L_s = L_{\text{дгр}}$ . Исходя из этого, выражение для нахождения активного сопротивления RC – ограничителя примет вид:

$$R_{\text{огр}} = \frac{3}{8} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot L_{\text{дгр}} \cdot C_{\text{с.ш.}}^3}{C_{\text{огр}} (C_{\text{с.ш.}} + C_{\text{огр}})^3}} \quad (4.14)$$

В таблице 4.9 приведены параметры активного сопротивления резистора RC – ограничителя, предназначенного для защиты УЭН от КП, в зависимости от индуктивности ДГР типа РЗДСОМ – 380 квар, при условии, что емкость секции шин составляет 0,05 мкФ.

Таблица 4.9 – Параметры активного сопротивления резистора RC – ограничителя, предназначенного для защиты УЭН от КП, в зависимости от индуктивности ДГР

Индуктивность дугогасящего реактора $L_{\text{дгр}}$ , Гн	Активное сопротивление RC - ограничителя, $R_{\text{огр}}$ , Ом
0,693	21
0,549	18,7

продолжение таблицы 4.7

0,459	17,1
0,395	15,8
0,353	15

Из табл. 4.9 видно, что, в зависимости от индуктивности ДГР, величина активного сопротивления РС – ограничителя должна находиться в диапазоне 15 – 21 Ом, поэтому в качестве основного было принято сопротивление со стандартным значением 18 Ом, при этом мощность, рассеиваемая данным сопротивлением, составляет 100 Вт.

РС – ограничитель с параметрами  $C_{огр} = 0,5$  мкФ и  $R_{огр} = 18$  Ом был принят к производству на предприятии ООО «РУТАС» под маркой РС–10,5–0,5/18.

#### **4.9 Рекомендации по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в сетях с комбинированным заземлением нейтрали**

Для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений, в случае группового отключения нагрузки от секции шин распределительных подстанций, в нейтраль компенсированной сети необходимо включить резистор с сопротивлением 500 Ом параллельно ДГР. Также, исходя из величины компенсируемого тока ОЗЗ, на секции шин необходимо устанавливать РС – ограничители, количество и параметры которых указаны в табл. 4.10.

Из таблицы 4.10 видно, что для сетей с емкостным током замыкания на землю, превышающем 46,5 А, необходимо подключение двух стандартных ограничителей перенапряжения РС–10,5–0,25/50 либо одного ограничителя РС-10,5-0,5/18.

Варианты три и четыре табл. 4.10 реализованы на РП № 4, 7, 9, 10, 20, 23, 55, 70 ОАО «АГК» и на РП 1, 2, 3, 4, 6 ОАО «АНПЗ».

Таблица 4.10 – Количество и параметры RC – ограничителей для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений в УЭН

Номер варианта	Емкостной ток ОЗЗ сети, А	Величина резистора	Параметры RC- 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 RC- ограничитель (RC-10.5-0.25/50)
4	46,5	500	$C_{огр} = 0,25$ мкФ, $R_{огр} = 50$ Ом – стандартный RC- ограничитель (RC-10.5-0.25/50)
5	52	500	$C_{огр} = 0,5$ мкФ, $R_{огр} = 18$ Ом
			2 стандартных ограничителя (RC-10.5-0.25/50)

Внедрение указанных разработок привело к снижению кратности коммутационных перенапряжений на секциях шин вышеуказанных электроустановок и исключению выхода из строя измерительных трансформаторов напряжения НТМИ, и практически в 5 раз снизило количество пробоев изоляции в кабельных перемычках, связывающих трансформаторы собственных нужд с секциями шин распределительных подстанций.

Это указано в отзыве на эксплуатацию RC – ограничителей в сетях 6(10) кВ ОАО «АГК».

Однако на ряде горно-металлургических предприятий ток ОЗЗ может достигать значений  $50 \div 55$  А. В этом случае необходимо использовать два стандартных RC – ограничителя для установки на секциях шин. В свою очередь, увеличение числа элементов сети при установке двух RC – ограничителей приведет к снижению ее надежности. Поэтому рациональным будет вариант стандартного RC – ограничителя с параметрами  $C_{огр} = 0,5$  мкф,  $R_{огр} = 18$  Ом.

Для подтверждения правильности предложенных рекомендаций по эффективному ограничению КП в УЭН были выполнены расчеты кратности коммутационных перенапряжений, в зависимости от емкости сети при отключении

от секции шин нескольких отходящих линий в режиме ОЗЗ в сетях с компенсированным и комбинированным режимом нейтрали.

Расчеты выполнены по выражениям (3.14), (3.24), а их результаты представлены в табл. 4.11 ÷ 4.14. На рис. 4.33 ÷ 4.34 приведены графики зависимости кратности коммутационных перенапряжений от емкости отключаемой нагрузки.

Таблица 4.11 – Перенапряжения на фазе В секции шин сети с компенсированной нейтралью в зависимости от емкости сети (емкостной ток ОЗЗ составляет 52 А)

$C_c$ , мкФ	9,5	9	7	5	3	1	0,5	0,15
$C_o$ , мкФ	0	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	9	9,35
$U_{мфВ}$ , В	21702	22035	23344	26480	30508	48383	65214	113502
$K_n$	2,17	2,20	2,33	2,64	3,05	4,83	6,52	11,35

В табл. 4.11  $C_c$  – емкость сети,  $C_o$  – емкость отключаемой линии,  $U_{мфВ}$  – перенапряжения на фазе В секции шин,  $K_n$  – коэффициент кратности коммутационных перенапряжений.

Таблица 4.12 – Перенапряжения на фазе В секции шин сети с компенсированной нейтралью в зависимости от емкости сети (емкостной ток ОЗЗ составляет 26,5 А)

$C_c$ , мкФ	5	4,5	3,5	2	1	0,5	0,25	0,15
$C_o$ , мкФ	0	0,5	1,5	3	4	4,5	4,75	4,85
$U_{мфВ}$ , В	21553	22182	23474	28751	37285	49211	66266	83456
$K_n$	2,15	2,21	2,34	2,87	3,72	4,92	6,62	8,34

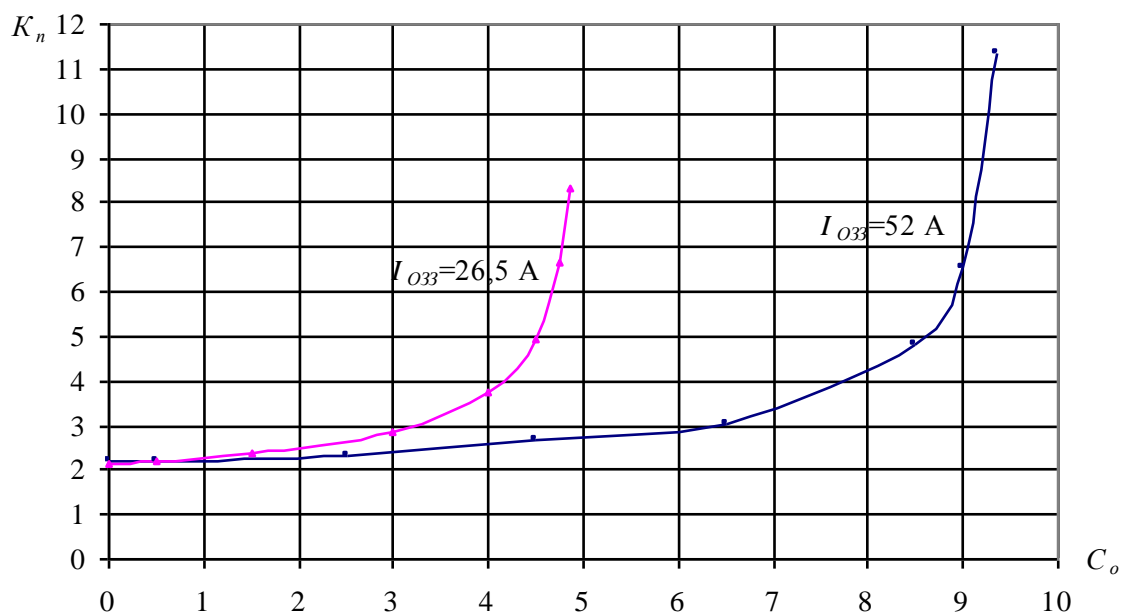


Рисунок 4.33 – Графики зависимости коэффициента кратности КП от емкости отключаемой нагрузки (для сетей с компенсированной нейтралью с емкостными токами ОЗЗ 26,5 и 52 А)

Таблица 4.13 – Перенапряжения на фазе В секции шин сети с комбинированной нейтралью в зависимости от емкости сети (емкостной ток ОЗЗ составляет 52 А)

$C_c$ , мкФ	9,5	9	7	5	3	1	0,5	0,15
$C_o$ , мкФ	0	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	9	9,35
$U_{мфВ}$ , В	14103	14373	15674	17530	20456	26736	30378	35425
$K_n$	1,41	1,43	1,56	1,75	2,04	2,67	3,03	3,54

Таблица 4.14 – Перенапряжения на фазе В секции шин сети с комбинированной нейтралью в зависимости от емкости сети (емкостной ток ОЗЗ составляет 26,5 А)

$C_c$ , мкФ	5	4,5	3,5	2	1	0,5	0,25	0,15
$C_o$ , мкФ	0	0,5	1,5	3	4	4,5	4,75	4,85
$U_{мфВ}$ , В	12647	13004	13876	15848	18113	20005	21514	22342
$K_n$	1,26	1,30	1,38	1,58	1,81	2,00	2,15	2,23

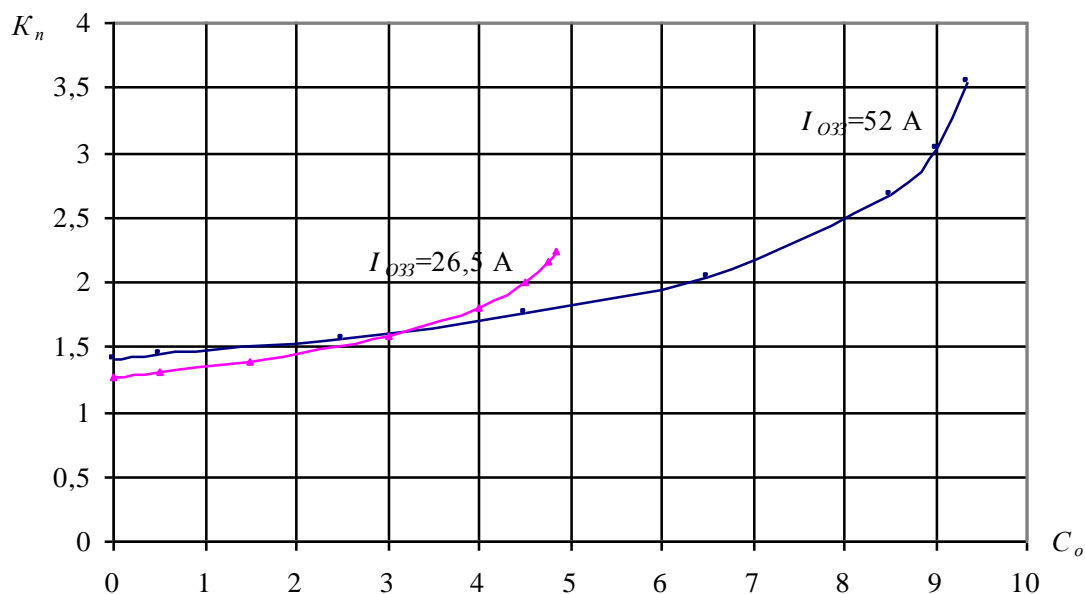


Рисунок 4.34 – Графики зависимости коэффициента кратности КП от емкости отключаемой нагрузки (для сетей с комбинированной нейтралью с емкостными токами ОЗЗ 26,5 и 52 А)

Результаты расчетов показывают, что если нейтраль сети не заземлена через резистор, то минимальная емкость сети, которая будет ограничивать уровень КП при емкостном токе ОЗЗ, равном 52 А, будет составлять 5 мкФ, а при емкостном токе ОЗЗ 26,5 А – 3 мкФ (рис. 4.34). На практике отключение линии может происходить таким образом, что емкость секции шин будет колебаться от 0,15 до 2 мкФ, в этом случае кратность КП для сети с компенсированной нейтралью при емкостном токе ОЗЗ, равном 52 А, может изменяться от 11,35 до 3,74, а при емкостном токе ОЗЗ, равном 26,5 А, – от 8,34 до  $2,87U_{\text{ном}}$  (табл. 4.11, 4.12).

При заземлении нейтрали сети через резистор 500 Ом необходимая минимальная емкость, подключенная к УЭН, при которой уровень коммутационных перенапряжений не будет превышать допустимое значение кратности КП для сетей с емкостным током ОЗЗ, равном 52 А, составляет 0,5 мкФ на фазу, а для сетей с  $I_{OЗЗ} = 26,5 \text{ А}$  – 0,25 мкФ на фазу (рис. 4.34).

Также из таблиц и графиков видно, что с увеличением совокупной емкости отключаемых линий от 0 до 9,35 мкФ, коэффициент кратности КП для се-

тей с компенсированной нейтралью увеличивается в пять раз, а для сетей с комбинированным заземлением нейтрали – в два с половиной раза.

Таким образом, данные расчеты еще раз подтверждают достоверность предложенных рекомендаций по эффективному ограничению КП в УЭН, а графики, представленные на рис. 4.33 ÷ 4.34, позволяют оценить уровни КП, которые будут возникать в случае отключения отдельных линий от УЭН.

На ГПП-2 ОАО «АГК» были выполнены контрольные измерения КП в УЭН при условии, что для ограничения КП был выбран пятый вариант предложенных рекомендаций. В таблице 4.15 представлены результаты данных измерений.

Таблица 4.15 – Результаты экспериментальных измерений коммутационных перенапряжений при групповом отключении нагрузки от секции шин в режиме ОЗЗ

№ опыта	$K_A$	$K_B$	$K_C$
1	2,4	1,1	1,4
2	2,3	1,0	1,4
3	1,2	1,3	2,4
4	1,3	2,2	1,1
5	1,1	1,0	2,1

Данные, приведенные в таблице 4.15, подтверждают эффективность предложенных рекомендаций и достоверность аналитических исследований, так как  $K_{\max} = 2,4 < K_{\text{доп}} = 2,8$ .

Отклонение результатов экспериментальных измерений от аналитических составляет 10 – 12 %, что указывает на достоверность результатов, полученных в данной главе.

#### 4.9.1 Технические данные РС – ограничителя

Основные параметры РС-ограничителя приведены в табл. 4.16.

Таблица 4.16 – Основные параметры RC – ограничителя, предназначенного для установки в УЭН

Наименование параметра	Значение параметра
Напряжение, В	10,5
Емкость номинальная, мкФ	0,5
Частота номинальная, Гц	50
Номинальное сопротивление резистора, соединенное с емкостью, Ом	18
Мощность резистора, Вт	100

В прил. 12 на рис. П12.1 ÷ П12.9 приведены фотографии RC – ограничителей (стандартного и RC – ограничителя для УЭН), выкатной тележки с RC – ограничителями, ячейки распределительного устройства с RC – ограничителями, подключенными к секциям шин, устройства добавочного активного тока (резистор сопротивлением 500 Ом).

RC-ограничитель представляет собой устройство, состоящее из трех однофазных RC – цепочек, соединенных по схеме «Звезда» с заземленной нейтральной точкой и собранных в металлическом корпусе.

Однофазная RC – цепочка состоит из конденсатора емкостью 0,5 мкФ, напряжением 10,5 кВ, и резистора 18 Ом, мощностью 100 Вт, соединенных последовательно. Каждый вывод RC – цепочки соединен с проходным изолятором.

Предельные отклонения значения емкости конденсатора от номинальной  $\pm 5\%$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ .

Значение тангенса угла потерь конденсатора при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  должно быть не более  $1 \cdot 10^{-2}$ .

RC – ограничитель допускает продолжительную работу:

1. При повышении действующего значения напряжения между выводами до 1,1 номинального продолжительностью 12 часов в течение каждых 24 часов.

2. При повышении действующего значения напряжения между выводами до 1,15 номинального продолжительностью 30 минут в течение 24 часов.
3. При действующем значении тока до 1,3 от тока, получаемого при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте за счет повышения напряжения, изменения его гармонического состава или за счет того и другого одновременно.

РС – ограничитель выдерживает перенапряжения  $6,7 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{ном}}$ , возникающие при включении и отключении электрооборудования в течение 5 секунд и перенапряжения  $8,7 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{ном}}$  в течение 1 секунды.

Все металлические части РС – цепочки имеют защитные покрытия, стойкие к атмосферным воздействиям.

Габаритные, установочные, присоединительные размеры и масса РС-цепочки приведены на рис. 4.35. Данные к рисунку 4.30: С – емкость пакета, R – сопротивление резисторов, масса не более 7 кг, Н.В. – низковольтный вывод, В.В. – высоковольтный вывод. Контроль размера ( $110^{-4}$ ) мм производить на расстоянии не более 15 мм от сварных швов дна и стенки. На других участках допускается увеличение указанного размера до 120 мм, при этом предел допускаемой погрешности средств измерения  $\pm 2$  мм.

Технические параметры РС-ограничителя:

Номинальное напряжение, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12
Уровень ограничения перенапряжений	$(1,2 - 1,7)U_{\text{н}}$
Габаритные размеры, мм	750x360x500
Масса, кг	40
Срок службы	не менее 25 лет

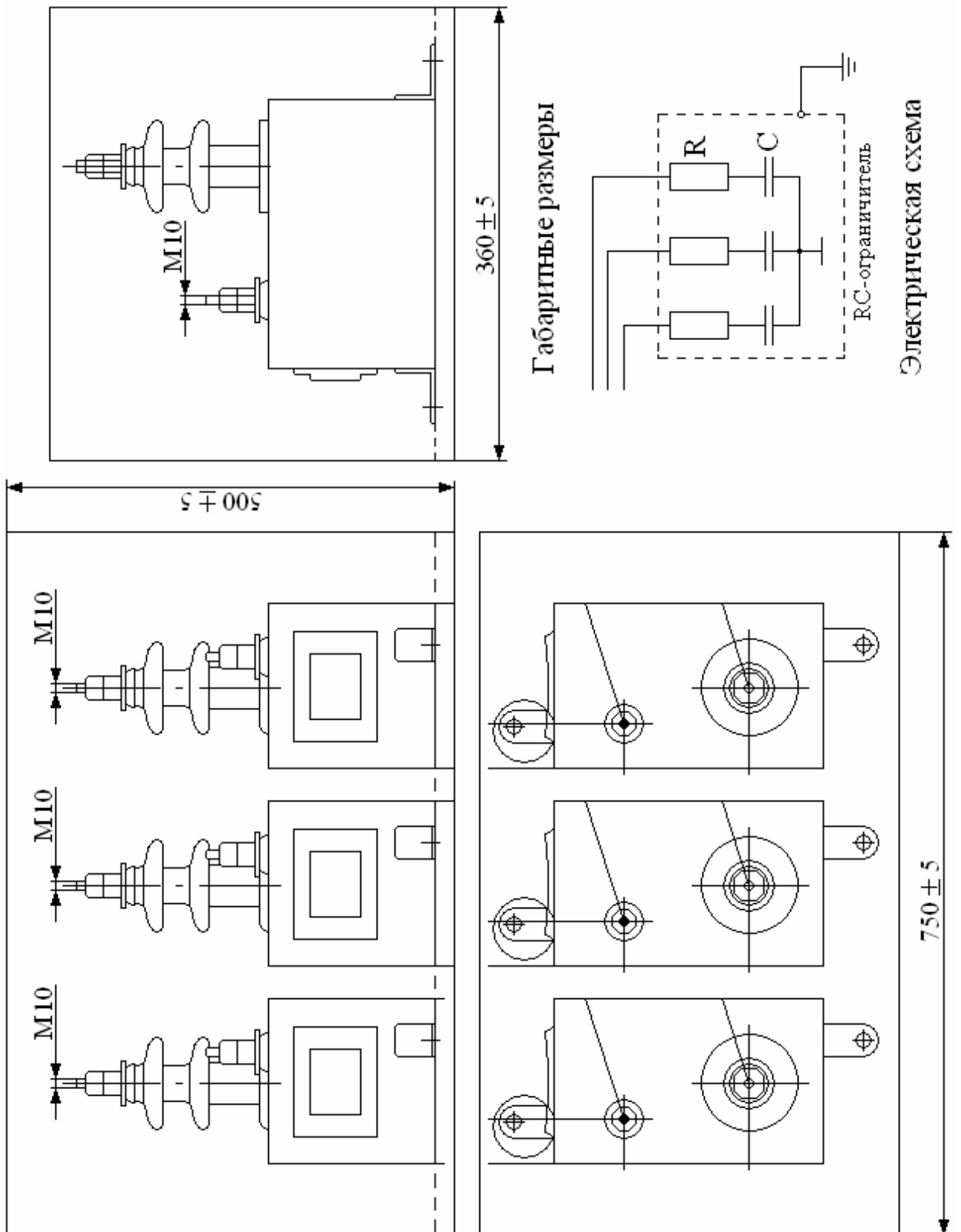


Рисунок 4.35 – Трехфазный резистивно-емкостной ограничитель коммутационных перенапряжений

### 4.9.2 Устройство РС-ограничителя

Корпус РС-ограничителя искробезопасный, пылевлагонепроницаемый, отвечает требованиям IP54.

На основании корпуса установлены и жестко закреплены болтами М8 три РС – цепочки. Внутри корпуса РС – цепочки собраны по схеме «Звезда» с заземленной нейтральной точкой.

