МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет заочный
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент,
главный инженер ООО «УПЭ»
_____ Тарасов В.В
«___» _____2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ,
д.т.н., проф.
_____Кирпичникова И.М.
«___» _____ 2019 г.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ УСТАНОВКИ ОПН В ЯЧЕЙКАХ РУ 6-10 кВ С ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.04.02.68.2018.270.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
доцент, к.т.н.

_____ В.В.Пястолов
«___»_____ 2019 г.

Автор ВКР
студент группы ПЗ-385

_____ А.С. Монастырева
«___»_____ 2019 г.

Нормоконтролер
старший преподаватель

_____ Н.Ю. Аверина
«___»_____ 2019 г.

Челябинск 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет заочный
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа
«Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ,
д.т.н., проф.

_____ И.М. Кирпичникова
«__» _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу студента
Монастыревой Альвины Сергеевны
Группа – ПЗ-385

1 Тема работы «Обоснование необходимости установки ОПН в ячейках РУ 6-10 кВ с вакуумными выключателями»
Утверждена приказом ректора ЮУрГУ от 25 декабря 2018 г., № 2361
Срок сдачи студентом законченной работы – 30.12.2018 г.
2 Исходные данные к работе: результаты проведения научно-исследовательской работы
3 Перечень вопросов, подлежащих разработке:
1 Введение
2 Постановка задачи: понятие перенапряжения в СЭС.
3 Методика определения величины коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора.
4 Уровни перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов.
5 Заключение

4 Дата выдачи задания: 23 сентября 2016 г.

Научный руководитель _____ / В.В. Пястолов /

Задание принял к исполнению _____ / А.С. Монастырева /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Введение	09.10.2016	
2	Постановка задачи: перенапряжения в СЭС.	12.06.2017	
3	Методика определения величины коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора.	22.09.2017	
4	Уровни перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов.	15.06.2018	
5	Заключение	10.10.2018	
6	Библиографический список	16.11.2018	
7	Оформление пояснительной записки	20.12.2018	
8	Завершающий этап оформления работы, прохождение нормоконтроля	30.12.2018	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ _____ / И.М. Кирпичникова /

Научный руководитель работы _____ / В.В. Пястолов /

Магистрант _____ /А.С. Монастырева /

АННОТАЦИЯ

Монастырева А. С. Обоснование необходимости установки ОПН в ячейках РУ 6-10 кВ с вакуумными выключателями – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, Э, 2019. – 75 с., 55 рис., 1 табл., библиогр. список – 23 наим.

Ключевые слова: ненагруженный трансформатор, вакуумный выключатель, срез тока, коммутационные перенапряжения, ограничитель перенапряжения нелинейный.

Объект исследования – силовой трансформатор и питающая его кабельная линия напряжением 6-10 кВ.

Цель работы – обоснование целесообразности установки ОПН в закрытых распределительных устройствах с вакуумными выключателями.

Новизна ВКР заключается в комплексном исследовании, затрагивающем изучении процессов коммутации, анализе эффективности и определении области применения нелинейных ограничителей перенапряжения в электрических сетях 6-10 кВ систем электроснабжения.

Результаты исследования – в исследовании были рассмотрены коммутационные перенапряжения при отключении ненагруженного трансформатора, получены зависимости кратностей перенапряжений в зависимости от мощности установленных трансформаторов и длин питающих их линий, а также обоснована необходимость установки ОПН в сети 6-10 кВ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ: ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 8
1.1 Перенапряжения в электрических сетях. Определения, классификация 8
1.2 Случаи аварийного отключения ненагруженного трансформатора 10
1.3 Анализ необходимости установки аппаратов защиты на отходящих присоединениях при их коммутациях вакуумными выключателями 12
Выводы по разделу 1 17
2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА 18
2.1 Обоснование схемы замещения 18
Прежде чем рассмотреть энергетические соотношения, описывающие характеристики коммутационных перенапряжений, следует рассмотреть схему, которая включает в себя источник питания, трансформатор и питающую кабельную линию (рисунок 2.1). 18
2.2 Энергетические соотношения, характеризующие процессы в схеме замещения 23
2.4 Оценка уровня перенапряжения по упрощенной схеме замещения 26
Вывод по разделу 2: 30
3 УРОВНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА 31
3.1 Описание расчетов для параметров схемы, влияющих на уровень перенапряжений ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
3.2 Расчётная часть ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
3.4 Выводы к главе 3 ..... *43*