С боков РС – ограничителя предусмотрены две ручки для удобства транспортировки. Для соединения РС – ограничителя с высоковольтным оборудованием с помощью кабеля предусмотрена установка двух сальников с левой и правой сторон корпуса.

Корпус покрыт защитной эмалью от атмосферных воздействий.

### 4.9.3 Размещение и монтаж

РС – ограничитель устанавливается в вертикальном положении основанием вниз на расстоянии до 10 м от защищаемого электрооборудования.

При выборе места установки РС – ограничителя необходимо предусмотреть надежное закрепление корпуса (напольное или настенное), а также предусмотреть удобство при техническом осмотре.

Соединение РС – ограничителей с защищенным электрооборудованием выполнять гибким кабелем сечением не менее 15 мм<sup>2</sup>. Затяжку гаек выводов на изоляторах РС – цепочки рекомендуется производить ключом с регулирующимся крутящим моментом, величина крутящего момента не должна превышать 10 н.м.

Прокладку соединительного кабеля от электрооборудования до РС-ограничителя производить в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» и «Правилами технической эксплуатации электроустановок».

Измерение емкости рекомендуется производить при температуре окружающего воздуха от  $15^{\circ}$  до  $35^{\circ}\text{C}$  с пределом допускаемой погрешности средств измерения  $\pm 2\%$ .

#### **4.9.4 Указание мер безопасности**

Обслуживание РС – ограничителя производить в соответствии с «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок» и «Правилами устройства электроустановок».

Перед прикосновением к токоведущим частям РС – ограничителя произвести индивидуальный разряд РС – цепочки, замыкая его выводы накоротко заземленной металлической шиной, укрепленной на изолирующей штанге.

Выводы РС-цепочки должны быть закорочены, если они не подключены к электрическому устройству, но находятся в зоне действия электрического поля.

При работе с РС – цепочкой, имеющей течь в результате нарушения герметичности, необходимо принять меры предосторожности, предотвращающие попадание пропитывающей жидкости на кожу и глаза.

В случае попадания пропитывающей жидкости – кожу промыть теплой водой с мылом, а глаза промыть слабым раствором кислоты борной ГОСТ 18704-78 или слабым раствором натрия двууглекислого ГОСТ 2156-76 (сода пищевой) по одной чайной ложке на стакан воды.

При разливе пропитывающей жидкости в результате течи место разлива посыпать песком или опилками и протереть ветошью. Песок вывести в отвал, а опилки и ветошь сжечь.

В остальном при эксплуатации следует руководствоваться «Правилами устройства электроустановок» и «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей».

При возникновении пожара для тушения применять распыленную воду и воздушно-механическую смесь.

#### 4.10 Расчет экономического эффекта при установке РС - ограничителя на секцию шин и резистора для заземления нейтрали сети сопротивлением 500 Ом

Экономический эффект (Э) от внедрения РС – ограничителя для установки на секции шин и резистора для заземления нейтрали оценивается по величине снижения ущерба от вынужденного простоя технологического оборудования из-за выхода из строя трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения.

$$\mathcal{E} = Z_{\text{д}} + Z_{\text{у}} - Z_{\text{зу}} + \text{НЗП}, \text{ тыс. руб.},$$

где  $Z_{\text{д}}$  – затраты на капитальный ремонт трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения, тыс. руб.;

$Z_{\text{у}}$  – затраты на установку трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения (включающие зарплату ремонтной бригады и социальные отчисления), тыс. руб.;

$Z_{\text{зу}}$  – затраты на приобретение, монтаж и наладку РС – ограничителя и резистора для заземления нейтрали, тыс. руб.;

*НЗП* – незаконченное производство, тыс.руб.

Стоимость незаконченного производства можно определить по следующему выражению:

$$\text{НЗП} = 0,83 Q_{\text{т}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot C_{\text{ед.пр.}},$$

где  $Q_{\text{т}}$  – производительность технологического оборудования, Т/ч;

$T_{\text{пр}}$  – время простоя, связанное с ремонтом (заменой) трансформатора собственных нужд, трансформатора напряжения и кабельной вставки, ч;

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

Результаты расчета экономического эффекта выполнены на примере ГПП – 2 ОАО «АГК».

В течение 2004 г. на ГПП – 2 в результате коммутационных перенапряжений вышли из строя трансформатор собственных нужд и измерительный трансформатор напряжения. После чего потребовался капитальный ремонт этого

электрооборудования в условиях электроремонтного цеха (ЭРЦ). Согласно калькуляции работ ЭРЦ на подобный ремонт требуется 214,6 чел./час. При стоимости услуг ЭРЦ одного чел./часа в 175,25 руб. затраты на капитальный ремонт трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения в 2004 г. составили:

$$Z_{\text{зу.}} = 2 \cdot 214,6 \cdot 175,25 = 75217,3 \text{ руб.}$$

В результате повторной аварии, связанной с коммутационными перенапряжениями на секциях шин, трансформатор собственных нужд и измерительный трансформатор напряжения полностью вышли из строя, что привело к необходимости их замены. Стоимость измерительного трансформатора напряжения НТМИ-10 по прайс-листу ЗАО "МАТИК ЭЛЕКТРО" составляет 28615 руб., стоимость трансформатора собственных нужд – 129600 руб. По состоянию на 1.01.2005 года на ГПП-2 на секциях шин необходимо установить один РС – ограничитель марки РС 10,5 – 0,5/18 –УХЛ2 и один резистор сопротивлением 500 Ом. Затраты на приобретение, монтаж и наладку РС – ограничителя и резистора составят:

$$Z_{\text{зу.}} = 220000 + 300000 = 520000 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на капитальный ремонт трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения и капитальные вложения на приобретение новых трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения в год составят:

$$K_c = 75217,3 + 158215 = 233432,3 \text{ руб.}$$

По данным планово – экономического отдела в 2004 г, ущерб от вынужденных простоев технологического оборудования ГПП – 2, связанный с заменой и ремонтом трансформатора собственных нужд и измерительного трансформатора напряжения составил 1258650 руб. Следовательно, ежегодный экономический эффект составит:

$$\text{Э} = 233432,3 + 1258650 - 520000 = 972082,3 \text{ руб.}$$

### Выводы по четвертой главе

1. Допустимый коэффициент кратности перенапряжений для электрооборудования подстанций напряжением 6 кВ составляет 3,2, а для электрооборудования подстанций напряжением 10 кВ – 2,8.
2. В сетях с компенсированной нейтралью защита от перенапряжений с помощью ОПН неэффективна, так как возможно термическое разрушение ограничителей в режимах двухфазного и трехфазного короткого замыкания. В сетях с комбинированным заземлением нейтрали применение ОПН возможно только в случае, когда нейтраль заземлена через резистор сопротивлением 500 Ом, а емкостной ток ОЗЗ не превышает 52 А. В остальных случаях возможно термическое разрушение ОПН в результате короткого замыкания.
3. Для сети с компенсированной нейтралью добиться эффективного ограничения коммутационных перенапряжений в УЭН до уровня  $2,8U_{ном}$  можно за счет включения резистора величиной 500 Ом параллельно ДГР при условии, что величина тока ОЗЗ равна или ниже 46,5 А, а к секциям шин подключен РС – ограничитель с параметрами  $C_{огр} = 0,25$  мкФ,  $R_{огр} = 50$  Ом.
4. Для сети с компенсированной нейтралью с емкостным током ОЗЗ более 46,5 А снижения коммутационных перенапряжений до уровня  $2,8U_{ном}$  в УЭН можно достигнуть за счет включения резистора величиной 500 Ом параллельно ДГР при условии, что к секциям шин подстанции подключены два РС – ограничителя с параметрами  $C_{огр} = 0,25$  мкФ,  $R_{огр} = 50$  Ом или один РС – ограничитель с параметрами  $C_{огр} = 0,50$  мкФ,  $R_{огр} = 18$  Ом.
5. Подключение РС – ограничителя с емкостью  $C_{огр} = 0,5$  мкФ на фазу к секциям шин сети с компенсированной нейтралью и частичным заземлением нейтрали через резистор приводит к снижению кратности коммутационных перенапряжений на секциях шин до 3,55.

6. Для эффективного ограничения перенапряжений на секциях шин необходимо применение комплексного подхода к решению данной задачи, то есть использование RC – ограничителя с емкостью  $C_{огр}=3 \cdot C_{Ф}=3 \cdot 0,5=1,5$  мкФ и резистора в нейтрали сети сопротивлением 500 Ом. При данных параметрах перенапряжения не превышают  $2,5U_{ном}$ .
7. В сети с изолированной нейтралью рационально использовать резистивное заземление нейтрали, что приводит к отсутствию перенапряжений и биения напряжения. Следовательно, в подобных сетях установку средств ограничения перенапряжений можно не производить.
8. В случае если нейтраль сети не заземлена через резистор, то минимальная емкость сети, которая будет ограничивать уровень КП при емкостном токе ОЗЗ, равном 52 А, будет составлять 5 мкФ, а при емкостном токе ОЗЗ 26,5 А – 3 мкФ. На практике отключение линии может происходить таким образом, что емкость секции шин будет колебаться от 0,15 до 2 мкФ, в этом случае кратность КП для сети с компенсированной нейтралью при емкостном токе ОЗЗ, равном 52 А, может изменяться от 11,35 до 3,74, а при емкостном токе ОЗЗ, равном 26,5 А – от 8,34 до  $2,87U_{ном}$ . При заземлении нейтрали сети через резистор сопротивлением 500 Ом необходимая минимальная емкость, подключенная к УЭН, при которой уровень коммутационных перенапряжений не будет превышать допустимое значение кратности КП для сетей с емкостным током ОЗЗ, равном 52 А, составляет 0,5 мкФ на фазу, а для сетей с  $I_{ОЗЗ} = 26,5$  А – 0,25 мкФ на фазу. С увеличением совокупной емкости отключаемых линий от 0 до 9,35 мкФ коэффициент кратности КП для сетей с компенсированной нейтралью увеличивается в пять раз, а для сетей с комбинированным заземлением нейтрали – в два с половиной раза.
9. Предложенные рекомендации по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в УЭН были реализованы в сети электропитания напряжением 10 кВ ОАО «АГК» и сети электроснабжения

напряжением 6 кВ ОАО «АНПЗ». Это позволило исключить выходы из строя трансформаторов напряжения НТМИ – 6(10), трансформаторов собственных нужд ТСН, а также ликвидировать перекрытия воздушных промежутков секций шин и снизить количество пробоев изоляции в кабельных перемычках, связывающих трансформаторы собственных нужд с секциями шин распределительных подстанций. Соответственно, снизились издержки на ремонт электрооборудования подстанций, а также издержки, связанные с простоем технологического оборудования, тем самым был достигнут существенный экономический эффект.

10. Отклонение результатов экспериментальных измерений от аналитических составляет 10 – 12 %, что указывает на достоверность результатов, полученных в данной главе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа аварийности электрооборудования распределительных подстанций установлено, что в настоящее время основной причиной выхода из строя измерительных трансформаторов напряжения, трансформаторов собственных нужд и другого оборудования подстанций являются коммутационные перенапряжения – это связано с широким внедрением вакуумных выключателей.
2. В ходе выполненных экспериментальных исследований установлено, что в безаварийном режиме в результате срабатывания вводного выключателя максимальная кратность перенапряжений, при использовании в качестве вводного выключателя масляного выключателя, может достигать 3,4 на отдельном электроприемнике и 2,1 на секциях шин, если нагрузка двигательная. При трансформаторной нагрузке кратность перенапряжений на отдельном электроприемнике не превышает 1,2, а на секциях шин  $0,6U_{ном}$ . При смешанной нагрузке кратность коммутационных перенапряжений на секциях шин находится в промежуточном значении и не превышает  $1,6U_{ном}$ . Однако при использовании в качестве вводного – вакуумного выключателя, характер коммутационных перенапряжений меняется в сторону увеличения кратности перенапряжений. При двигательной нагрузке перенапряжения на отдельных электроприемниках могут достигать  $7U_{ном}$ , на секциях шин  $4,7U_{ном}$ . При трансформаторной нагрузке на секциях шин могут возникать 1,5 – кратные значения перенапряжений, а при смешанной нагрузке 4,2 – кратные перенапряжения.
3. Экспериментальные исследования показали, что при групповом отключении нагрузки в режиме ОЗЗ коммутационные перенапряжения на секциях шин подстанций могут превышать 7 – 8 – кратное значение номи-

нального напряжения сети, если в качестве коммутационных аппаратов используются вакуумные выключатели.

4. Экспериментальные исследования подтверждают то, что кратность коммутационных перенапряжений в УЭН может превышать кратность коммутационных перенапряжений в режиме ОЗЗ практически в 4 раза, следовательно, эффективное ограничение коммутационных перенапряжений позволит повысить надежность системы электроснабжения.
5. Аналитические исследования показали, что кратность коммутационных перенапряжений в УЭН зависит от режима заземления нейтрали сети, величины тока однофазного замыкания на землю, характера нагрузки, угла среза тока в вакуумной камере выключателя. Максимальные перенапряжения возникают в сетях с компенсированной нейтралью и могут достигать 12 – кратного значения при условии, что характер нагрузки определяется  $\cos \varphi = 0,866$ , угол среза тока в вакуумной камере выключателя  $\psi = 20^\circ$ , а емкостная составляющая тока ОЗЗ превышает 46,5 А.
6. Включение высокоомного резистора параллельно ДГР в сети с компенсированной нейтралью не приводит к существенному снижению кратности коммутационных перенапряжений в УЭН. Например, включение резистора величиной 5000 Ом параллельно ДГР типа РЗДСОМ –380 квар может привести к появлению коммутационных перенапряжений в УЭН, превышающих номинальное напряжение сети в 9,5 раз. Однако включение резистора сопротивлением 500 Ом приводит к снижению кратности коммутационных перенапряжений в УЭН до  $3,7U_{ном}$ , что выше допустимого значения.
7. Допустимый коэффициент кратности перенапряжений для электрооборудования подстанций напряжением 6 кВ составляет 3,2, а для электрооборудования подстанций напряжением 10 кВ – 2,8. Однако в сетях с компенсированной нейтралью кратность коммутационных перенапряжений в УЭН может достигать 5 – 12 – кратного значения, в зависимости от характера нагрузки, величины емкостного тока ОЗЗ, угла среза тока в ваку-

умной камере выключателя. В сетях с изолированной нейтралью коммутационные перенапряжения в УЭН не превышают  $1,45U_{ном}$ , следовательно, для УЭН сетей с компенсированной нейтралью необходимо предусмотреть средство защиты от коммутационных перенапряжений, а в УЭН сети с изолированной нейтралью можно эксплуатировать без средств защиты от коммутационных перенапряжений.

8. На основе исследований установлено, что эффективного ограничения коммутационных перенапряжений в сети с компенсированной нейтралью можно добиться за счет одновременного использования резистора сопротивлением 500 Ом, включенного параллельно ДГР, и RC – ограничителя с параметрами  $C_{огр} = 0,5$  мкФ,  $R_{огр} = 18$  Ом, подключенного к УЭН. В этом случае кратность коммутационных перенапряжений не будет превышать  $2,5U_{ном}$ , что ниже допустимого значения, при условии, что ток однофазного замыкания на землю не будет превышать 60 А.
9. Исследования показали, что в сетях с изолированной нейтралью коммутационные перенапряжения в УЭН не превышают  $1,45U_{ном}$ , что ниже допустимого значения. Однако групповое отключение нагрузки от секции шин приводит к появлению длительных биений напряжения, для ликвидации которых достаточно нейтраль сети заземлить через резистор сопротивлением от 500 до 5000 Ом.
10. Разработана методика оценки коммутационных перенапряжений, основанная на учете типа и характера нагрузки, длины и сечения кабельной линии, соединяющей электроприемник с УЭН и типа коммутационных аппаратов. Методика позволяет обосновать необходимость использования средств защиты от коммутационных перенапряжений в УЭН на стадии проектирования системы электроснабжения промышленных предприятий, а также оценивать кратность коммутационных перенапряжений в УЭН при эксплуатации систем электроснабжения.
11. Результаты работы использовались при оценке коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения предприятий ОАО «Ачинский

глиноземный комбинат», ОАО «Красноярский алюминиевый завод», ОАО «Саянский алюминиевый завод», ОАО «Братский алюминиевый завод», «Нюрбенский ГОК» компании АЛРОСА, ОАО «Красноярский цемент», ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод». Рекомендации по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений в УЭН были реализованы на ОАО «Ачинский глиноземный комбинат» и ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод» и показали свою эффективность, так как с момента внедрения прошло более года, а случаев пробоя изоляции измерительных трансформаторов напряжения и трансформаторов собственных нужд не наблюдалось.

12. Разработанные параметры РС – ограничителя, который необходимо использовать для ограничения коммутационных перенапряжений в УЭН, учтены предприятием ООО «РУТАС» при выпуске РС – ограничителей типа РС 10,5 – 0,5/18 –УХЛ2 в промышленных масштабах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Безденежных А.Г. Профилактические испытания гибких высоковольтных кабелей с резиновой изоляцией / А. Г. Безденежных, И.К. Попов // Вопросы безопасности в угольных шахтах, т.6. – М.: Недра, 1965. – С. 176 – 190.
2. Беляков Н.Н. Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Н.Н. Беляков // Электричество. – 1957. – №5. – С. 31 – 36.
3. Беляков Н.Н. Ограничение перенапряжений при ОЗЗ в сети 6 кВ собственных с помощью ОПН / Н.Н. Беляков, К.И. Кузьмичева, А. Ивановски // Электрические станции. – 1999. – №4. – С. 35 – 39.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая Школа, 1967. – 775 с.
5. Бикфорд Д. П. Основы теории перенапряжений в электрических сетях / Д. П. Бикфорд [и др.] – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.
6. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г. В. Буткевич. – М.: Высшая Школа, 1967. – 163 с.
7. Бухтояров В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
8. Вагин Т.Я. Исследования перенапряжений в сети 6 кВ промышленного предприятия с большим числом высоковольтных электродвигателей и конденсаторных установок /Т.Я. Вагин, В.А. Чечков // Промышленная энергетика. – 1992. – №6. – С. 15 – 22.
9. Вакуумные дуги: Пер. с англ./ Под ред. Дж. Лаффети. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
10. 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 – 35 кВ: Тр. II Всерос. научн. – техн. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 84 – 94.

11. 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.
12. Воздвиженский В.А. Срез тока в вакуумном выключателе / В.А. Воздвиженский // Электричество. – 1973. – №6. – С. 57 – 61.
13. Герасимов А.И. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий / А.И. Герасимов, С.В. Кузьмин. – Красноярск: ГУЦМиЗ, 2005. – 250 с.
14. Гиндуллин Ф.А. О качестве исходной информации об аварийности ВЛ. / Ф.А. Гиндуллин, А.А. Дульзон // Изв. вузов СССР – Энергетика. – 1984. – №5. – С. 41 – 43.
15. Глушко В.И. Системы заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ и условия электробезопасности в сетях среднего и низкого напряжений / В.И. Глушко, О. Е. Ямный, Э.П. Ковалев, Д.Т. Зайцев // Техника без опасности. – 2004. – №2(3). – С. 22-28.
16. 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.
17. Гончаров А.Ф. РС-ограничители и РС-гасители – устройства глубокого ограничения коммутационных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ / А. Ф. Гончаров, С.В. Кузьмин, В.В. Павлов, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, А.Ю. Ожиганов // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – №3. – С.38 – 40.
18. 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.
19. Гончаров А.Ф. Анализ результатов измерения перенапряжений при коммутации высоковольтных двигателей экскаваторов / А.Ф. Гончаров,

- И.Я. Эпштейн, Ю.М. Попов [и др.] // Электротехника. – 1986. – №9. – С. 13 – 16.
20. Горбач Р.П. Материалы для контактов вакуумных дугогасительных камер, обеспечивающих низкий уровень тока среза./ Р.П. Горбач // Электричество. – 1973. – №6. – С. 77 – 78.
21. Гусев Ю.М. Эффективность применения выключателей с сопротивлением двухстороннего действия при ограничении внутренних перенапряжений / Ю.М Гусев, К.П. Кадомский // Электричество. – 1966. – №11. – С. 22 – 26.
22. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах / А.И. Долгинов. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 126 с.
23. Джуварлы Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сетях с изолированной нейтралью / Ч.М. Джуварлы // Электричество. – 1953. – №6. – С.18 – 27.
24. Джуварлы Ч.М. Феррорезонансные перенапряжения / Ч.М. Джуварлы, Г.А. Миронов // Электричество. – 1970. – №7. – С. 72 – 74.
25. Дударев Л.Е. Методика экспериментального исследования переходных процессов при замыкании фазы на землю / Л.Е. Дударев // Промышленная энергетика. – 1978. – №7. – С. 31 – 34.
26. Евдокунин Г.А. Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6-10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали / Г.А. Евдокунин // Информационно-справочное издание – Новости электротехники. – 2003. – №6(16). – С. 15 – 19.
27. Евдокунин Г.А. Перенапряжения в сетях 6(10) кВ создаются при коммутациях как вакуумными, так и элегазовыми выключателями / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков // Информационно-справочное издание – Новости электротехники. – 2002. – №5(17). – С. 32 – 35.
28. 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.
29. Ильиных М.В. Внедрение резисторов в сети собственных нужд ТЭЦ – 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.
30. Ильиных М.В. Комплексный подход к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях 6, 10 кВ крупных промышленных предприятий целлюлозно-бумажной и металлургической промышленности / М.В. Ильиных, Л.И. Сарин // Электричество. – 2005. – №6. – С.19 – 24.
31. Исследования взаимодействия вакуумного выключателя с электрическими сетями горных предприятий / А.Ф. Гончаров, С.В. Нагарев. – Отчет о НИР № гос. рег. 76086908.
32. 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.
33. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах / З.Г. Каганов. – М.: Энергия, 1970. – 209 с.
34. Кадомская К.П. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью управления моментом / К.П. Кадомская, Е.С. Незгаворов, Л.В. Петракова, В.С. Пономарев // Электричество. – 1969. – №9. – С. 5 – 7.
35. Карамзин А.П. Отключение и повреждение в сетях 35, 10, 6 кВ при грозах / А.П. Карамзин // Электрические станции. – 1971. – №7. – С.60 – 66.
36. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М.: Наука, 1968. – 243 с.
37. Кузьмин Р.С. Влияние длины кабельной линии на коммутационные перенапряжения высоковольтных электродвигателей и трансформаторов / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, О.А. Ковалева, С.В. Кузьмин // Страте-

- гические 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.
38. Кузьмин Р.С. Влияние внутренних перенапряжений в узлах нагрузки горных и горно-перерабатывающих предприятий на ресурсосберегающие технологии при добыче и переработке полезных ископаемых / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков // Перспективные материалы: получение и технологии обработки: материалы всероссийской научно-технологической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ», 2004. – С 231 – 232.
39. Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А. Влияние надежности распределительных сетей 6-10 кВ металлургических предприятий на современный технологический процесс / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков // Перспективные материалы: получение и технологии обработки: материалы всероссийской научно-технологической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ», 2004. – С. 118 – 119.
40. Кузьмин Р.С. Меры по предотвращению однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и повышению селективности отключений на горных предприятиях Сибири / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, И.В. Лапаев, В.В. Павлов // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – №3. – С.41 – 42.
41. Кузьмин Р.С. Рационализация мест установки устройств, снижающих коммутационные перенапряжения / Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, С.В. Кузьмин, В.В. Павлов, В.М. Соломенцев // 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.

42. Кузьмин С.В. Некоторые аспекты коммутационных перенапряжений при использовании вакуумных выключателей / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, И.С. Зыков, В.В. Дементьев [и др.] // Информационно-аналитический сборник ФГУ УГЭН по Енисейскому региону – «Энергонадзор», – 2004. – №3. – С. 16–19.
43. Кузьмин С.В. Трехфазные РС-ограничители и РС-гасители. Область применения и экономическая эффективность / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, И.И. Лапаев, А.Ю. Ожиганов // Электрика. – 2005. – №4. – С. 22 – 24.
44. Кузьмин С.В. Трехфазные РС-ограничители и РС-гасители. Область применения, конструкция, принцип действия и экономическая эффективность / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, И.И. Лапаев, А.Ю. Ожиганов. // «Электрификация металлургических предприятий Сибири». Прогнозирование параметров электропотребления и нормирования, реорганизация электроснабжения и ремонта 1-ого Сибирского энергетического форума: материалы двенадцатой Федеральной научно-технической конференции, – Новокузнецк, – 2004. – С. 54 – 58.
45. Кузьмин С.В. Основные результаты исследований коммутационных перенапряжений в сетях 6-10 кВ металлургических, горных и горно-перерабатывающих предприятий/ С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков, А.Ю. Ожиганов. // «Электрификация металлургических предприятий Сибири». Прогнозирование параметров электропотребления и нормирование, реорганизация электроснабжения и ремонта 1-ого Сибирского энергетического форума: материалы двенадцатой Федеральной научно-технической конференции, – Новокузнецк, – 2004. – С. 62 – 65.
46. Лихачев Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

47. Лихачев Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1967. – 30 с.
48. Лихачев Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 кВ собственных нужд / Ф.А. Лихачев // Электрические станции. – 1983. – №8. – С. 69 – 73.
49. Меньшиков В.А. Перенапряжения в узлах электрических нагрузок напряжением 6-10 кВ на горно-добывающих и горно-перерабатывающих предприятиях / В.А. Меньшиков// Перспективные материалы: получение и технологии обработки: материалы всероссийской научно-технологической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГОУ ВПО «ГУЦМиЗ», 2006. – С. 55– 57.
50. Миронов И.М. Автоматические устройства настройки компенсации емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / И.М. Миронов, В.В. Кричко // Электричество. – 2003. – №13. – С. 15 – 18.
51. Обабков В.К. Актуальность и внедрение автоматически управляемой компенсации емкостных токов в сетях 6 кВ металлургических предприятий / В.К. Обабков, Н.П. Гуров, В.Г. Сажаяев // Промышленная энергетика. – 2003. – №7. – С. 10 – 17.
52. Обабков В.К. Недостаточность резистивного заземления нейтрали в задачах борьбы с перенапряжениями в сетях 6-35 кВ / В.К. Обабков, М.П. Дергилев // Техника без опасности. – 2003. – №5(6). – С. 25 – 29.
53. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
54. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6-35 кВ / Б. Абрамович, С. Кабанов, А. Сергеев, В. Полищук // Информационно-справочное издание – Новости электротехники. – 2002. – №5(17). – С. 31–33.
55. Перцев А.А. Вакуумные дугогасительные камеры для выключателей 35 – 110 кВ / А.А. Перцев, Л.А. Рыльская // Электротехническа промышленность. – 1981. – вып. 8 (121). – С. 7 – 10.

56. Перцев А.А. Повторные пробои двух соединенных последовательно вакуумных дугогасительных камер/ А.А. Перцев, Л.А. Рыльская, В.В. Чулков // Электричество. – 1991. – №3. – С. 29 – 31.
57. Перцев А.А. Электрическая прочность вакуумной дугогасительной камеры после отключения тока / А.А. Перцев, Л.А. Рыльская // Электротехника. – 1985. – №1. – С. 5 – 9.
58. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое, 2005. – 458 с.
59. Попов И.А. Вакуумные выключатели. Состояние и перспективы развития/ И.А. Попов. – М.: Энергия, 1965. – 140 с.
60. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений / Д.В. Разевиг. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
61. Разгильдеев Г. И. Эксплуатация вакуумных выключателей в электрических сетях горных предприятий / Г.И Разгильдеев, В.В. Курехин. – М.: Недра, 1988. – 102 с.
62. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М.: Наука, 1970. – 536.
63. Руководящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока напряжением 3-220 кВ. – М.Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 265 с.
64. Рыбкин В.А. Определение волновых параметров и коммутационных перенапряжений при отключении вакуумным выключателем двигателя 6 кВ / В.А. Рыбкин, С.С. Чубрик, В.Н. Помыткин // Промышленная энергетика. – 1977. – №11. – С. 41 – 44.
65. Рывкин А.М. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой / А.М. Рывкин, И.А. Луцкая, А.Л. Буйков, С.М. Давыдов, В.Д. Ляшенко // Электрические станции. – 1990. – №5. – С. 62 – 65.
66. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров / И.С. Самойлович. – М.: Недра, 1976. – 175 с.

67. Сапожников И.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения / И.В. Сапожников. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.
68. Серов В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий / В.И. Серов, В.И. Шуцкий, Б.М. Ягудаев. – М.: Наука, 1985. – 136 с.
69. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И.М. Сирота. – Киев: Наук думка, 1983. – 268 с.
70. Сливинская А.А. Статистическое оценивание / А.А. Сливинская. Под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 586 с.
71. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические применения: пер. с нем. / М. Бейер, В. Бек, К. Мёллер, В. Цаенгль; под ред. В.П. Ларионова – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
72. Халилов Ф.Х. Еще раз о дуговых перенапряжениях в распределительных сетях 6-35 кВ./ Ф.Х. Халилов // Промышленная энергетика. – 1985. – №2. – С. 35 – 37.
73. Шуцкий В.И. Анализ причин однофазных замыканий на землю /В.И. Шуцкий, С.В. Кузьмин // Колыма. – 1986. – №3. – С. 11 – 13.
74. Эпштейн И.Я. Методика оценки влияния коммутационных аппаратов на эксплуатационную надежность изоляции электрооборудования / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров // Электротехника.– 1990. – №2. – С. 25 – 26.
75. Эпштейн И.Я. Экспериментальные исследования коммутационных перенапряжений на экскаваторах / И.Я. Эпштейн, В.А. Котлярчук // Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР. – Днепропетровск: кн. изд-во. 1975. – С.132 – 135.
76. Юу К.У. Моделирование на цифровых ЭВМ процесса неявного среза тока в вакуумных выключателях / К.Ю. Юу, Дж. П. Бикфорд // Electronic power Applications. – 1979. – №4. – С. 125 – 131.
77. Gelent B. Masurement of partikcles and vapor dencity after high Current vacuum arcs by laster technigues / B. Gelent, E. Schade, E. Dullni // IEEE Trans or Plasma Scienc. – 1987. – vol PS. – №15. – С. 545 – 551.

78. Ohkawa M., Koike H. Switching surge in vacuum. Switching devices and countermeasures / M. Ohkawa, H. Koike // Toshiba Rev. Int. Ed. – 1976. N. 105. – P. 18 – 25.
79. Schade E. Forschung fur Vacuumschalt kammern / E. Schade, B. Gelent, U. Reininghaus. – Color – Emag – Mitteilungen. – Heft I/II. – 1986. – P. 4 – 6.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с компенсированной нейтралью**

Решение однородного дифференциального уравнения записывается в виде показательных функций:

$$u_{N\text{CB}} = \sum A e^{pt} \quad (\text{П1.1})$$

Произведя замену согласно классическому методу расчета переходных процессов:

$$p^2 = \frac{d^2 u_{N\text{CB}}}{dt^2}; \quad p = \frac{du_{N\text{CB}}}{dt}; \quad u_{N\text{CB}} = 1, \quad (\text{П1.2})$$

получим следующее характеристическое уравнение:

$$p^2 \cdot L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + p \cdot R_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + 1 = 0 \quad (\text{П1.3})$$

Решение данного уравнения показывает, что корни уравнения являются комплексными:

$$p_{1,2} = -\frac{R_{\text{ДГР}}}{2 \cdot L_{\text{ДГР}}} \pm \sqrt{\frac{\left(\frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}}}\right)^2 - \frac{4}{L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}}}{4}}, \quad (\text{П1.4})$$

где  $\delta = -\frac{R_{\text{ДГР}}}{2 \cdot L_{\text{ДГР}}}$  – коэффициент затухания;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\left(\frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}}}\right)^2 - \frac{4}{L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}}}{4}} \quad \text{– угловая частота свободных колебаний.}$$

Таким образом, общее решение дифференциального уравнения второго порядка с учетом типа корней уравнения имеет следующий вид:

$$u_{N\text{CB}}(t) = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \nu), \quad (\text{П1.5})$$

### продолжение приложения 1

где  $A, \nu$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий –  $u_{N_{CB}}(0_+), u'_{N_{CB}}(0_+)$ .

Для определения неизвестных  $A$  и  $\nu$  имеем два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u_{N_{CB}}(0_+) &= A \sin \nu, \\ u'_{N_{CB}}(0_+) &= -A \cdot \delta \cdot \sin \nu + \omega_0 \cdot A \cos \nu \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.6})$$

В режиме устойчивого однофазного замыкания на землю напряжение смещения нейтрали равно фазному напряжению. Поэтому, согласно начальным условиям, получаем:

$$\left. \begin{aligned} u_N(0_-) &= u_N(0_+) = U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi), \\ i_L(0_-) &= i_L(0_+) = i_{\text{ост}} = I_{\text{мфДГР}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.7})$$

Тогда, подставляя в систему (П1.6) данные из системы (П1.7), получим:

$$U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) = u_{N_{CB}}(0_+) = A \sin \nu \quad (\text{П1.8})$$

Также из системы уравнений (3.10) следует, что  $i_L = -i_C$ ,

$i_C = C_{\text{с.ш.}} \cdot \left( \frac{du_{\text{с.ш.}}}{dt} \right)$ ,  $u_N = u_{\text{с.ш.}}$  значит

$$\left( \frac{du_{N_{CB}}}{dt} \right)_{t=0_+} = \frac{i_{\text{с.ш.}}(0_+)}{C_{\text{с.ш.}}} = -\frac{i_{\text{ост}}}{C_{\text{с.ш.}}} \quad (\text{П1.9})$$

Теперь с учетом уравнений (П1.8), (П1.9) системы (П1.6) получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) &= A \cdot \sin \nu \\ -\frac{i_{\text{ост}}}{C_{\text{с.ш.}}} &= -A \cdot \delta \cdot \sin \nu + \omega_0 \cdot A \cos \nu \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.10})$$

Откуда, пропуская промежуточные математические выкладки, получим постоянные интегрирования  $A, \nu$ :

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \text{arcctg} \left[ \frac{-(i_{\text{ост}} - U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \cdot \delta \cdot C_{\text{с.ш.}})}{C_{\text{с.ш.}} \cdot \omega_0 \cdot U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} \right] \\ A &= \frac{U_{\text{мф}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.11})$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с компенсированной нейтралью**

Таблица П2.1 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и}, Гц$	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{В-}$ $маx/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	476	79143	86882	87089	86441	7,91	8,69	8,71	8,64
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	88277	96102	96405	96384	8,83	9,61	9,64	9,64
3	10000	5773,5	40	0,15	606	97288	104642	103876	104262	9,73	10,46	10,39	10,43
4	10000	5773,5	46,5	0,15	666	104757	112422	111469	112402	10,48	11,24	11,15	11,24
5	10000	5773,5	52	0,15	689	110934	118910	118215	117889	11,09	11,89	11,82	11,79

Таблица П2.2 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и}, Гц$	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{В-}$ $маx/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	476	52119	60143	59926	60210	5,21	6,01	5,99	6,02
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	58421	66069	66168	66491	5,84	6,61	6,62	6,65
3	10000	5773,5	40	0,15	606	63848	71439	71683	71920	6,38	7,14	7,17	7,19
4	10000	5773,5	46,5	0,15	645	68759	76390	76216	76516	6,88	7,64	7,62	7,65
5	10000	5773,5	52	0,15	684	72644	80489	80564	80490	7,26	8,05	8,06	8,05

**продолжение приложения 2**

Таблица П2.3 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и.},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{В-}$ $маx/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	476	75536	83452	83466	82988	7,55	8,35	8,35	8,30
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	84408	92241	92489	92515	8,44	9,22	9,25	9,25
3	10000	5773,5	40	0,15	606	92905	100238	100179	100466	9,29	10,02	10,02	10,05
4	10000	5773,5	46,5	0,15	666	100220	107857	107811	107696	10,02	10,79	10,78	10,77
5	10000	5773,5	52	0,15	689	105946	113824	113060	113981	10,59	11,38	11,31	11,40

Таблица П2.4 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и.},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B = u_{В-}$ $маx/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	476	61902	69606	69556	70056	6,19	6,96	6,96	7,01
2	10000	5773,5	33,5	0,15	555	69237	76781	76826	77287	6,92	7,68	7,68	7,73
3	10000	5773,5	40	0,15	606	75987	83334	83594	83851	7,60	8,33	8,36	8,39
4	10000	5773,5	46,5	0,15	645	81833	89330	89313	89221	8,18	8,93	8,93	8,92
5	10000	5773,5	52	0,15	684	86494	94348	94272	94109	8,65	9,43	9,43	9,41

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Графики переходных процессов, возникающих на за-  
жмах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с компенсированной  
нейтралью**

$u_{N\text{св}}(t), \text{ В}$



Рисунок ПЗ.1 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

$u_{\text{В}}(t), \text{ В}$

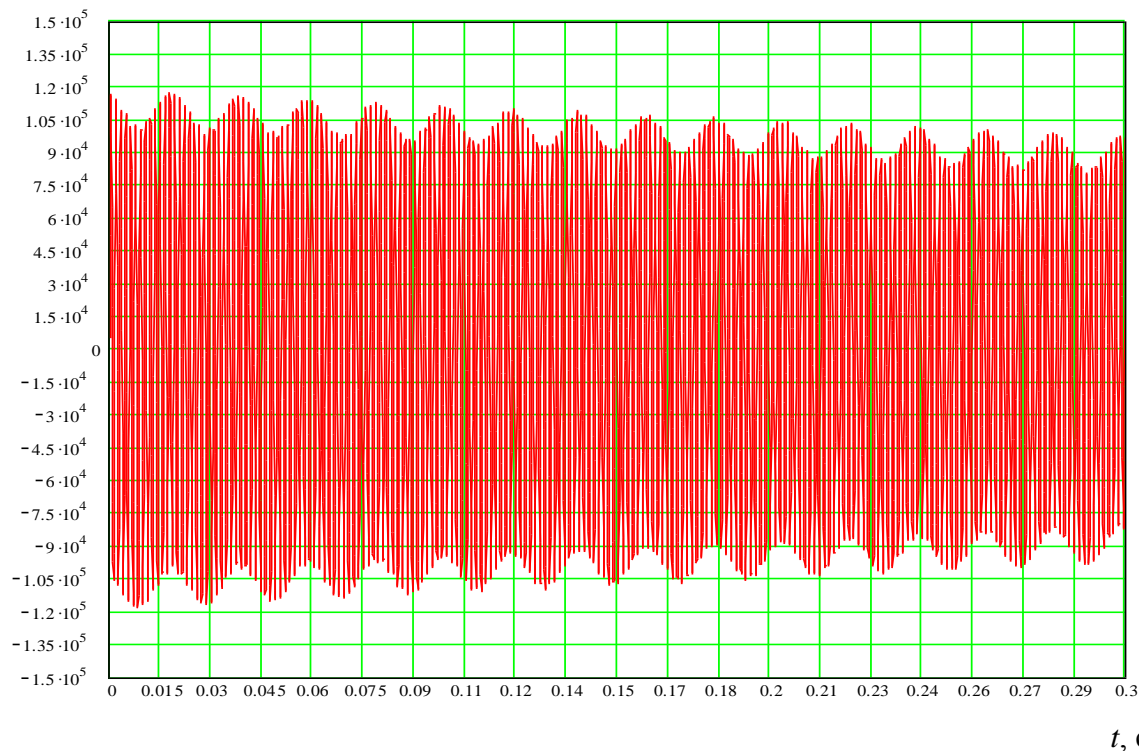


Рисунок ПЗ.2 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

### продолжение приложения 3

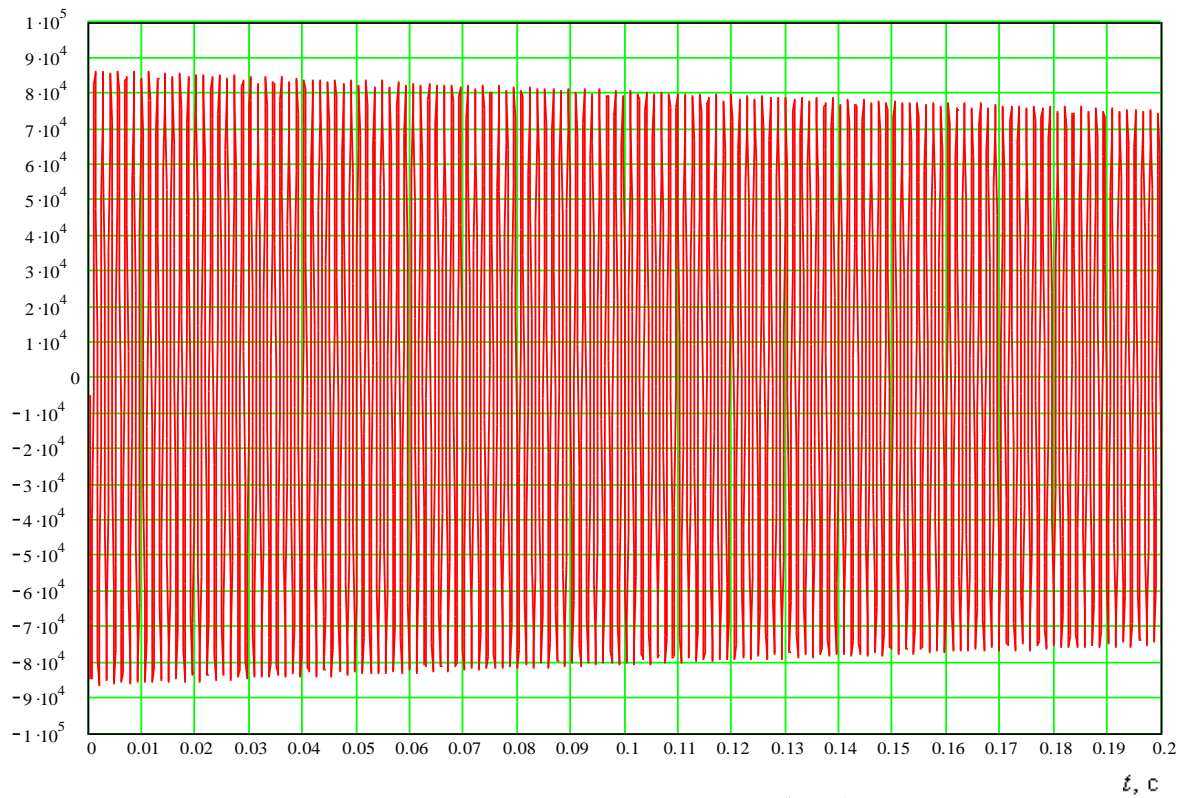
 $u_{N\text{CB}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок ПЗ.3 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