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Анализ данных по числу аварийных отключений ненагруженного трансформатора в сетях напряжением 6-10 кВ с изолированной, компенсированной и резистивно заземленной нейтралями показывает, что коммутационные перенапряжения при отключении ненагруженного трансформатора являются достаточно распространенным процессом, приводящим к выводу оборудования из строя, а именно пробой изоляции трансформаторов собственных нужд, измерительных трансформаторов напряжения, а также к пробою опорных изоляторов и перекрытия вводов выключателей.

Одним из факторов, приводящим к возникновению внутреннего перенапряжения являются коммутационные перенапряжения, поскольку имеют значительные по величине амплитуды возникающих напряжений, высокую частоту собственных колебаний и значительную первоначальную скорость нарастания амплитуды импульса.

Процессы управляемой коммутации были рассмотрены в работах Г.В.Буткевича, К.П.Кадомской, Л.Г.Клепарской, А.И.Лурье, Д.Ф.Алферова, Г.С.Белкина, М.В.Чалого, О.И.Червинского [1-7] и других. Но несмотря на проведенные исследования и наличие аппаратов, реализующих функцию управляемого включения или отключения, сегодня процессы управляемой коммутации вакуумных выключателей в электрических сетях 6-10 кВ недостаточно изучены.

Решение данной задачи позволит повысить эффективность систем электроснабжения в сетях 6-10 кВ, что приведет к снижению времени простоя оборудования, связанного с перерывами в электроснабжении, тем самым, к определенному экономическому эффекту.

Исходя из выше сказанного, обоснование, разработка и внедрение ОПН является актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования – обоснование целесообразности установки ОПН в закрытых распределительных устройствах с вакуумными выключателями.

Задачи исследования: рассмотрение случаев отключения ненагруженных трансформаторов, а также влияние факторов на процесс перенапряжения, проведение расчетов для разных мощностей трансформаторов и длин линий, возникающих в сетях 6-10 кВ, оснащенных вакуумными выключателями с целью внесения необходимых дополнений и проверки их адекватности.

Объект исследования – силовой трансформатор и питающая его кабельная линия напряжением 6-10 кВ.

Предмет исследования – коммутационные перенапряжения, возникающие в сетях 6-10 кВ, оснащенные вакуумными выключателями при отключении ненагруженных трансформаторов с целью внесения необходимых рекомендаций по установке ОПН.

Новизна ВКР заключается в разработке комплексного подхода к изучению коммутационных перенапряжений для выбора установки соответствующего оборудования для их ограничения в распределительных устройствах 6-10 кВ.

Методы исследования: методологической и теоретической основой работы послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых в области исследования и ограничения перенапряжений, численный расчет кратности перенапряжения.

Практическая значимость: работа может представлять интерес для крупных промышленных предприятий, заинтересованных в усовершенствовании и упрощении рабочих процессов в системах электроснабжения 6-10 кВ.

Апробация работы. Участие при постановке целей и задач в работе, разработка модели коммутации ненагруженных трансформаторов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ: ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Перенапряжения в электрических сетях. Определения, классификация

Перенапряжением называют всякое превышение напряжением амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Длительность перенапряжения может составлять от единиц микросекунд до нескольких часов. Воздействие перенапряжения на изоляцию может привести к ее пробою.

К основным характеристикам перенапряжения относят следующие:

- максимальное значение;
- кратность перенапряжения, равная отношению максимального значения перенапряжения к амплитуде наибольшего рабочего напряжения;
- время нарастания перенапряжения;
- длительность перенапряжения;
- число импульсов в перенапряжении;
- широта охвата сети;
- повторяемость перенапряжения.

Перечисленные характеристики, как правило, являются случайными величинами, поэтому в большей степени внимание отводят мощности силового трансформатора, а также длине питающей линии.