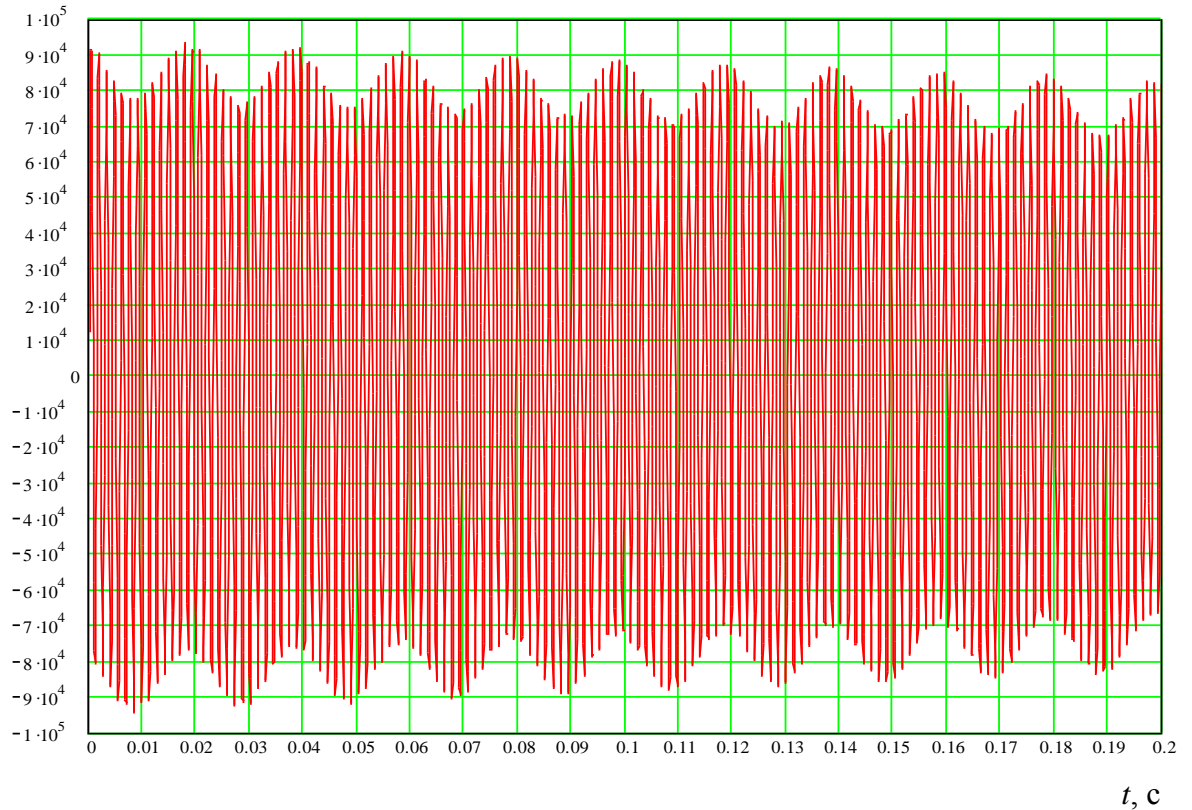
 $u_{\text{В}}(t), \text{ В}$ 


Рисунок ПЗ.4 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

продолжение приложения 3

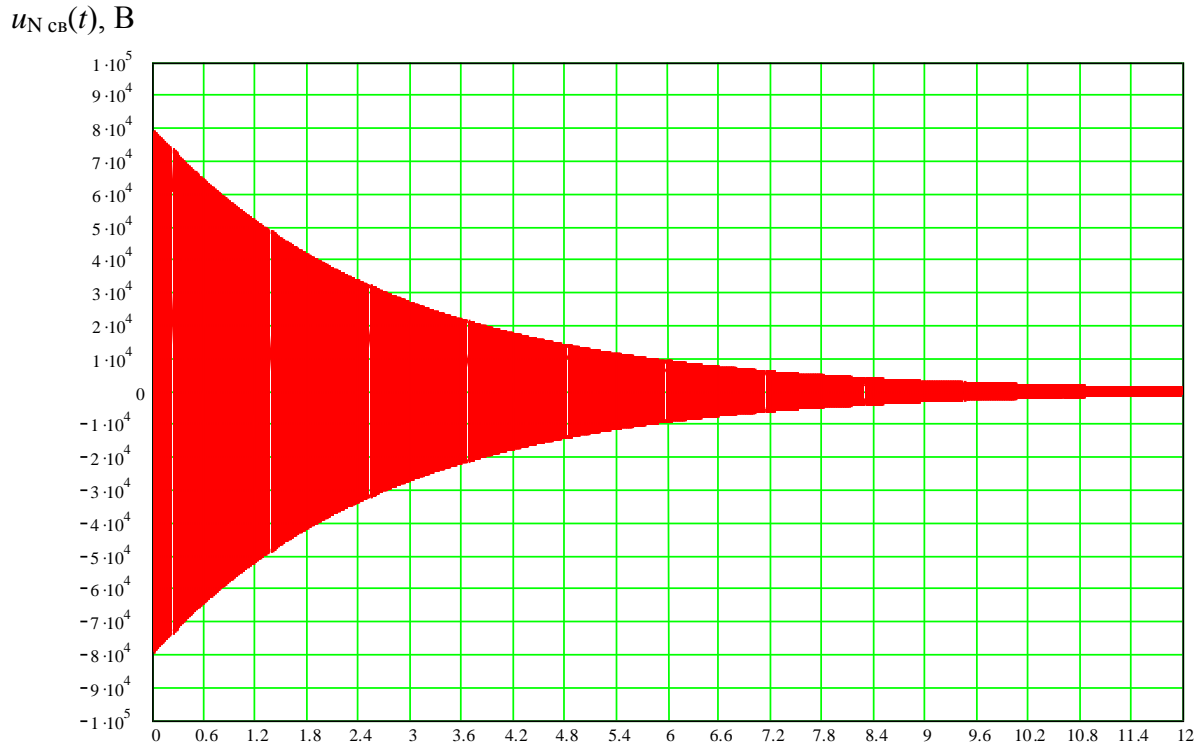


Рисунок ПЗ.5 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^{\circ}$ ,  $\varphi = 30^{\circ}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5 \text{ А}$ , время переходного процесса 12 с)

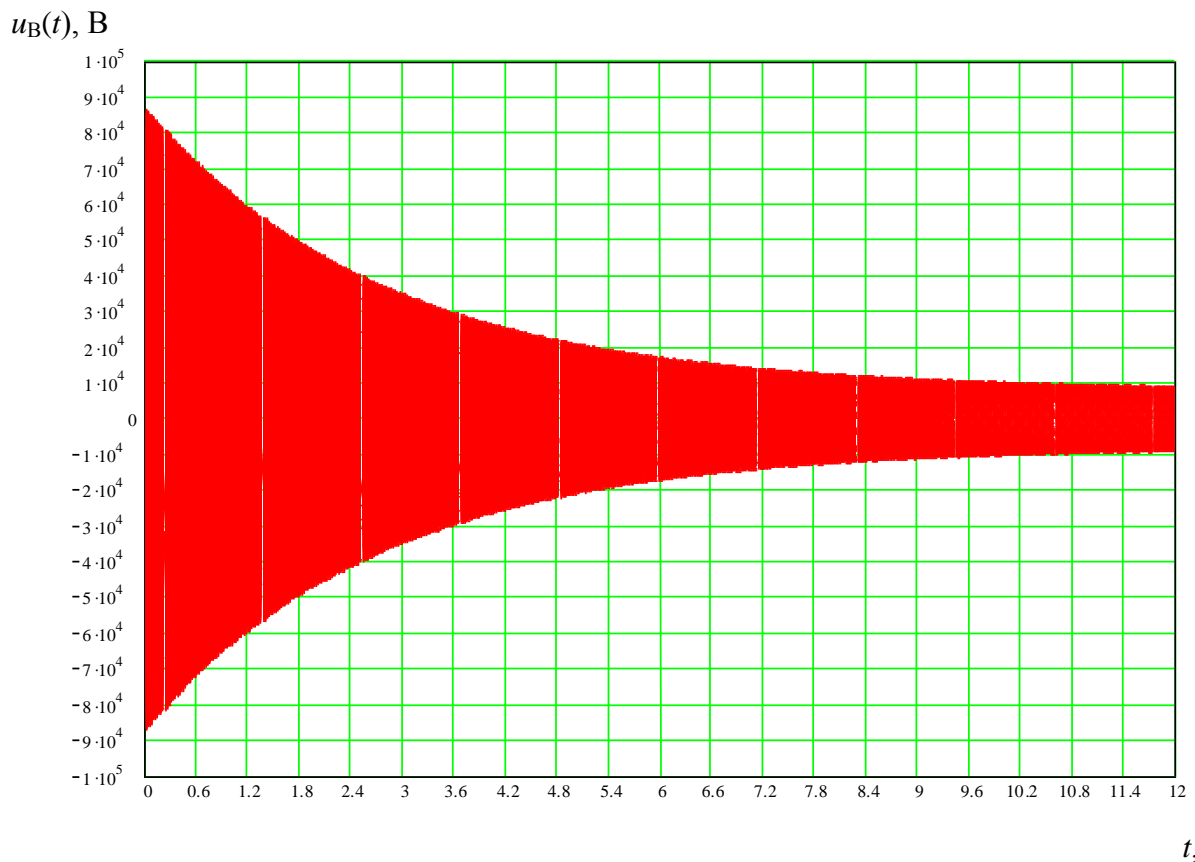


Рисунок ПЗ.6 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^{\circ}$ ,  $\varphi = 30^{\circ}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5 \text{ А}$ , время переходного процесса 12 с)

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с нейтралью, частично заземленной через резистор**

Решение системы однородных дифференциальных уравнений записывается в виде показательных функций:

$$u_{\text{св}} = Ae^{pt} \quad (\text{П4.1})$$

Произведя замену, согласно классическому методу расчета переходных процессов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_{\text{св}}}{dt} &= \frac{d}{dt}(Ae^{pt}) = p \cdot Ae^{pt} = p \cdot u_{\text{св}}, \\ \int u_{\text{св}} dt &= \int Ae^{pt} dt = \frac{Ae^{pt}}{p} = \frac{u_{\text{св}}}{p} \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.2})$$

Таким образом, свободный ток через индуктивность и свободный ток через конденсатор можно заменить следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{L_{\text{ДГР}}} \int u_{L_{\text{ДГРсв}}} dt &= \frac{1}{L_{\text{ДГР}} \cdot p} \cdot u_{L_{\text{ДГРсв}}} \\ C_{\text{с.ш.}} \frac{du_{N_{\text{св}}}}{dt} &= C_{\text{с.ш.}} \cdot p \cdot u_{N_{\text{св}}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.3})$$

Подставим правые части этих выражений в систему (3.21), после чего получим новую систему алгебраических уравнений относительно свободных составляющих напряжений, которая, в отличие от исходной системы, не содержит производных и интегралов.

$$\left. \begin{aligned} u_{N_{\text{св}}} \cdot C_{\text{с.ш.}} \cdot p + u_{L_{\text{ДГРсв}}} \frac{1}{L_{\text{ДГР}} \cdot p} + u_{R_{\text{св}}} \frac{1}{R_p} &= 0 \\ -u_{N_{\text{св}}} + u_{L_{\text{ДГРсв}}} + u_{L_{\text{ДГРсв}}} \frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}} \cdot p} + u_{R_{\text{св}}} \cdot 0 &= 0 \\ u_{N_{\text{св}}} \cdot 0 - u_{L_{\text{ДГРсв}}} \frac{R_{\text{ДГР}}}{L_{\text{ДГР}} \cdot p} - u_{L_{\text{ДГРсв}}} + u_{R_{\text{св}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.4})$$

После преобразований получим следующую систему уравнений:

**продолжение приложения 4**

$$\left. \begin{aligned} u_{N_{CB}} \cdot C_{с.ш.} \cdot p + u_{L_{ДГР_{CB}}} \frac{1}{L_{ДГР} \cdot p} + u_{R_{CB}} \frac{1}{R_p} &= 0 \\ -u_{N_{CB}} + u_{L_{ДГР_{CB}}} \left( 1 + \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} \right) + u_{R_{CB}} \cdot 0 &= 0 \\ u_{N_{CB}} \cdot 0 - u_{L_{ДГР_{CB}}} \left( \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} + 1 \right) + u_{R_{CB}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.5})$$

Определитель данной системы уравнений будет иметь следующий вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} C_{с.ш.} \cdot p & \frac{1}{L_{ДГР} \cdot p} & \frac{1}{R_p} \\ -1 & \left( 1 + \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} \right) & 0 \\ 0 & -\left( \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} + 1 \right) & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П4.6})$$

а выражение  $\Delta=0$  будет являться характеристическим уравнением [22] системы уравнения (П4.4)

$$\Delta = \begin{vmatrix} C_{с.ш.} \cdot p & \frac{1}{L_{ДГР} \cdot p} & \frac{1}{R_p} \\ -1 & \left( 1 + \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} \right) & 0 \\ 0 & -\left( \frac{R_{ДГР}}{L_{ДГР} \cdot p} + 1 \right) & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{П4.7})$$

Опуская промежуточные математические выкладки, получим характеристическое уравнение системы (П4.4):

$$p^2 \cdot R_p \cdot L_{ДГР} \cdot C_{с.ш.} + p \cdot (R_p \cdot R_{ДГР} \cdot C_{с.ш.} + L_{ДГР}) + R_{ДГР} + R_p = 0 \quad (\text{П4.8})$$

### продолжение приложения 4

Решение данного уравнения показывает, что корни уравнения могут являться как комплексными, так и действительными (при определенных условиях):

$$p_{1,2} = -\frac{(R_p \cdot R_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + L_{\text{ДГР}})}{2 \cdot R_p \cdot L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}} \pm \sqrt{\frac{(R_p \cdot R_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + L_{\text{ДГР}})^2}{4 \cdot R_p^2 \cdot L_{\text{ДГР}}^2 \cdot C_{\text{с.ш.}}^2} - \frac{(R_{\text{ДГР}} + R_p)}{R_p \cdot L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}}}, \quad (\text{П4.9})$$

где  $\delta = -\frac{(R_p \cdot R_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + L_{\text{ДГР}})}{2 \cdot R_p \cdot L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}}$  – коэффициент затухания;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(R_p \cdot R_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}} + L_{\text{ДГР}})^2}{4 \cdot R_p^2 \cdot L_{\text{ДГР}}^2 \cdot C_{\text{с.ш.}}^2} - \frac{(R_{\text{ДГР}} + R_p)}{R_p \cdot L_{\text{ДГР}} \cdot C_{\text{с.ш.}}}} \quad \text{– угловая частота свободных колебаний.}$$

ных колебаний.

Таким образом, общее решение дифференциального уравнения второго порядка в случае комплексных корней уравнения имеет следующий вид:

$$u_{\text{Нсв}} = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \nu), \quad (\text{П4.10})$$

где  $A$ ,  $\nu$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий –  $u_{\text{Нсв}}(0_+)$ ,  $u'_{\text{Нсв}}(0_+)$ .

Для определения неизвестных  $A$  и  $\nu$  имеем два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{Нсв}}(0_+) &= A \sin \nu, \\ u'_{\text{Нсв}}(0_+) &= -A \cdot \delta \cdot \sin \nu + \omega_0 \cdot A \cos \nu \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.11})$$

Из начальных условий следует:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{N}}(0_+) = u_{\text{N}}(0_-) &= U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \\ i_{\text{L}}(0_-) = i_{\text{L}}(0_+) = i_{\text{ост}} &= I_{\text{мФДГР}} \cdot \sin \varphi \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \varphi \right), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.12})$$

Тогда, подставляя в систему (П4.11) данные из системы (П4.12), получим:

$$U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) = u_{\text{Ссв}}(0_+) = u_{\text{Rсв}}(0_+) = u_{\text{Нсв}}(0_+) = A \sin \nu \quad (\text{П4.13})$$

**продолжение приложения 4**

где  $u_{R_{CB}}(0_+) = i_{R_{CB}}(0_+) \cdot R_p$

Также из системы уравнений (3.21) следует, что  $i_{C_{CB}}(0_+) = -i_{L_{CB}}(0_+) - i_{R_{CB}}(0_+)$ ,  $i_C = C_{с.ш.} \cdot \left( \frac{du_{C_{с.ш.}}}{dt} \right)$ ,  $u_N = u_{C_{с.ш.}}$ . значит, с учетом системы (П4.11), получаем

$$\left( \frac{du_{N_{CB}}}{dt} \right)_{t=0_+} = \frac{i_{C_{CB}}(0_+)}{C_{с.ш.}} = - \frac{(i_{ост} \cdot R_p + U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{с.ш.}} \quad (\text{П4.14})$$

Теперь с учетом уравнений (П4.13), (П4.14) и системы (П4.11) получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) &= A \cdot \sin \nu \\ - \frac{(i_{ост} \cdot R_p + U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{с.ш.}} &= -A \cdot \delta \cdot \sin \nu + \omega_0 \cdot A \cos \nu \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.15})$$

Откуда, пропуская промежуточные математические выкладки, получим постоянные интегрирования  $A$ ,  $\nu$ :

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \text{arctg} \left[ - \frac{(i_{ост} \cdot R_p + U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{с.ш.} \cdot \omega_0 \cdot U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)} + \frac{\delta}{\omega_0} \right] \\ A &= \frac{U_{мФ} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{\sin \nu} \end{aligned} \right\} \quad (\text{П4.16})$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Математические выкладки для вывода формулы свободной составляющей напряжения смещения нейтрали при переходном процессе сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, в случае отрицательных разных корней**

При определенных условиях, в частности, при снижении сопротивления резистора, включенного в нейтраль, корни характеристического уравнения становятся отрицательными разными, поэтому в таком случае общее решение дифференциального уравнения второго порядка будет иметь следующий вид:

$$u_{N_{CB}} = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (\text{П5.1})$$

где  $A_1, A_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий –  $u_{N_{CB}}(0_+), u'_{N_{CB}}(0_+), p_1, p_2$  – корни характеристического уравнения.

Для определения неизвестных  $A_1, A_2$  имеем два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u_{N_{CB}}(0_+) &= A_1 + A_2, \\ u'_{N_{CB}}(0_+) &= p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П5.2})$$

Из начальных условий следует:

$$\left. \begin{aligned} u_N(0_+) &= u_N(0_-) = U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) \\ i_L(0_-) &= i_L(0_+) = i_{ост} = I_{m\Phi ДГР} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \varphi\right), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П5.3})$$

Тогда, подставляя в систему (П5.2) данные из системы (П5.3), получим:

$$U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) = u_{C_{CB}}(0_+) = u_{R_{CB}}(0_+) = u_{N_{CB}}(0_+) = A \sin \nu \quad (\text{П5.4})$$

где  $u_{R_{CB}}(0_+) = i_{R_{CB}}(0_+) \cdot R_p$

Также из системы уравнений (3.21) следует, что  $i_{C_{CB}}(0_+) = -i_{L_{CB}}(0_+) - i_{R_{CB}}(0_+)$ ,  $i_C = C_{с.ш.} \cdot \left( \frac{du_{C_{с.ш.}}}{dt} \right)$ ,  $u_N = u_{C_{с.ш.}}$  значит, с учетом системы (П5.2), получаем

$$\left( \frac{dU_{N_{CB}}}{dt} \right)_{t=0_+} = \frac{i_{C_{CB}}(0_+)}{C_{с.ш.}} = - \frac{(i_{ост} \cdot R_p + U_{m\Phi} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_p \cdot C_{с.ш.}} \quad (\text{П5.5})$$

Теперь с учетом уравнений (П5.4), (П5.5) и системы (П5.2) получим:

**продолжение приложения 5**

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) - A_1 \\ - \frac{(i_{\text{ост}} \cdot R_{\text{п}} + U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_{\text{п}} \cdot C_{\text{с.ш.}}} &= p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot (U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) - A_1) \end{aligned} \right\} \text{ (П5.6)}$$

Откуда, пропуская промежуточные математические выкладки, получим постоянные интегрирования  $A_1, A_2$ :

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= - \frac{(i_{\text{ост}} \cdot R_{\text{п}} + U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi))}{R_{\text{п}} \cdot C_{\text{с.ш.}} \cdot (p_1 - p_2)} - \frac{p_2 \cdot U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi)}{p_1 - p_2} \\ A_2 &= U_{\text{мФ}} \cdot \sin(\pi - \psi + \varphi) - A_1 \end{aligned} \right\} \text{ (П5.7)}$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с нейтралью, частично заземленной через резистор**

Таблица П6.1 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Aмаx}(t),$ В	$u_{Bмаx}(t),$ В	$u_{Cмаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Aмаx}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Bмаx}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Cмаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	476	58264	59541	64610	50641	5,83	5,95	6,46	5,06
3	10000	5773,5	40			606	75722	76745	82226	68196	7,57	7,67	8,22	6,82
5	10000	5773,5	52			689	88230	88998	94886	80806	8,82	8,90	9,49	8,08
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	476	46384	47407	52888	38857	4,64	4,74	5,29	3,89
3	10000	5773,5	40			606	61047	61815	67703	53624	6,10	6,18	6,77	5,36
5	10000	5773,5	52			689	73989	74757	80644	66565	7,40	7,48	8,06	6,66
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000	476	27738	28506	34394	20314	2,77	2,85	3,44	2,03
3	10000	5773,5	40			606	38965	39733	45620	31541	3,90	3,97	4,56	3,15
5	10000	5773,5	52			689	47384	48152	54040	39960	4,74	4,82	5,40	4,00
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	476	16154	16893	22955	8841	1,62	1,69	2,30	0,88
3	10000	5773,5	40			606	23705	24217	30506	16391	2,37	2,42	3,05	1,64
5	10000	5773,5	52			689	30017	30530	36818	22704	3,00	3,05	3,68	2,27
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200	476	7086	10115	19919	8488	0,71	1,01	1,99	0,85
3	10000	5773,5	40			606	10487	10987	17427	8488	1,05	1,10	1,74	0,85
5	10000	5773,5	52			689	13563	13877	20503	8488	1,36	1,39	2,05	0,85

**продолжение приложения 6**

Таблица П6.2 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi =60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.мах}(t),$ В	$u_{Амах}(t),$ В	$u_{Вмах}(t),$ В	$u_{Смах}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.мах}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амах}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Вмах}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смах}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	476	38707	39730	45211	31181	3,87	3,97	4,52	3,12
3	10000	5773,5	40			606	49114	49882	55770	41690	4,91	4,99	5,58	4,17
5	10000	5773,5	52			689	58351	59119	65006	50927	5,84	5,91	6,50	5,09
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	435	30304	31327	36808	22778	3,03	3,13	3,68	2,28
3	10000	5773,5	40			606	40575	41343	47230	33151	4,06	4,13	4,72	3,32
5	10000	5773,5	52			689	48385	49153	55040	40961	4,84	4,92	5,50	4,10
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000		18224	18992	24880	10801	1,82	1,90	2,49	1,08
3	10000	5773,5	40			606	25227	25938	32028	17914	2,52	2,59	3,20	1,79
5	10000	5773,5	52			689	31395	31908	38196	24082	3,14	3,19	3,82	2,41
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500		10763	11276	17564	8166	1,08	1,13	1,76	0,82
3	10000	5773,5	40			606	15557	16069	22358	8244	1,56	1,61	2,24	0,82
5	10000	5773,5	52			689	19562	20074	26363	12248	1,96	2,01	2,64	1,22
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200		6254	9367	13325	8326	0,63	0,94	1,33	0,83
3	10000	5773,5	40			606	7023	9072	13962	8206	0,70	0,91	1,40	0,82
5	10000	5773,5	52			689	9007	9264	15947	8175	0,90	0,93	1,59	0,82

продолжение приложения 6

Таблица П6.3 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Вмаx}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	476	55763	57040	62109	48141	5,58	5,70	6,21	4,81
3	10000	5773,5	40			606	72372	73395	78876	64848	7,24	7,34	7,89	6,48
5	10000	5773,5	52			689	84035	84803	90691	76611	8,40	8,48	9,07	7,66
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	476	44253	45276	50757	36726	4,43	4,53	5,08	3,67
3	10000	5773,5	40			606	58104	59018	64760	50681	5,81	5,90	6,48	5,07
5	10000	5773,5	52			689	70581	71349	77236	63157	7,06	7,13	7,72	6,32
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000	476	26443	27211	33099	19020	2,64	2,72	3,31	1,90
3	10000	5773,5	40			606	37232	38000	43888	29808	3,72	3,80	4,39	2,98
5	10000	5773,5	52			689	45328	46096	51984	37905	4,53	4,61	5,20	3,79
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	476	15425	16193	22171	9863	1,54	1,62	2,22	0,99
3	10000	5773,5	40			606	22602	23114	29403	15288	2,26	2,31	2,94	1,53
5	10000	5773,5	52			689	28648	29161	35449	21335	2,86	2,92	3,54	2,13
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200	476	6772	10018	13573	9863	0,68	1,00	1,36	0,99
3	10000	5773,5	40			606	10011	10523	16911	9863	1,00	1,05	1,69	0,99
5	10000	5773,5	52			689	12911	13286	19850	9863	1,29	1,33	1,99	0,99

продолжение приложения 6

Таблица П6.4 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=30^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.мах}(t),$ В	$u_{Амах}(t),$ В	$u_{Вмах}(t),$ В	$u_{Смах}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.мах}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Амах}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Вмах}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Смах}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	476	58393	59416	64897	50867	5,84	5,94	6,49	5,09
3	10000	5773,5	40			606	75489	76512	81993	67963	7,55	7,65	8,20	6,80
5	10000	5773,5	52			689	88531	89299	95187	81108	8,85	8,93	9,52	8,11
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	476	46396	47418	52900	38869	4,64	4,74	5,29	3,89
3	10000	5773,5	40			606	61335	62103	67991	53911	6,13	6,21	6,80	5,39
5	10000	5773,5	52			689	74025	74793	80681	66601	7,40	7,48	8,07	6,66
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000	476	27785	28553	34441	20362	2,78	2,86	3,44	2,04
3	10000	5773,5	40			606	38861	39629	45517	31437	3,89	3,96	4,55	3,14
5	10000	5773,5	52			689	47195	47925	53996	39882	4,72	4,79	5,40	3,99
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500	476	16241	16816	23042	8928	1,62	1,68	2,30	0,89
3	10000	5773,5	40			606	23738	24251	30539	16425	2,37	2,43	3,05	1,64
5	10000	5773,5	52			689	30005	30518	36806	22692	3,00	3,05	3,68	2,27
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200	476	7066	10108	14000	8416	0,71	1,01	1,40	0,84
3	10000	5773,5	40			606	10558	10956	17497	8230	1,06	1,10	1,75	0,82
5	10000	5773,5	52			689	13624	13881	20564	8164	1,36	1,39	2,06	0,82

**продолжение приложения 6**

Таблица П6.5 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=20^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Aмаx}(t),$ В	$u_{Bмаx}(t),$ В	$u_{Cмаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Aмаx}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Bмаx}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Cмаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	0,15	5000	476	45884	46907	52388	38357	4,59	4,69	5,24	3,84
3	10000	5773,5	40			606	58380	59402	64883	50853	5,84	5,94	6,49	5,09
5	10000	5773,5	52			689	69305	70073	75961	61882	6,93	7,01	7,60	6,19
1	10000	5773,5	26,5	0,15	2500	435	36106	37129	42610	28580	3,61	3,71	4,26	2,86
3	10000	5773,5	40			606	48131	48899	54787	40707	4,81	4,89	5,48	4,07
5	10000	5773,5	52			689	57634	58402	64290	50211	5,76	5,84	6,43	5,02
1	10000	5773,5	26,5	0,15	1000		21682	22450	28338	14259	2,17	2,25	2,83	1,43
3	10000	5773,5	40			606	30077	30845	36733	22653	3,01	3,08	3,67	2,27
5	10000	5773,5	52			689	37171	37683	43972	29858	3,72	3,77	4,40	2,99
1	10000	5773,5	26,5	0,15	500		12760	13272	19561	8166	1,28	1,33	1,96	0,82
3	10000	5773,5	40			606	18514	19026	25315	11201	1,85	1,90	2,53	1,12
5	10000	5773,5	52			689	23322	23835	30123	16009	2,33	2,38	3,01	1,60
1	10000	5773,5	26,5	0,15	200		5610	9624	12549	8359	0,56	0,96	1,25	0,84
3	10000	5773,5	40			606	8315	9283	15254	8214	0,83	0,93	1,53	0,82
5	10000	5773,5	52			689	10687	10944	17627	8178	1,07	1,09	1,76	0,82

**ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Графики переходных процессов, возникающих на за-  
жмах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с нейтралью, частич-  
но заземленной через резистор**

$u_{N\text{св}}(t)$ , В



Рисунок П7.1 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 5000$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)

$u_B(t)$ , В

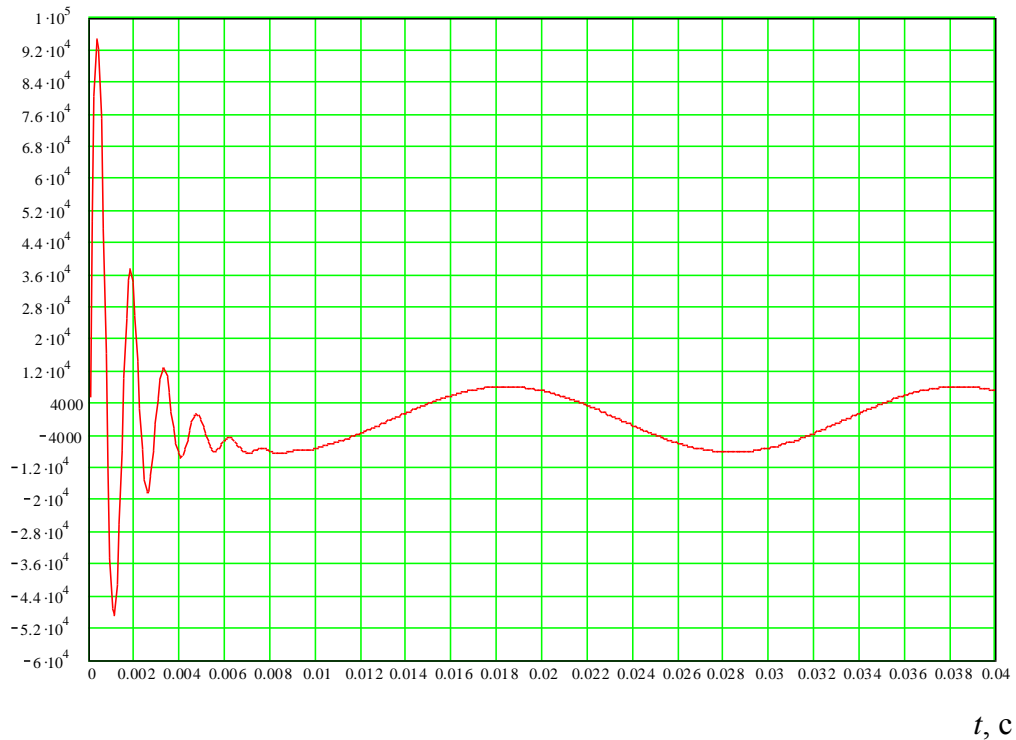


Рисунок П7.2 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 5000$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)

## продолжение приложения 7

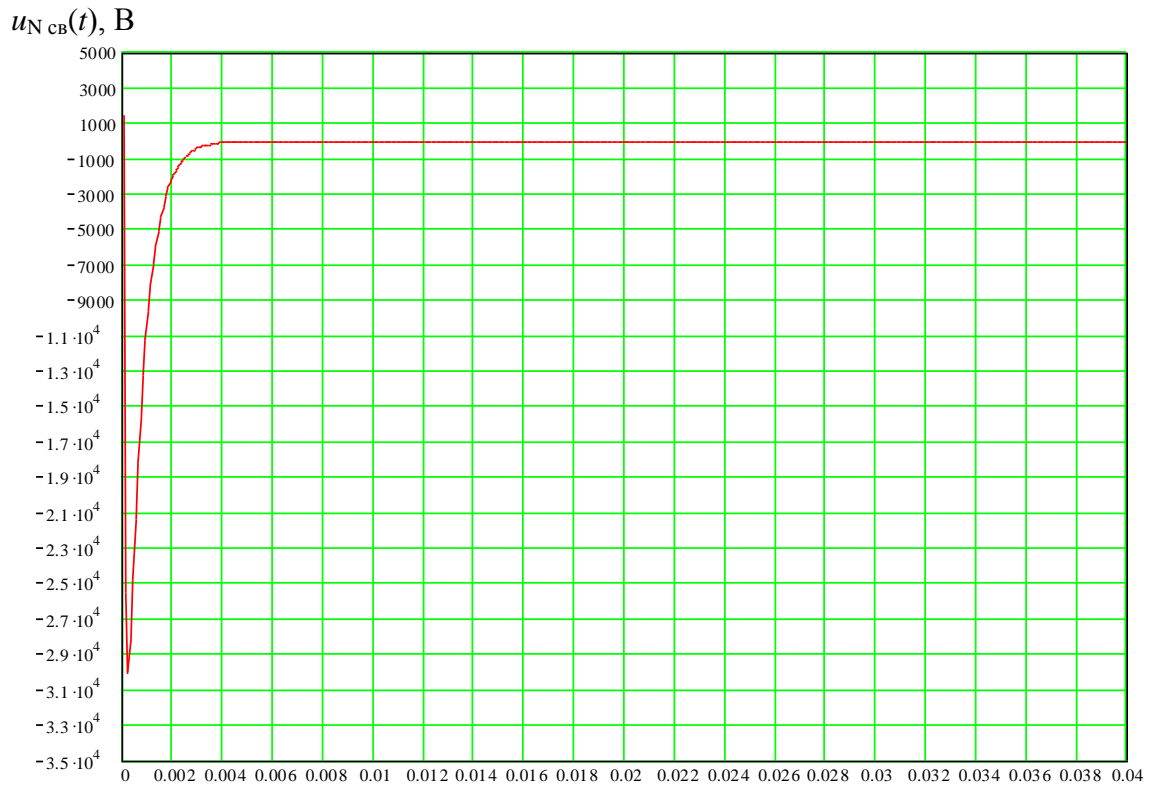


Рисунок П7.3 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 500$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)

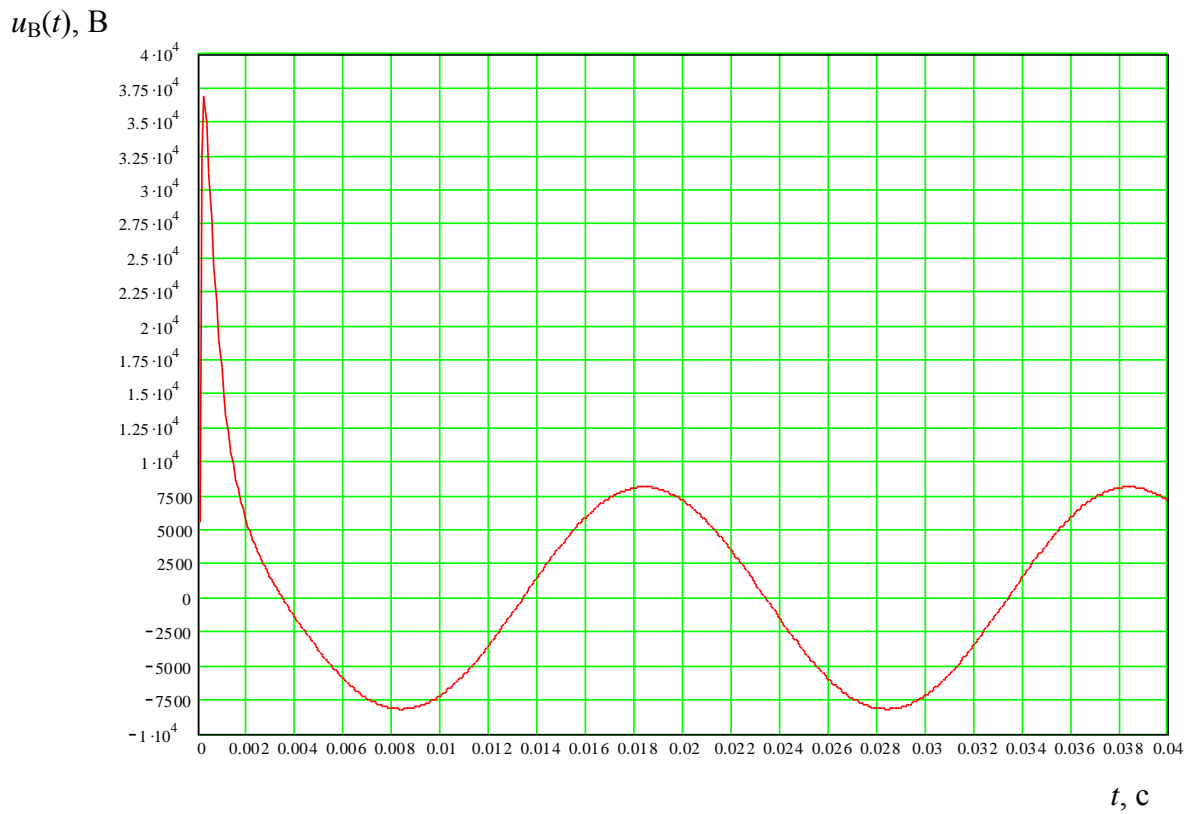


Рисунок П7.4 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 500$  Ом,  $I_{ДГР} = 52$  А)

## продолжение приложения 7

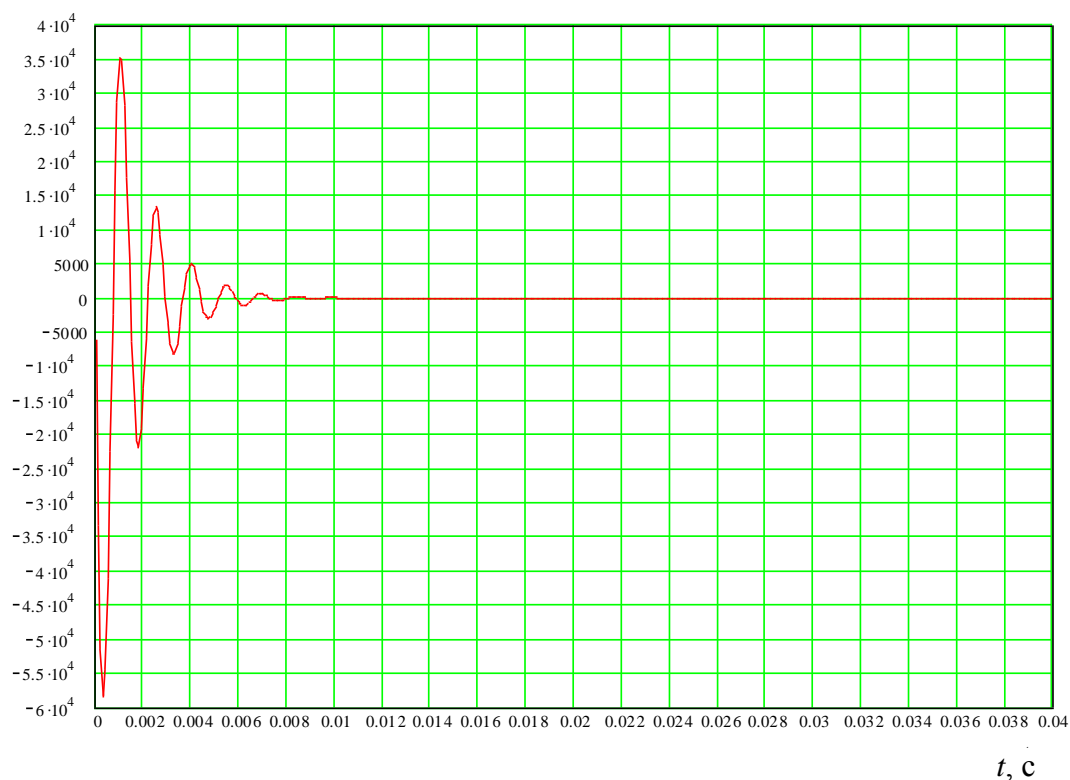
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.5 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

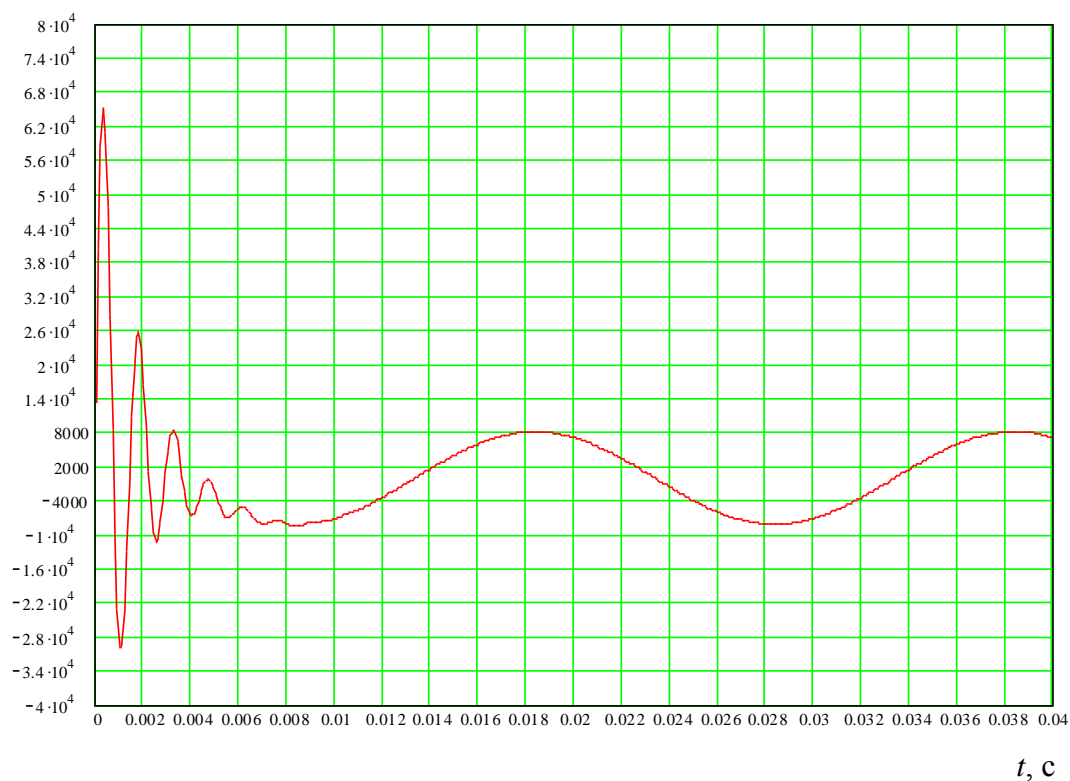
 $u_{\text{В}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.6 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 7