Так, наибольшее рабочее напряжение (линейное) определяется соотношением

$$U_{раб.наиб.} = k_p U_{ном}, \qquad (1.1)$$

где значение коэффициента k_p принимают равным значениям, приведенным в таблице 1.1 [8].

Таблица 1.1 – Кратность перенапряжения

Класс напряжения $U_{ном}$, кВ	3-20	35-220	330	500-1150
k_p	1,2	1,15	1,10	1,05

ГОСТ 32144-13 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [9] дает дополнительные определения для перенапряжения.

Импульс напряжения - резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд.

Временное перенапряжение - повышение напряжения в точке электрической сети выше 1,1Uном продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях, что позволяет выбрать характеристики для предотвращения такого рода перенапряжений. Например, зависимость действующего значения напряжения промышленной частоты от

времени его приложения, как одна из составляющих для выбора ограничителя перенапряжения нелинейного.

Коэффициент временного перенапряжения - величина, равная отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети.

Для отклонения напряжения ГОСТ 32144-13 определяет нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии соответственно ± 5 и ± 10% от номинального напряжения электрической сети.

По месту приложения напряжения различают:

- фазные перенапряжения;
- междуфазные перенапряжения;
- внутрифазные перенапряжения, например, между витками катушки;
- трансформатора, между нейтралью и землей;
- между контактами коммутационных аппаратов.

По причинам возникновения перенапряжения подразделяются на следующие:

- внешние – от разрядов молнии (атмосферные перенапряжения),;
- внутренние – возникающие при резонансных явлениях, при авариях и при коммутациях элементов электрической цепи.

В высоковольтных цепях главным источником внешних перенапряжений являются разряды молнии. Наиболее опасны прямые удары молнии в оборудование (ПУМ), при которых даже на заземленных сооружениях возникают большие потенциалы. Индуктированные перенапряжения возникают вследствие индуктивной и емкостной связи канала молнии с токоведущими и заземленными частями электрической сети. Величина индуктированных перенапряжений меньше, чем при прямых ударах молнии, и они опасны только для сетей до 35 кВ при ударе молнии вблизи линии.

Импульсы перенапряжений распространяются на значительные расстояния от места возникновения. Набегающие волны могут представлять опасность для электрооборудования подстанций, электрическая прочность которого ниже, чем у линейной изоляции.

Внутренние перенапряжения по длительности и по причине возникновения делятся на квазистационарные и коммутационные.

Квазистационарные перенапряжения продолжаются от единиц секунд до десятков минут и в свою очередь подразделяются на режимные, резонансные, феррорезонансные и параметрические. Режимные перенапряжения возникают при несимметричных коротких замыканиях на землю, а также при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки. Резонансные перенапряжения имеют место при возникновении резонансных эффектов в линиях (при одностороннем питании линии), в электрических цепях при наличии реакторов. Феррорезонансные перенапряжения возникают в цепях с катушками с насыщенным магнитопроводом, что может быть, как на частоте 50 Гц, так и на высших гармониках, и на субгармониках. Особенностью феррорезонанса является скачкообразный вход в режим резонанса (триггерный эффект).-

Коммутационные перенапряжения возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы сети (при работе коммутационных аппаратов, при коротких замыканиях и при прочих резких изменениях режима) за счет энергии, запасенной в емкостных и индуктивных элементах. Наиболее часто такие перенапряжения имеют место при коммутациях линий, индуктивных элементов, конденсаторных батарей, а также при отключении ненагруженных трансформаторов.

Основными расчетными коммутациями при выборе средств защиты от перенапряжений в электропередачах высокого напряжения являются:

- отключение ВЛ или её участков;
- аварийный разрыв электропередачи в процессе ликвидации короткого замыкания (КЗ) или асинхронного хода параллельно работающих систем, связанных ЛЭП;
- повторное включение ВЛ после погасания дуги КЗ в электропередачах, оснащенных устройствами трехфазного автоматического повторного включения (ТАПВ) или однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ);
- включение или отключение разъединителями участков шин открытых распределительных устройств (ОРУ), закрытых распределительных устройств (ЗРУ) или коммутационные процессы, возникающие при работе вакуумного выключателя во время отключения ненагруженного трансформатора сразу же после его включения, когда ток намагничивания не достиг установившегося значения.

1.2 Случаи аварийного отключения ненагруженного трансформатора

В данном разделе предлагается к рассмотрению аварии, которые могли произойти из-за отключения трансформатора, работающего на холостом ходу.

Авария на трансформаторной подстанции 6 кВ в Ново-Савиновском районе на северо-востоке Казани.

В апреле 2012 года произошла серия аварийных отключений питания [10] на одной из трансформаторных подстанций в Казани (рисунок 1.1). Произошло отключение трансформатора, работающего на холостом ходу. В результате были обесточены больше 1000 потребителей, а также уличное освещение на нескольких улицах.

Рисунок 1.1 – Авария на трансформаторной подстанции в Ново-Савиновском районе

В ноябре 2013 года возникло несколько аварийных ситуаций в Липецке [11], повлекших за собой отключение электроэнергии потребителям, проживающим преимущественно в центре города (рисунок 1.2). Липецкая городская энергетическая компания сообщила, что основной причиной аварий стала изношенность электрических сетей. В период ноябрьских похолоданий нагрузка на кабельные линии увеличилась за счёт подключения разного рода обогревателей, отопительных приборов. Старые сети не выдерживают возросшей нагрузки особенно в местах их соединений. А если при этом осуществлялось отключение ненагруженного трансформатора, то еще больше вероятность возникновения перенапряжения по этой причине.

Рисунок 1.2 – Аварийное отключение электроэнергии в Липецке

25 апреля 2017 года в г. Санкт-Петербурге в здании ТП 6 кВ произошла авария [11] в связи отключением трансформатора. Оперативный персонал быстро устранил пожар трансформатора (рисунок 1.3). Возможно, несчастного случая можно было избежать благодаря установке ограничителя перенапряжения нелинейного.

Рисунок 1.3 – Авария в ТП в Санкт-Петербурге

1.3 Анализ необходимости установки аппаратов защиты на отходящих присоединениях при их коммутациях вакуумными выключателями

При рассмотрении возможности повреждения силового трансформатора среднего напряжения из-за коммутационного перенапряжения (КП) исследование следует начать с рассмотрения прочности изоляции обмоток. Изоляция обмоток является наиболее уязвимым местом при перенапряжениях. Повышенные напряжения могут приводить к пробою как междувитковой изоляции, так и изоляции витков относительно магнитопровода.

Для любого электротехнического оборудования заранее производятся расчеты на возможные ненормальные режимы работы, а также производятся испытания после изготовления и перед вводом в эксплуатацию. Так, силовые трёхфазные трансформаторы проходят испытания повышенным напряжением переменного тока: 25 кВ для номинального напряжения обмоток 6 кВ и 35 кВ для 10 кВ соответственно (время испытания составляет 1 минуту).

Данные испытательные напряжения соответствуют кратностям перенапряжений 3,8 и 3,2, соответственно. Это означает, что силовые трансформаторы однозначно рассчитаны на перенапряжения этих кратностей. Однако есть дополнительно влияющие факторы как, например, превышение испытательных напряжений. Это не обязательно ведёт к пробою изоляции, в частности если перенапряжения кратковременные. С другой стороны, старение изоляции в процессе эксплуатации ведёт к снижению её изоляционной прочности. Электрическая прочность внутренней изоляции зависит как от амплитуды и длительности, так и от формы импульса. Однако не всё так однозначно, так воздействие колебательных импульсов для некоторых видов изоляции опаснее, чем апериодические импульсы равной амплитуды. Это явление обусловлено накоплением частичных разрядов в изоляции, которые сопровождаются разрушением изоляции, и поэтому многократное воздействие перенапряжений приводит к накоплению разрушений.