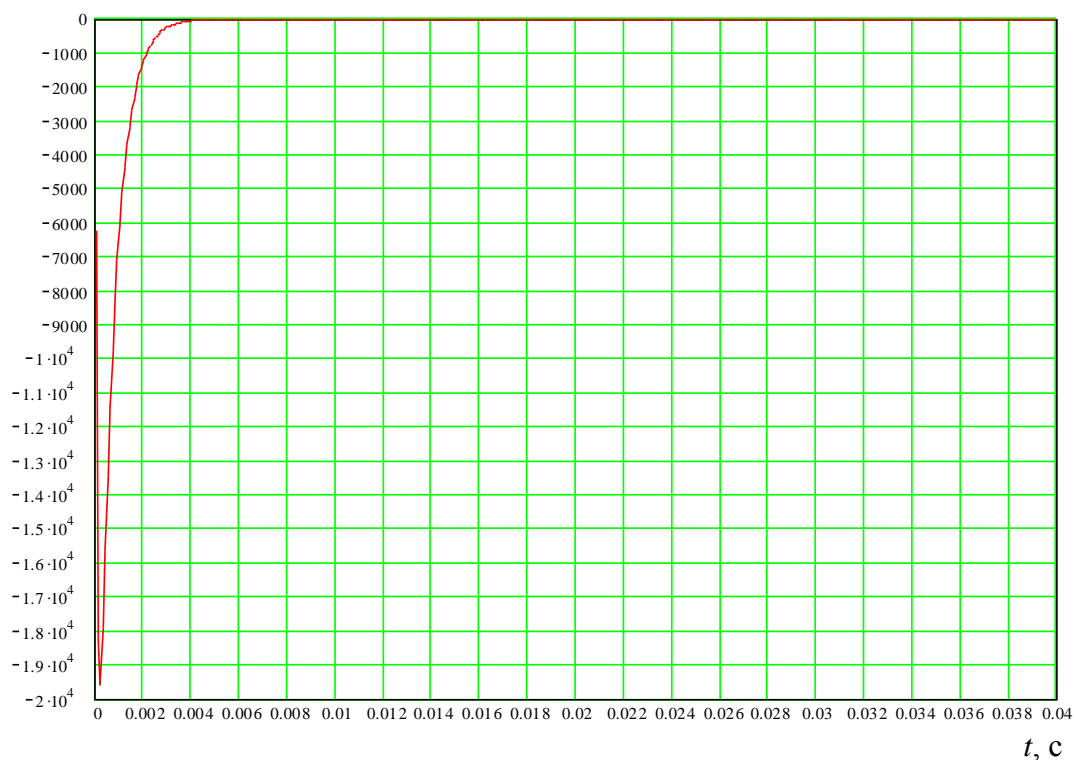
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.7 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

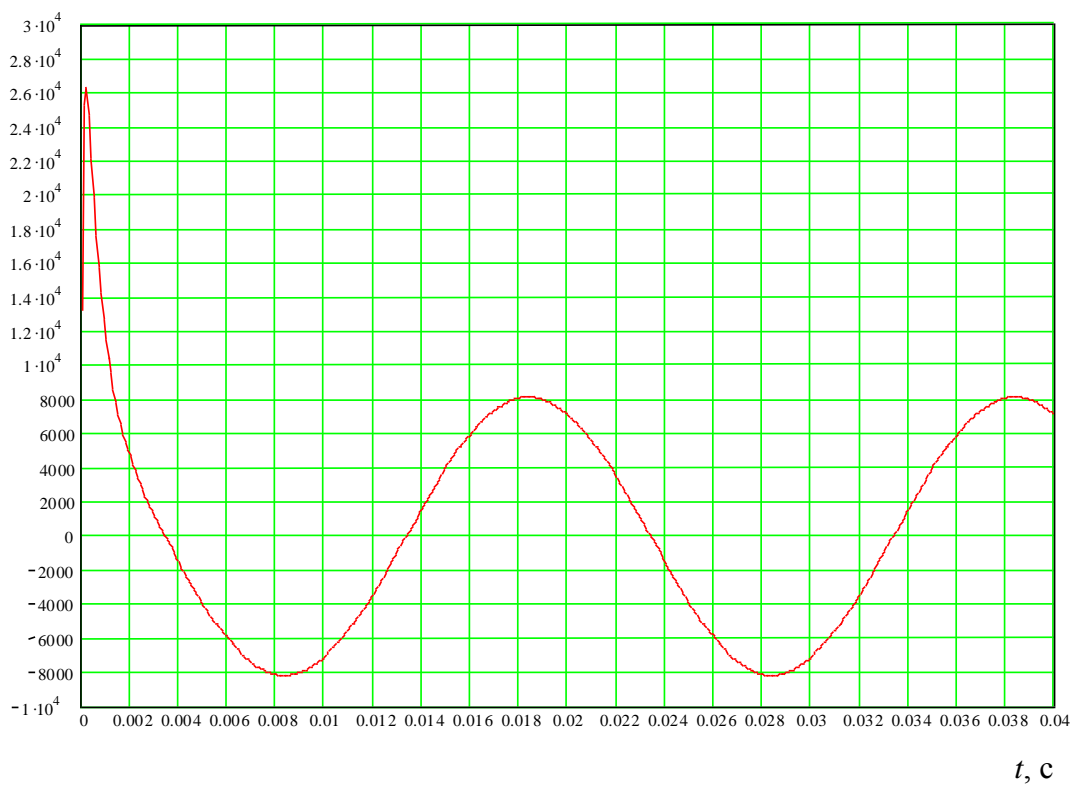
 $u_B(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.8 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 7



Рисунок П7.9 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

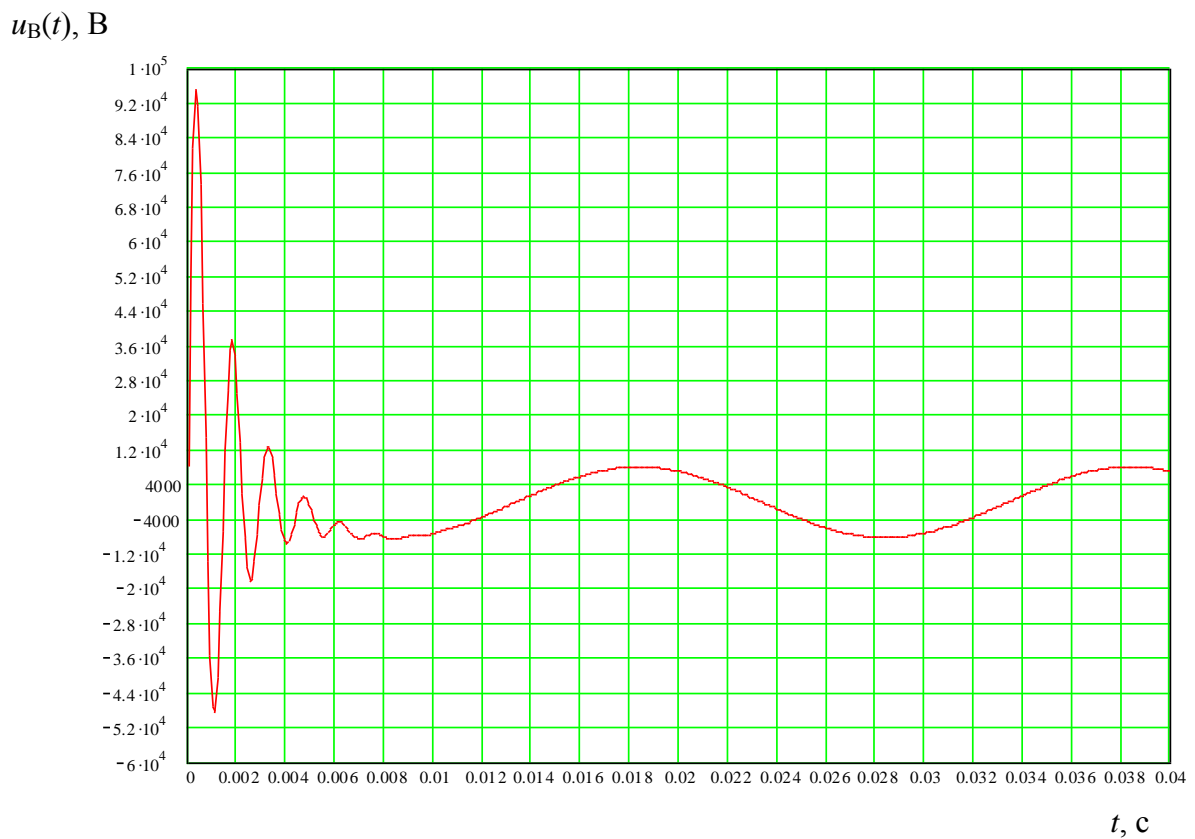


Рисунок П7.10 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 7

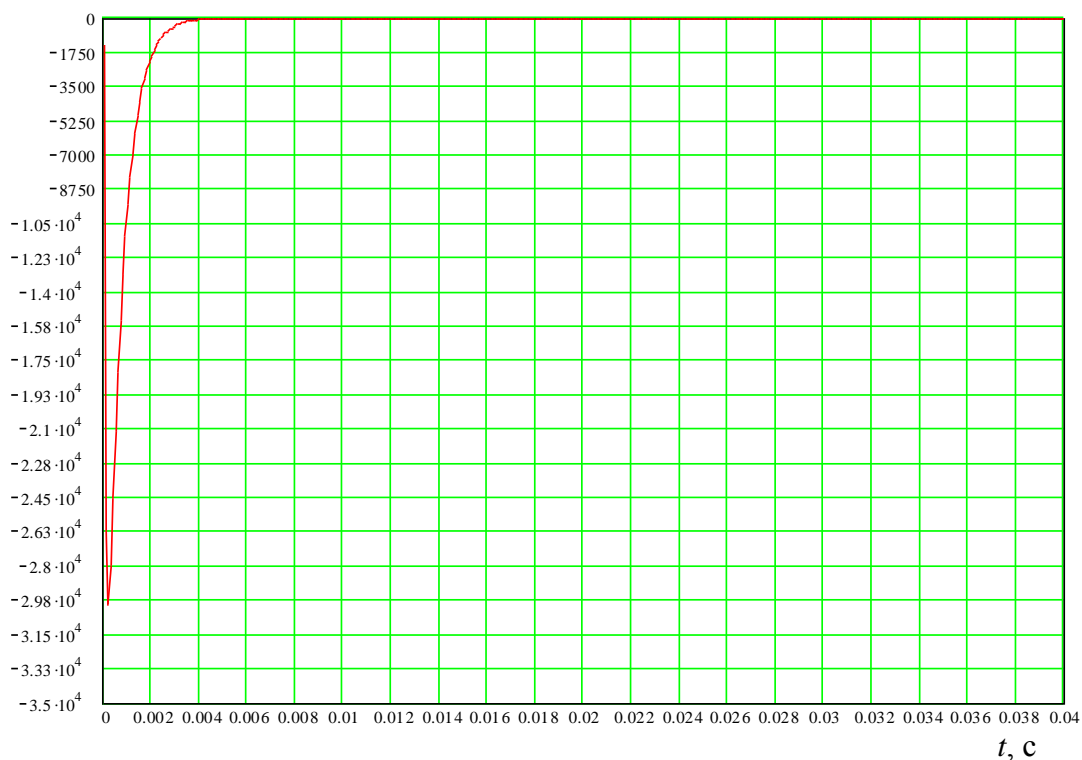
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.11 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

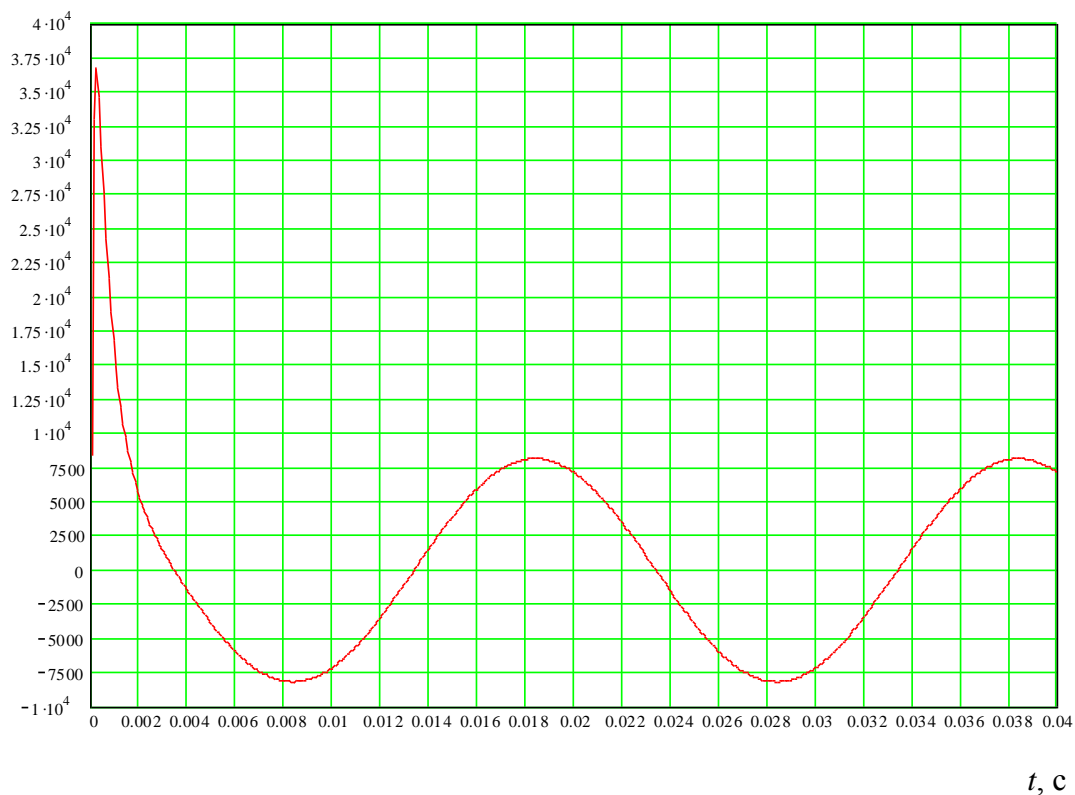
 $u_B(t), \text{ В}$ 

Рисунок П7.12 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

**ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с компенсированной нейтралью при использовании РС – ограничителей**

Таблица П8.1 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_{л}, А$	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и.},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_{А} =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_{В} = u_{В.}$ $маx}/U_{л}$	$K_{С} =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	1,5	476	25099	32528	32557	32559	2,51	3,25	3,26	3,26
2	10000	5773,5	33,5	1,5	555	28188	35884	36134	36104	2,82	3,59	3,61	3,61
3	10000	5773,5	40	1,5	606	30801	38632	38551	38809	3,08	3,86	3,86	3,88
4	10000	5773,5	46,5	1,5	666	33196	40819	41247	40960	3,32	4,08	4,12	4,10
5	10000	5773,5	52	1,5	689	35127	42934	43061	42748	3,51	4,29	4,31	4,27

Таблица П8.2 – Максимальные перенапряжения на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi=10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi=60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_{л}, А$	$C_{с.ш.},$ мкФ	$f_{к.и.},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t),$ В	$u_{Амаx}(t),$ В	$u_{Вмаx}(t),$ В	$u_{Смаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_{А} =$ $u_{Амаx}/U_{л}$	$K_{В} = u_{В.}$ $маx}/U_{л}$	$K_{С} =$ $u_{Смаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	1,5	476	17520	25262	25262	25248	1,75	2,53	2,53	2,52
2	10000	5773,5	33,5	1,5	555	19433	27412	27439	27290	1,94	2,74	2,74	2,73
3	10000	5773,5	40	1,5	606	21031	28817	29004	29094	2,10	2,88	2,90	2,91
4	10000	5773,5	46,5	1,5	645	22568	30393	30582	30200	2,26	3,04	3,06	3,02
5	10000	5773,5	52	1,5	684	23714	31744	31699	31549	2,37	3,17	3,17	3,15

**ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Графики переходных процессов, возникающих на за-  
жмах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с компенсированной  
нейтралью при использовании РС – ограничителя**

$u_{N\text{св}}(t)$ , В

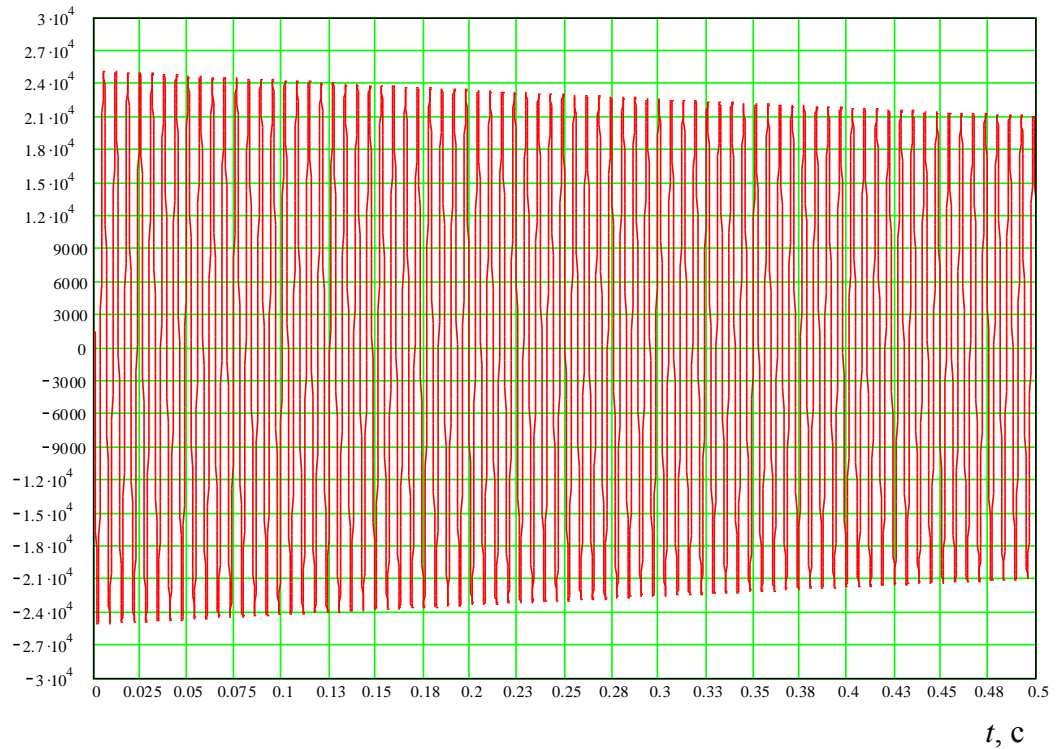


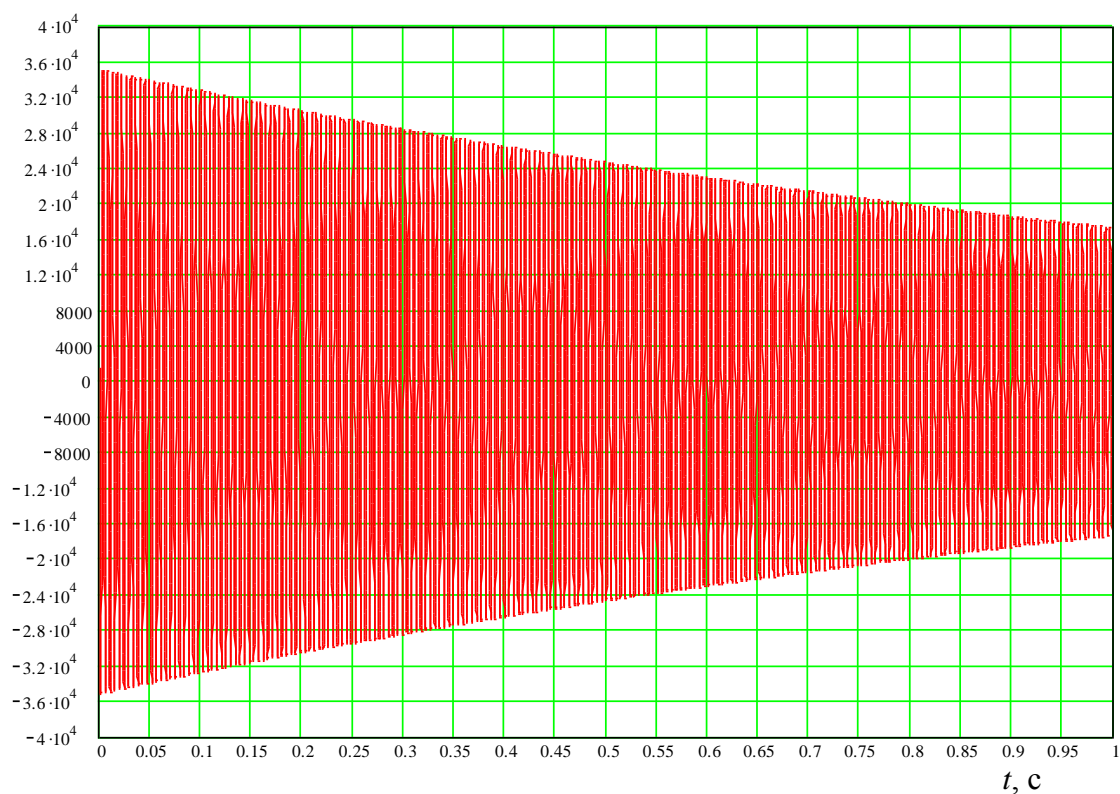
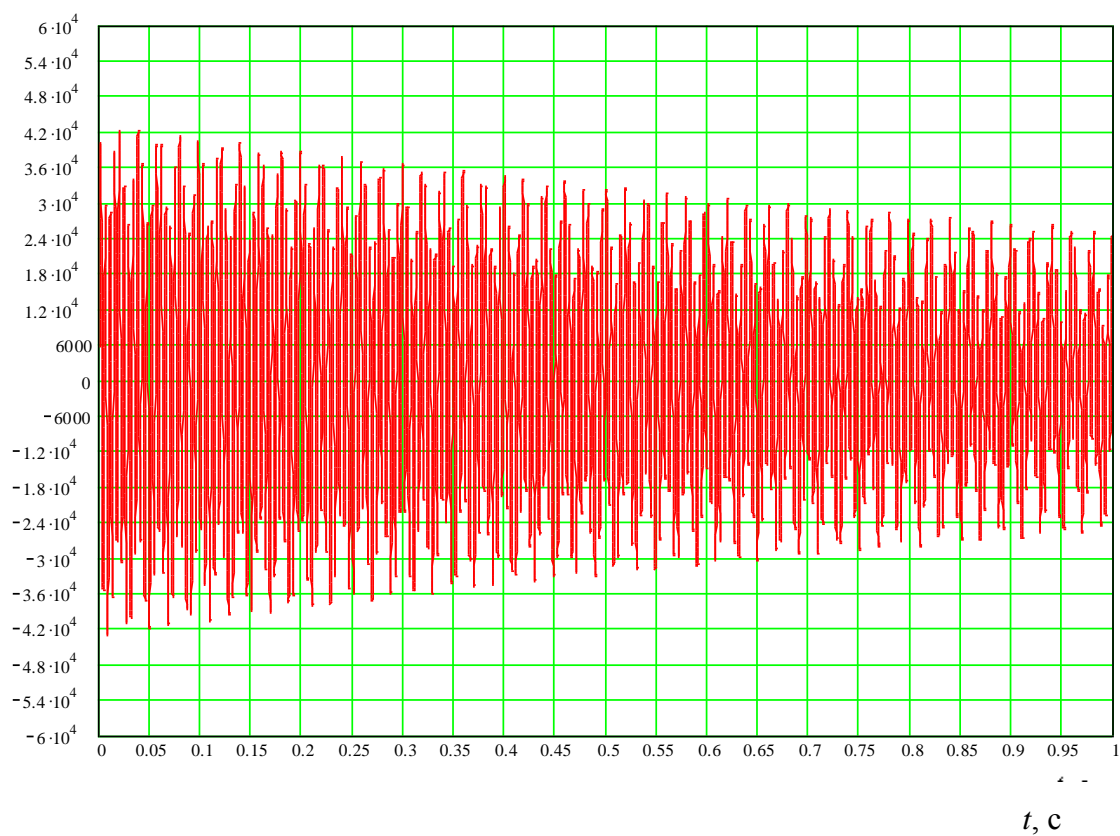
Рисунок П9.1 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5$  А)

$u_{\text{В}}(t)$ , В

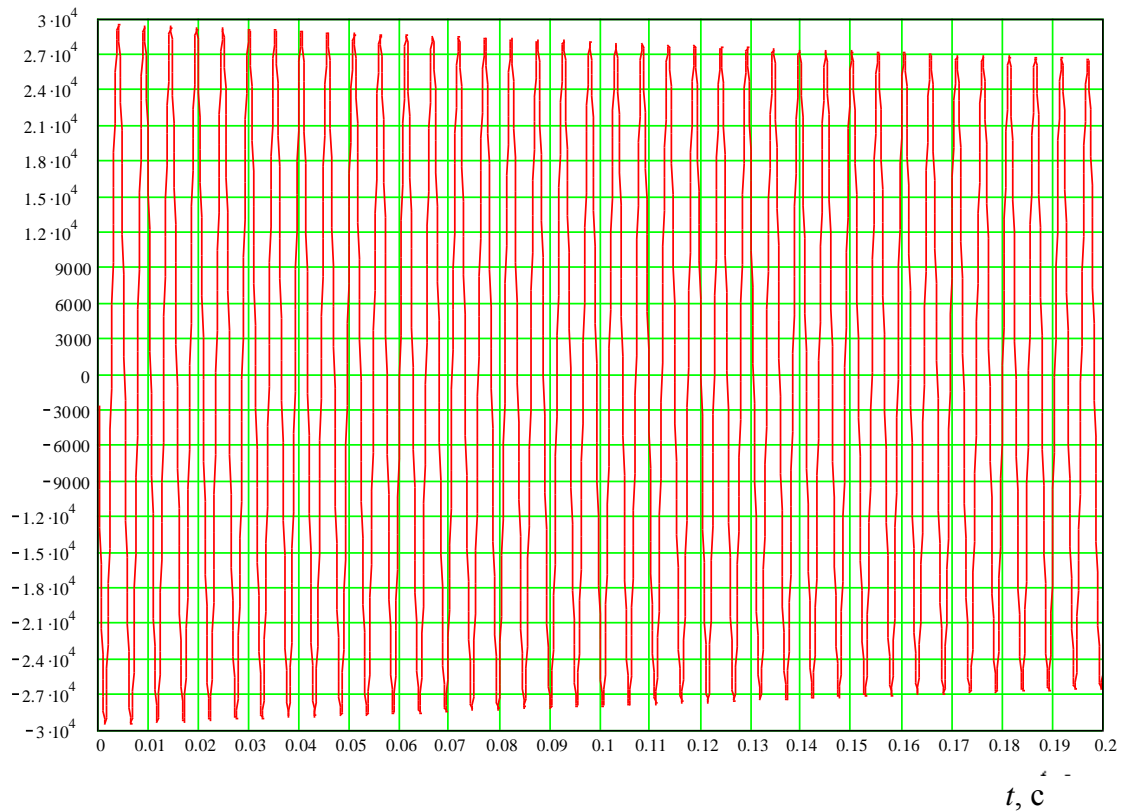
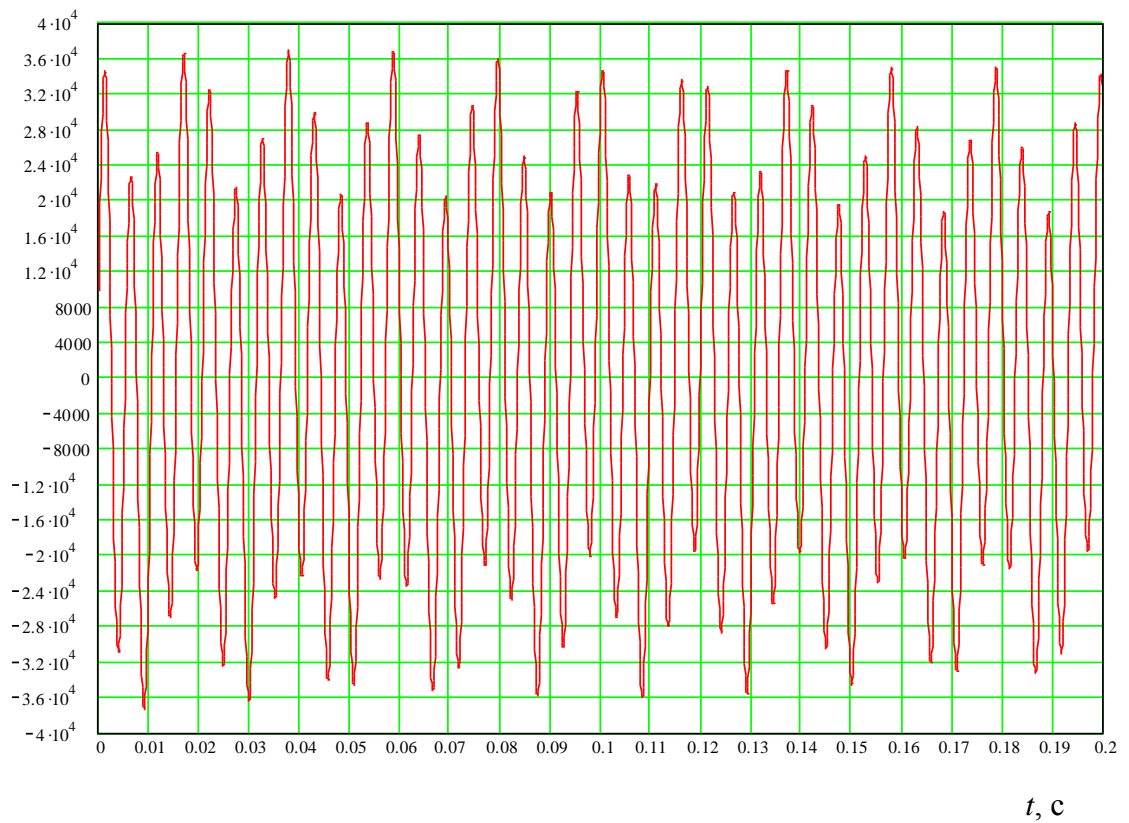


Рисунок П9.2 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5$ А)

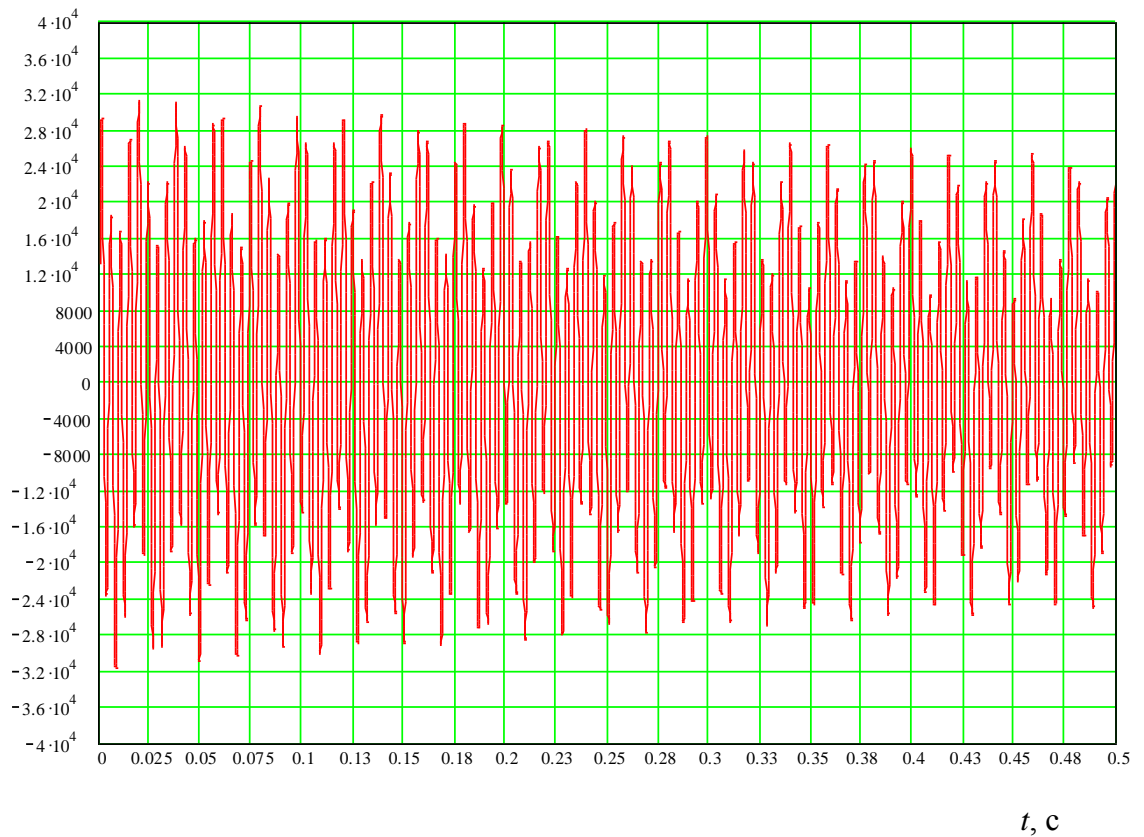
## продолжение приложения 9

 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ Рисунок П9.3 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ ) $u_{\text{В}}(t), \text{ В}$ Рисунок П9.4 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 9

 $u_{N\text{CB}}(t), \text{В}$ Рисунок П9.5 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 40 \text{ А}$ ) $u_{\text{В}}(t), \text{В}$ Рисунок П9.6 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 30^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 9

 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ Рисунок П9.7 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ ) $u_{\text{В}}(t), \text{ В}$ Рисунок П9.8 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

**ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Результаты математического моделирования переходных процессов, возникающих на секциях шин и на зажимах дугогасящего реактора в сети с нейтралью, частично заземленной через резистор, при использовании RC – ограничителя**

Таблица П10.1 Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 0^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{\phi}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.маx}(t)$ , В	$u_{Aмаx}(t)$ , В	$u_{Bмаx}(t),$ В	$u_{Cмаx}(t),$ В	$K =$ $u_{N.св.маx}/U_{л}$	$K_A =$ $u_{Aмаx}/U_{л}$	$K_B =$ $u_{Bмаx}/U_{л}$	$K_C =$ $u_{Cмаx}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	1,5	5000	476	22666	26696	27021	22919	2,27	2,67	2,70	2,29
3	10000	5773,5	40			606	28343	31601	33222	30020	2,83	3,16	3,32	3,00
5	10000	5773,5	52			689	32583	35513	37854	34932	3,26	3,55	3,79	3,49
1	10000	5773,5	26,5	1,5	2500	476	20613	24511	25108	18148	2,06	2,45	2,51	1,81
3	10000	5773,5	40			606	26166	29407	31214	24761	2,62	2,94	3,12	2,48
5	10000	5773,5	52			689	73989	74757	80644	66565	7,40	7,48	8,06	6,66
1	10000	5773,5	26,5	1,5	1000	476	16132	19735	20949	10113	1,61	1,97	2,09	1,01
3	10000	5773,5	40			606	21226	24320	26491	14981	2,12	2,43	2,65	1,50
5	10000	5773,5	52			689	47384	48152	54040	39960	4,74	4,82	5,40	4,00
1	10000	5773,5	26,5	1,5	500	476	11707	14974	16926	8488	1,17	1,50	1,69	0,85
3	10000	5773,5	40			606	16028	18719	21514	8488	1,60	1,87	2,15	0,85
5	10000	5773,5	52			689	30017	30530	36818	22704	3,00	3,05	3,68	2,27
1	10000	5773,5	26,5	1,5	200	-	6262	10350	12145	8488	0,63	1,04	1,21	0,85
3	10000	5773,5	40			-	9009	11281	14986	8488	0,90	1,13	1,50	0,85
5	10000	5773,5	52			-	13563	13877	20503	8488	1,36	1,39	2,05	0,85

продолжение приложения 10

Таблица П10.2 – Максимальные значения перенапряжений на зажимах ДГР и секциях шин при угле среза  $\psi = 10^0$  и при угле сдвига фаз  $\varphi = 60^0$

№ от- пайки	$U_{л}, В$	$U_{ф}, В$	$I_L,$ А	$C_{с.ш.},$ мкФ	$R_p,$ ОМ	$f_{ки},$ Гц	$u_{N.св.мах}(t),$ , В	$u_{Амах}(t),$ , В	$u_{Вмах}(t),$ В	$u_{Смах}(t),$ В	$K =$	$K_A =$	$K_B =$	$K_C =$
											$u_{N.св.мах}/U_{л}$	$u_{Амах}/U_{л}$	$u_{Вмах}/U_{л}$	$u_{Смах}/U_{л}$
1	10000	5773,5	26,5	1,5	5000	476	15836	18932	21134	18332	1,58	1,89	2,11	1,83
3	10000	5773,5	40			562	19378	22016	24876	22964	1,94	2,20	2,49	2,30
5	10000	5773,5	52			689	22073	24439	27725	26159	2,21	2,44	2,77	2,62
1	10000	5773,5	26,5	1,5	2500	435	14456	17384	19872	15063	1,45	1,74	1,99	1,51
3	10000	5773,5	40			550	17913	20446	23539	19411	1,79	2,04	2,35	1,94
5	10000	5773,5	52			671	20593	22870	26317	22415	2,06	2,29	2,63	2,24
1	10000	5773,5	26,5	1,5	1000	421	11406	13966	17183	9584	1,14	1,40	1,72	0,96
3	10000	5773,5	40			533	14587	16868	20421	12787	1,46	1,69	2,04	1,28
5	10000	5773,5	52			656	17108	19186	22997	15127	1,71	1,92	2,30	1,51
1	10000	5773,5	26,5	1,5	500	401	8441	10525	14708	8168	0,84	1,05	1,47	0,82
3	10000	5773,5	40			521	11091	13014	17225	8177	1,11	1,30	1,72	0,82
5	10000	5773,5	52			632	13244	15067	19394	9598	1,32	1,51	1,94	0,96
1	10000	5773,5	26,5	1,5	200	-	6254	9300	13325	8290	0,63	0,93	1,33	0,83
3	10000	5773,5	40			-	6598	8959	13441	8186	0,66	0,90	1,34	0,82
5	10000	5773,5	52			-	7874	9111	14489	8167	0,79	0,91	1,45	0,82

**ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Графики переходных процессов, возникающих на за-  
жмах дугогасящего реактора и на секциях шин сети с нейтралью, частич-  
но заземленной через резистор, при использовании РС – ограничителя**

$u_{N\text{св}}(t)$ , В

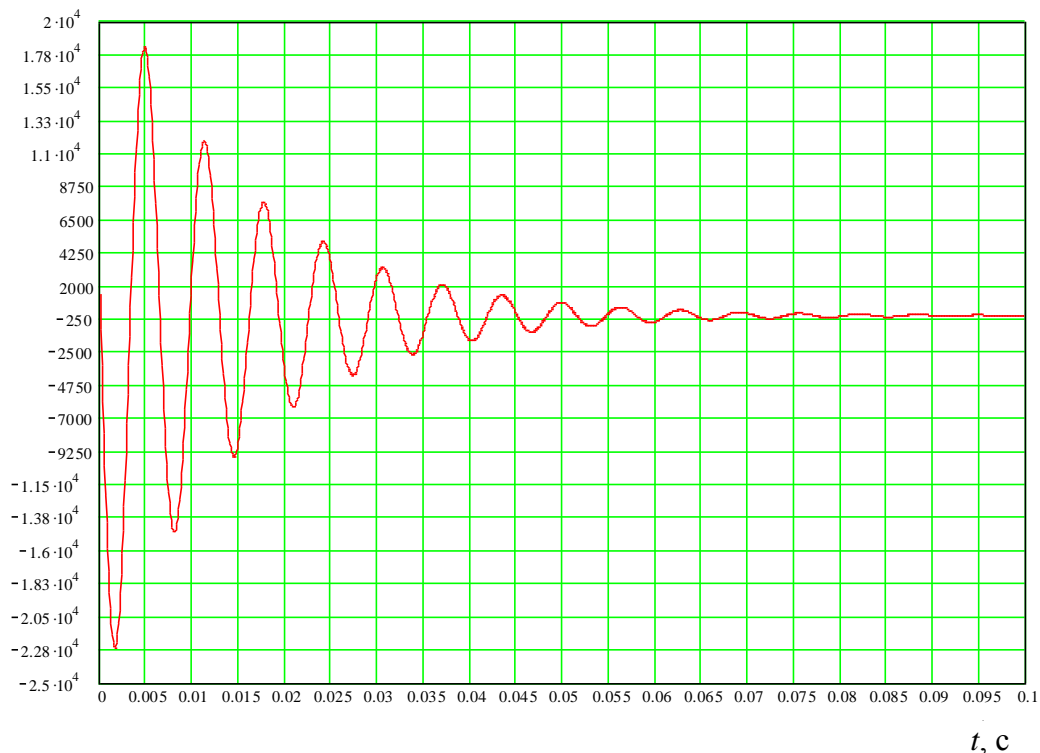


Рисунок П11.1 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5$  А)

$u_{\text{В}}(t)$ , В

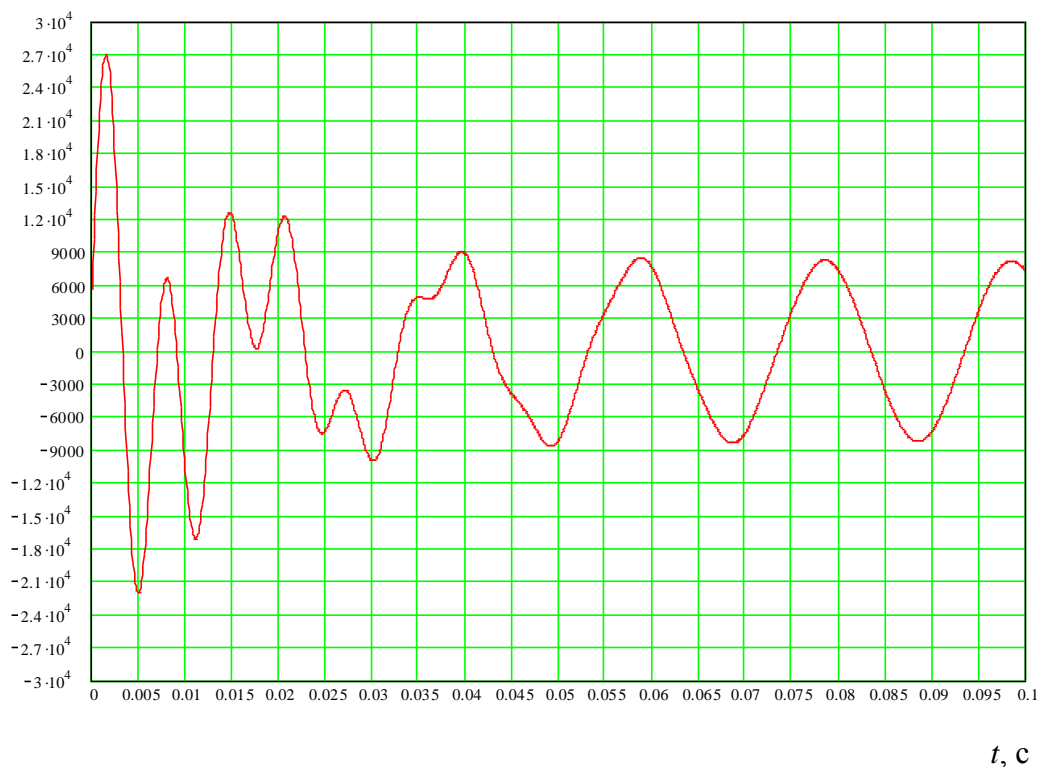


Рисунок П11.2 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 26,5$  А)