Точные сведения об влиянии кратности перенапряжений на электрическую прочность изоляции получить затруднительно, это связано, в первую очередь, с трудностью оценки состояния изоляции при проведении таких экспериментов. Однако согласно существующим выработанным указания ГОСТов по проведению испытаний электрооборудования [12] можно косвенно определить допустимые кратности (выдерживаемый уровень) внутренних перенапряжений силовых трансформаторов [13].

$$К_{доп.вн} = К_И \cdot К_К \cdot U_{исп.вн} \cdot \sqrt{3}/U_{ном.раб}, \quad (1.2)$$

где $К_И$– коэффициент импульса, учитывающий повышение разрядного напряжения изоляции при более коротком коммутационном импульсе по сравнению с испытательным напряжением;

$К_К$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий снижение электрической прочности при многократном воздействии перенапряжений и старении изоляции;

$U_{исп.вн}$ – нормированное одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты главной изоляции электрооборудования, кВ;

$U_{ном.раб}$ – наибольшее рабочее напряжение сети, кВ.

Для главной изоляции трансформаторов принимаются следующие величины коэффициентов: $K_И$=1,3, $K_К$=0,9. По представленной формуле можно вычислить допустимые кратности перенапряжений, которые представим в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Допустимые кратности перенапряжений для внутренней изоляции трансформаторов 6–35 кВ с нормальной изоляцией

$U_{ном}$, кВ	6,0	10,0	35,0
$U_{ном.раб}$, кВ	6,9	11,5	40,5
$U_{исп.вн}$, кВ	25,0	35,0	85,0
$U_{доп.}$, кВ	41,5	57,9	140,6
$K_{доп.вн.}$	7,0	5,9	4,3

В таблице 1.2 представлены данные для трансформаторов с нормальной изоляцией, в случае использования облегчённой изоляции допустимая кратность перенапряжений снижается на 30 %.

В процессе эксплуатации на изоляцию силовых трансформаторов воздействуют как рабочие напряжения, так и кратковременные перенапряжения, которые могут быть внешними – грозовые, так и внутренние – перенапряжения при ОЗЗ и из-за поиска «земли» в сети с ОЗЗ, а также более частые перенапряжения – это коммутационные. Коммутационные перенапряжения имеют импульсы с большим затуханием и длительностью до нескольких миллисекунд. На коммутационные перенапряжения влияет ряд факторов:

- тип коммутационного аппарата;
- тип коммутируемой нагрузки;
- мощность коммутируемого трансформатора;
- длина питающей линии;
- наличие аппаратов защиты от перенапряжений.

В данной работе поднимаются вопросы возможности появления опасных для электрооборудования перенапряжений при коммутациях вакуумными выключателями ненагруженных трансформаторов.

Перенапряжения возникают в связи с тем, что вакуумные выключатели способны резко обрывать ток до его естественного перехода через нулевое значение, вызывая этим переходный процесс превращения электромагнитной энергии индуктивности в электростатическую. Подобные перенапряжения могут превысить уровень изоляции отключаемого объекта и привести к перекрытиям и повреждению электрооборудования, снижая эксплуатационную надёжность работы сети. Коммутационные перенапряжения достигают величин 5–6$U_ф$. Поэтому следует оценить влияние вакуумных выключателей на увеличение повреждаемости электрооборудования.

Специалистами отмечается, что существующие в распределительных сетях коммутационные перенапряжения не влияют на ресурс службы кабелей СПЭ (кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена), а также промышленной нагрузки.

Между тем имеют место случаи повреждения силовых трансформаторов собственных нужд ПС и ГПП (таблица 1.3), а также силовых трансформаторов ТП 6-10 кВ.

В таблице 1.3 приведены данные для отечественных промышленных предприятий: ОАО АГК (ОАО «Александринская горно-рудная компания», ОАО АНПЗ (ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод ВНК»), ОАО КрАЗ (ОАО «Красноярский алюминиевый завод»), ОАО БрАЗ (ОАО «Братский алюминиевый завод»).

Из процентного соотношения применения вакуумных выключателей к общему количеству используемого оборудования, видно, что ввод в эксплуатацию большего количества вакуумных выключателей привёл также к увеличению числа повреждений электрооборудования из-за коммутационных перенапряжений. При этом, хотя и можно сказать, что статистика не учитывает старение изоляции повреждённого электрооборудования, на лицо зависимость увеличения повреждаемости при вводе вакуумных выключателей в период с 2003 по 2004 год.

Так, в таблицах 1.4 и 1.5 можно проследить увеличение кратности перенапряжений при коммутации различной нагрузки, в том числе силовых трансформаторов, при переходе от масляного выключателя (таблица 1.4) к вакуумному (таблица 1.5).

Таблица 1.4 – Экспериментальные данные измерений коммутационных перенапряжений при отключении нагрузки масляным выключателем

№ опыта	Тип нагрузки, точка измерения											
	Двигательная				Трансформаторная				Смешанная			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
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 1.3 – Статистка повреждения электрооборудования распределительных подстанций среднего напряжения промышленных предприятий

Повреждённое оборудование	Количество повреждений на исследуемых объектах							
	1996 – 2003 года				2004 – 2006 года			
	ОАО «АГК»	ОАО «АНПЗ»	ОАО «КрАЗ»	ОАО «БрАЗ»	ОАО «АГК»	ОАО «АНПЗ»	ОАО «КрАЗ»	ОАО «БрАЗ»
ТСН	–	1	–	–	2	3	2	2
Ячейки выключателей	6	7	2	1	18	21	7	5
Опорные изоляторы	8	10	4	2	16	18	8	8
Проходные изоляторы	–	–	–	–	8	12	3	–
Концевые кабельные муфты	8	10	4	2	16	18	8	8
Процентное соотношение вакуумных выключателей к общему кол-ву	3%	4%	1%	0,8%	12%	20%	7%	4%

Таблица 1.5 – Экспериментальные данные измерений коммутационных перенапряжений при отключении нагрузки вакуумным выключателем

№ опыта	Тип нагрузки, точка измерения											
	Двигательная				Трансформаторная				Смешанная			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
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

Представленные в таблицах данные получены экспериментально в [14], при коммутации различной нагрузки различными типами вводных выключателей.

Анализируя данные таблиц 1.2 и 1.5, можно сделать вывод, что даже при использовании вакуумных выключателей в большинстве случаев коммутационные перенапряжения не превышают допустимых. Однако учитывая статистику, представленную в таблице 1.3, можно сделать вывод о наличии специфических случаев, при которых коммутационные перенапряжения достигают величин превышающих допустимые. Случаи, о которых идёт речь, могут быть обусловлены следующими факторами:

– влияние погодных условий;

– влияние старения изоляции;

– влияние режима работы сети до повреждения: отключение трансформатора на холостом ходу, высоковольтного асинхронного двигателя;

– параметры сети способствуют появлению больших кратностей перенапряжений.

Первые два фактора конечно следует учитывать, однако на этапе проектирования СЭС их учесть трудно, в то же время важно учесть влияние параметров сети и электрооборудования на коммутационные перенапряжения. До начала повсеместного применения вакуумных и элегазовых выключателей проблема повреждений силовых трансформаторов из-за коммутационных перенапряжений не имела места, что видно, например, из данных таблицы 1.3 [14].

$$К_{кп.вн} = К_{max}/К_{П}, \quad (1.3)$$

где $К_{П}$ – понижающий коэффициент коммутационных перенапряжений, зависящий от длины и сечения питающей кабельной линии.

Таким образом видно, что наибольшие коммутационные перенапряжения имеют место при длине кабельных линий до 100–150 м, которые питают силовые трансформаторы с наименьшей мощностью. При этом видно, что кратности перенапряжений, определённые по данной методике, при коммутации вакуумными выключателями не превышают 3,6 для силовых масляных трансформаторов

и 4,5 для сухих. А как было обозначено ранее для масляных трансформаторов кратности 3,6 не представляют опасности, однако для сухих трансформаторов, у которых допустимые кратности перенапряжений меньше и составляют порядка 4 для трансформаторов 10 кВ, полученные перенапряжения могут достигать опасных величин. А учитывая старение изоляции, значительно увеличивается вероятность повреждений сухих трансформаторов в ТП и масляных трансформаторов собственных нужд, при коммутационных перенапряжениях вакуумными выключателям.

С другой стороны, если рассматривать коммутацию вакуумным выключателем непосредственно силового трансформатора (вводной выключатель ТП), то перенапряжения будут зависеть от мощности трансформатора, его нагрузки и характера коммутационного процесса выключателя (тока среза). А согласно рисунку 1.4 могут возникать коммутационные перенапряжения опасные для сухих трансформаторов мощностью вплоть до 1600 кВА, а также масляных до 400 кВА. Можно сделать вывод, что необходима защита силового трансформатора ТП с вводным вакуумным выключателем от перенапряжений.