## продолжение приложения 11

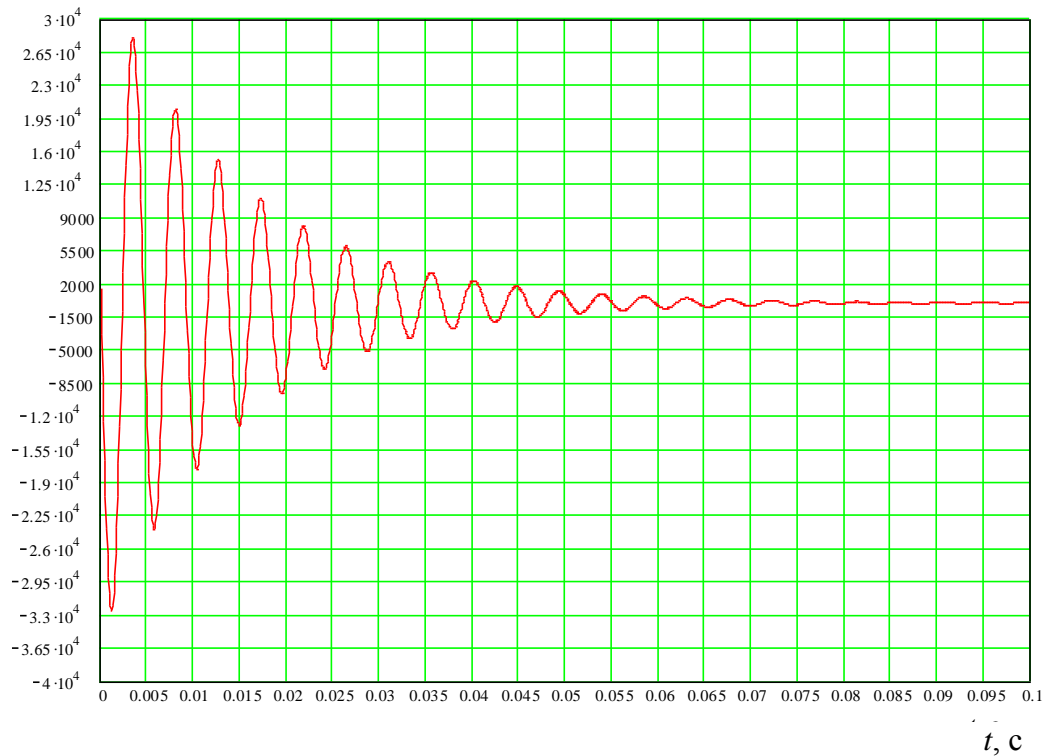
 $u_{N\text{CB}}(t), \text{В}$ 

Рисунок П11.3 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

 $u_{\text{В}}(t), \text{В}$ 

Рисунок П11.4 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 11

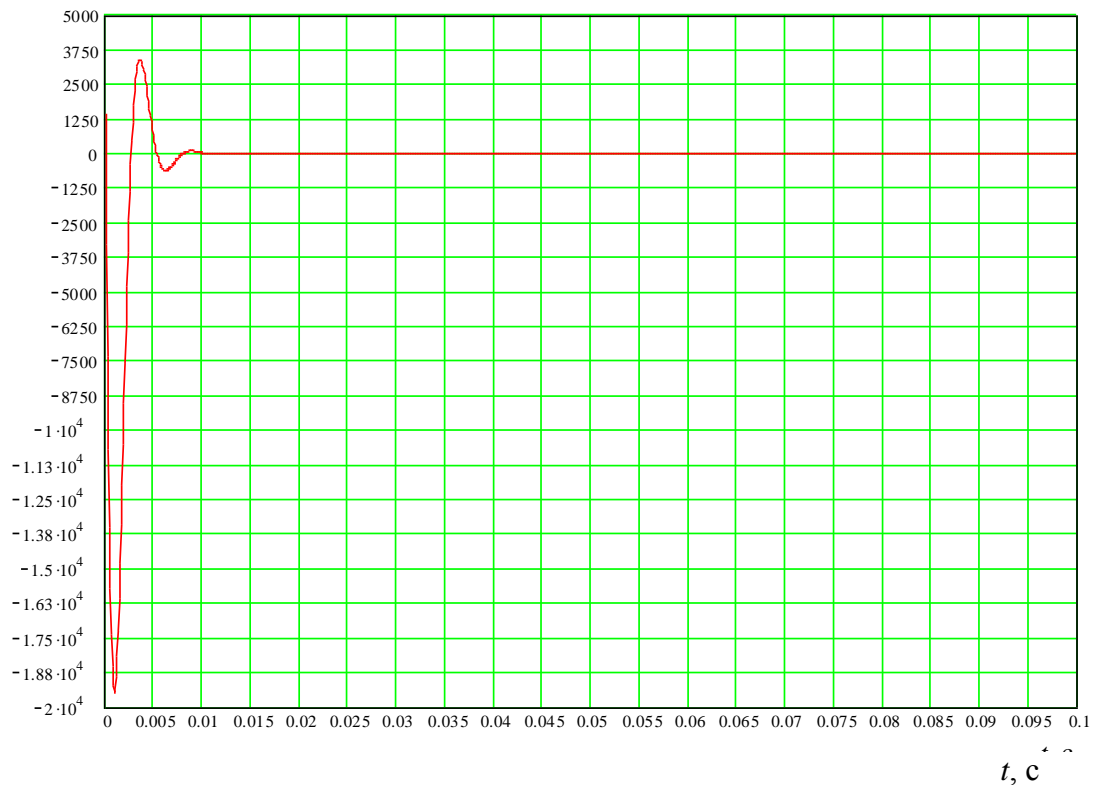
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.5 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

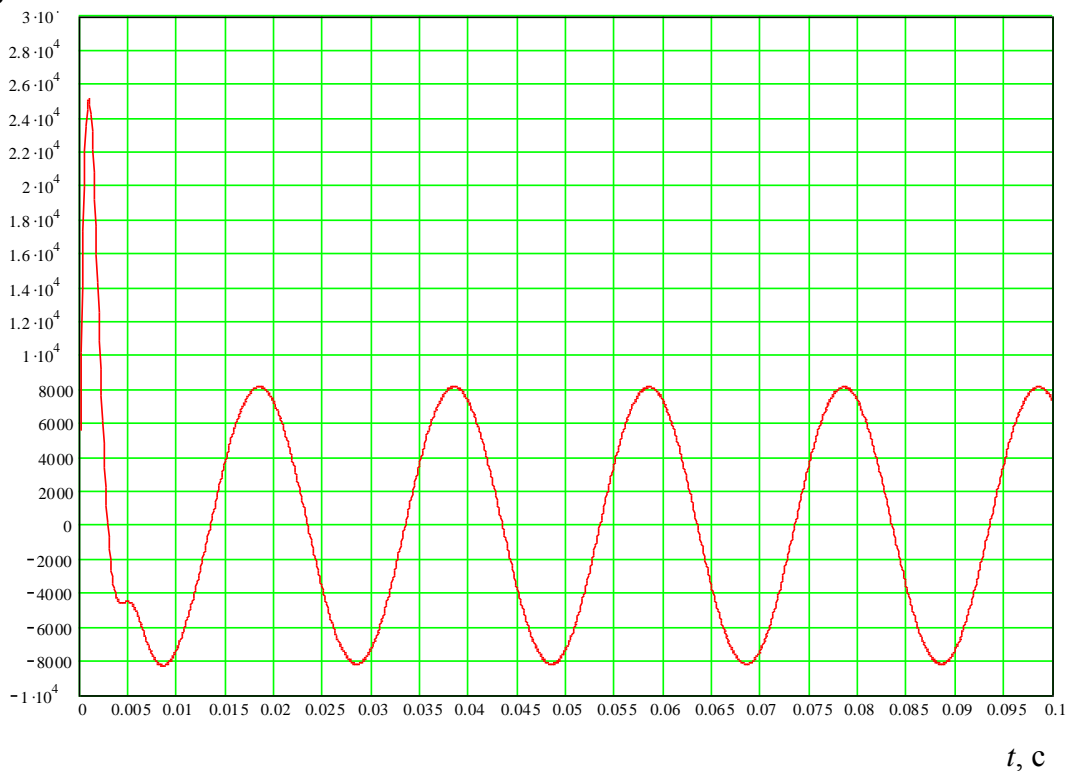
 $u_B(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.6 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 0^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 11

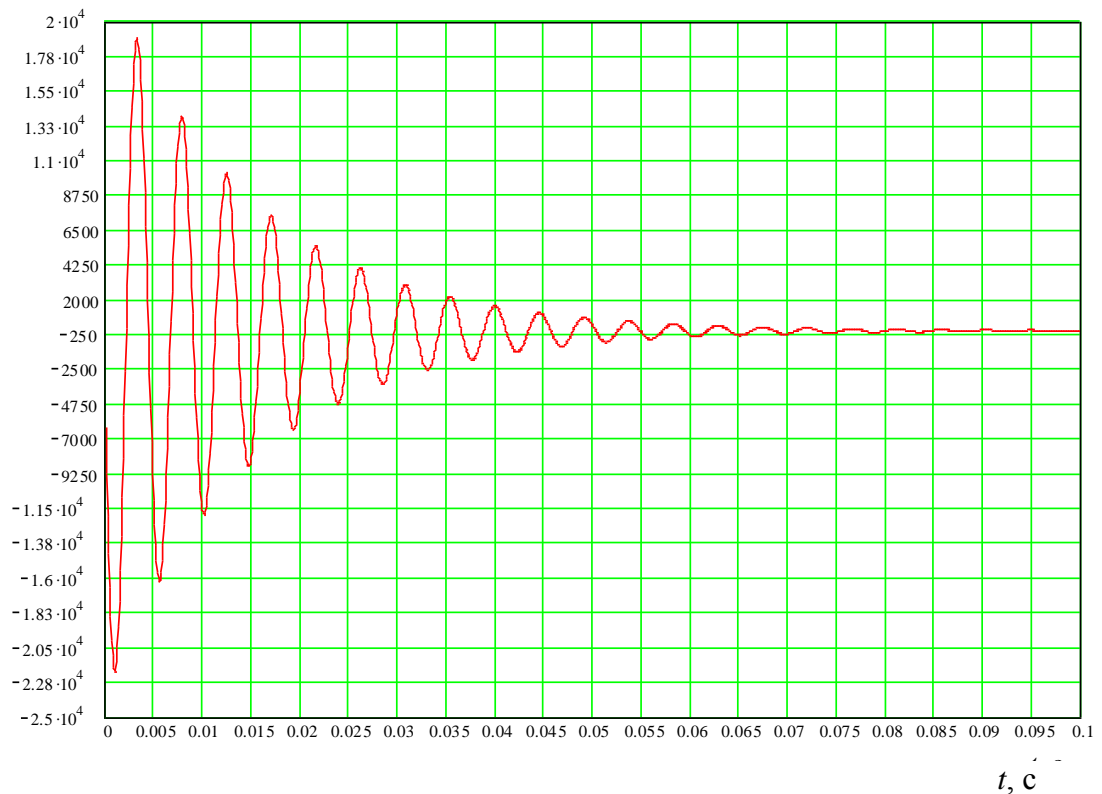
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.7 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

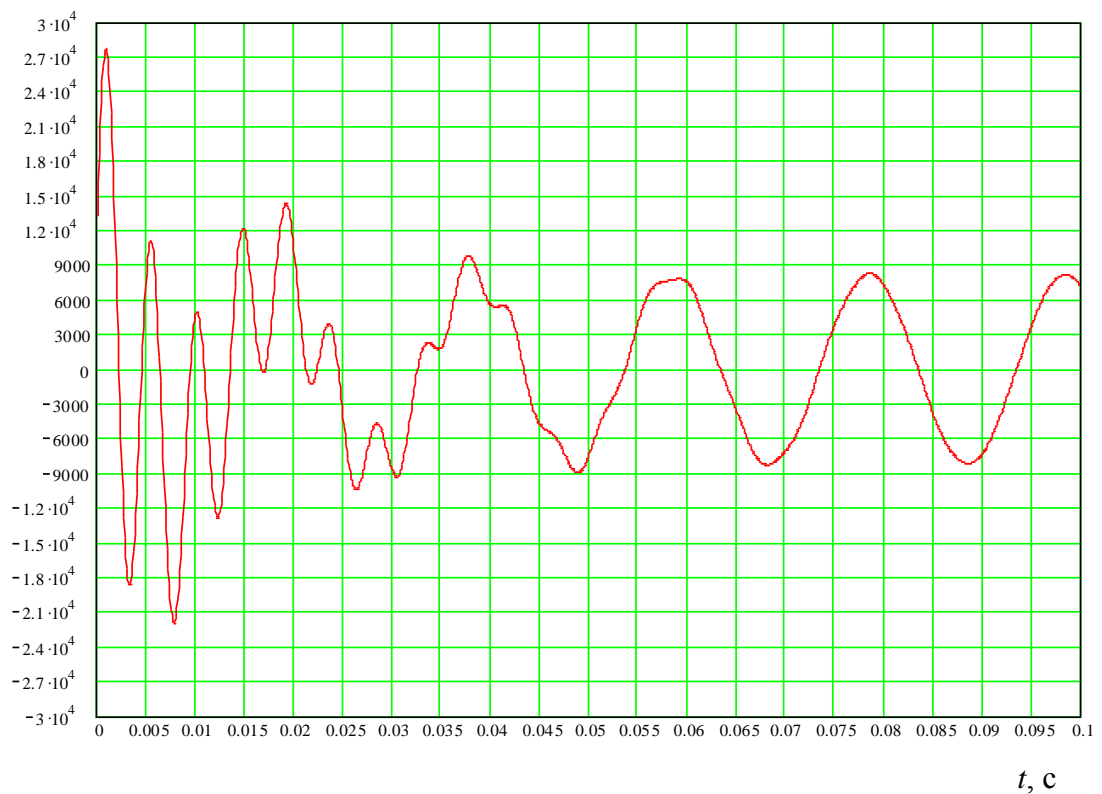
 $u_B(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.8 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 5000 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

## продолжение приложения 11

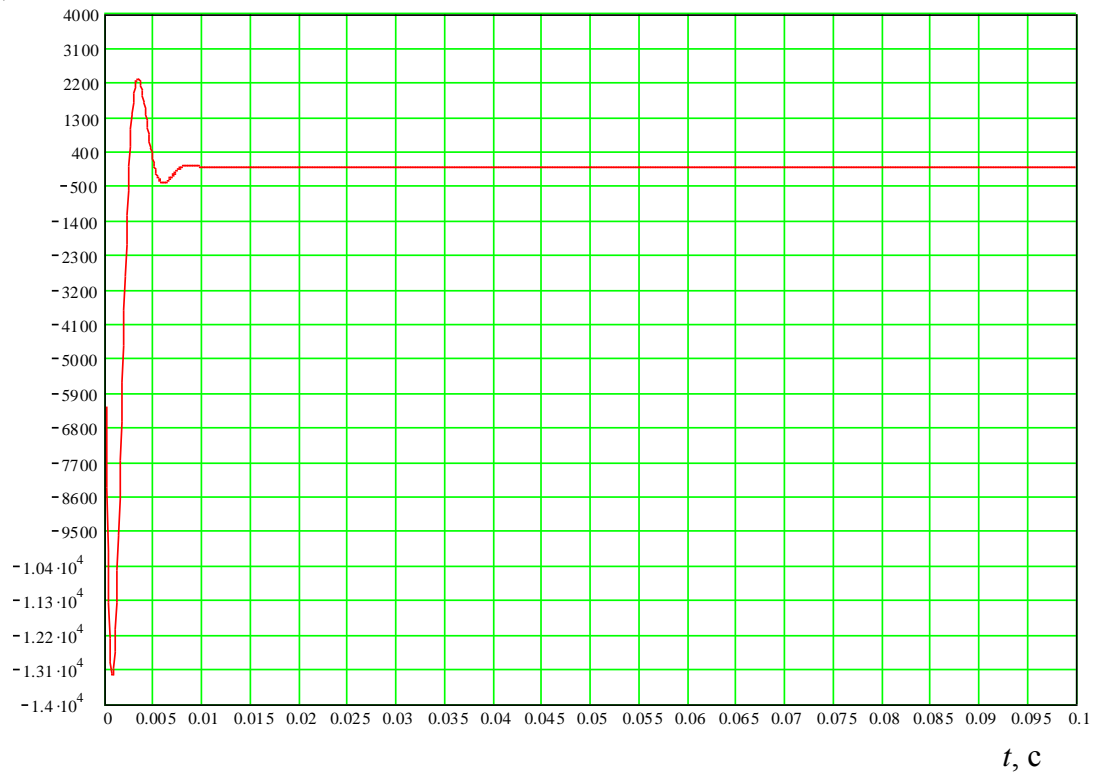
 $u_{N\text{ CB}}(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.9 – Перенапряжения на дугогасящем реакторе ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

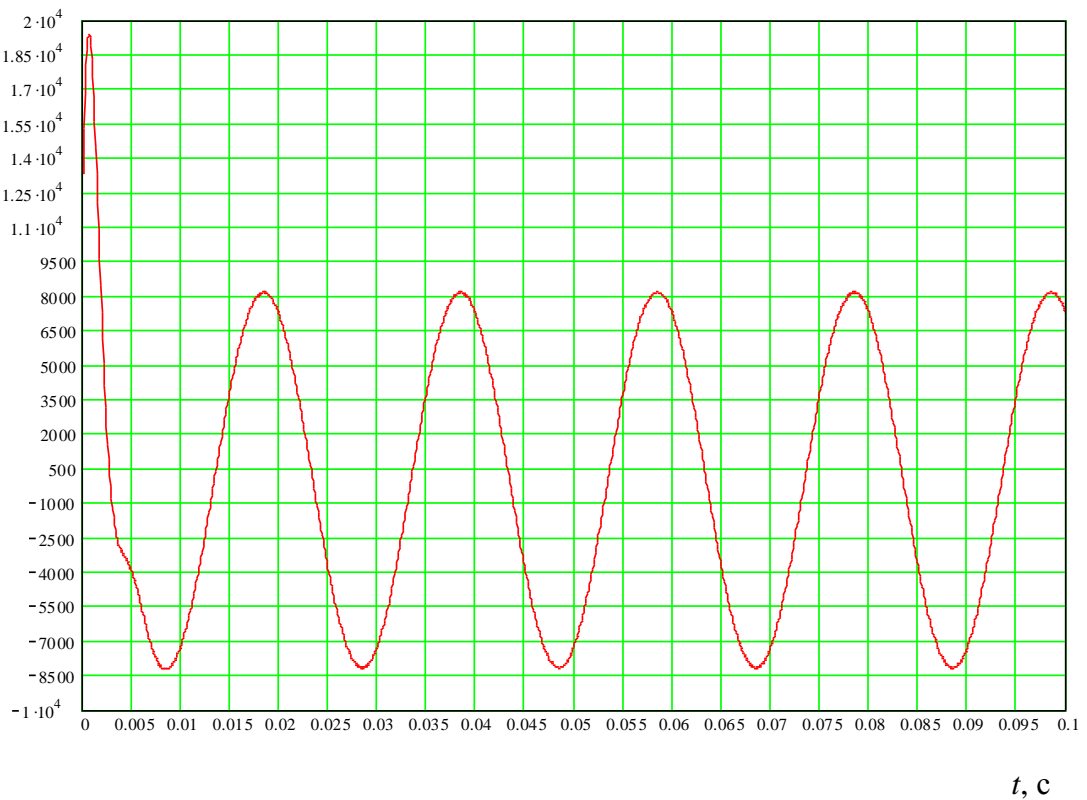
 $u_B(t), \text{ В}$ 

Рисунок П11.10 – Перенапряжения на фазе В секции шин ( $\psi = 10^0$ ,  $\varphi = 60^0$ ,  $R_p = 500 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ДГР}} = 52 \text{ А}$ )

**ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Фотографии RC – ограничителей, выкатной тележки с RC – ограничителями, ячейки распределительного устройства с RC – ограничителями, подключенными к секциям шин, устройства добавочного активного тока (резистор сопротивлением 500 Ом)**



Рисунок П12.1 – Ячейка РУ с RC–ограничителем



Рисунок П12.2 – Выкатная тележка с RC–ограничителем



Рисунок П12.3 – Ячейка РУ с RC –ограничителем



Рисунок П12.4 – Выкатная тележка с RC–ограничителем

**продолжение приложения 12**

Рисунок П12.5 – Стандартный RC – ограничитель



Рисунок П12.6 – RC – ограничитель для УЭН



Рисунок П12.7 – Стандартный и RC – ограничитель для УЭН

**продолжение приложения 12**

Рисунок П12.8 – Устройство добавочного активного тока (резистор сопротивлением 500 Ом)



Рисунок П12.9 – Устройство добавочного активного тока (резистор сопротивлением 500 Ом)