Выводы по разделу 1

1. Рассмотрены понятия, связанные с перенапряжениями, их классификация. Также приведены аварийные случаи, которые могли произойти в связи с отключением ненагруженного трансформатора. Но поскольку полная статистика такого рода повреждений не разглашается предприятиями, то далее следует более детальное рассмотрение теоретической части вопроса.

2. В ходе сбора данных было установлено, что при коротких длинах кабельного присоединения вероятность возникновения перенапряжений существенно выше.

3. При сравнении отключения нагрузки масляными и вакуумными выключателями было установлено, что последние показывают лучшие показатели, но также следует учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на величину перенапряжения, в частности сечение питающей кабельной линии.

4. Обоснована необходимость более детального рассмотрения схемы с трансформатором, работающим на холостом ходу.

2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Ранее было сказано, что значительные коммутационные перенапряжения могут возникнуть при отключениях ненагруженных трансформаторов. После начала расхождения контактов выключателя при отключении между ними некоторое время продолжает гореть электрическая дуга. Момент обрыва тока зависит от скорости деионизации дуги, которая в свою очередь определяется характеристиками выключателя и обрываемым током. При больших токах сопротивление растягивающейся дуги невелико и не оказывает влияния на форму тока; окончательный разрыв цепи практически происходит в момент прохождения тока через нулевое значение. При малых токах (например, при отключении ненагруженных трансформаторов) степень ионизации дуги оказывается незначительной, и под действием рабочего дутья выключателя может произойти очень быстрый распад дугового канала еще до того, как ток проходит через свое нормальное нулевое значение, сопротивление дуги скачкообразно возрастает, а ток в дуге резко падает до нуля - происходит «срез» тока, который характеризуется значением $I_0 \neq 0$. При этом выделяется большая энергия, запасенная в индуктивности схемы L, например, в индуктивности намагничивания трансформаторов, что может привести к значительным перенапряжениям.

2.1 Обоснование схемы замещения

Прежде чем рассмотреть энергетические соотношения, описывающие характеристики коммутационных перенапряжений, следует рассмотреть схему, которая включает в себя источник питания, трансформатор и питающую кабельную линию (рисунок 2.1).

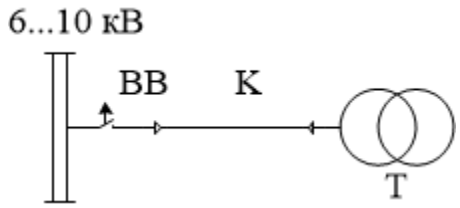

Рисунок 2.1 – Расчетная схема сети с трансформаторов

На схеме замещения рассматриваемой сети (рисунок 2.2) приведены параметры кабельной линии и двухоботочного трансформатора.

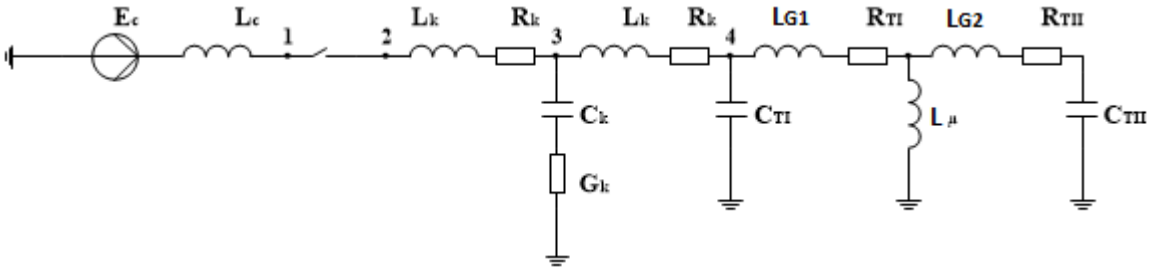

Рисунок 2.2 – Полная схема замещения сети с трансформатором

Для примера возьмем кабель ААШв-3х35/10. Параметры провода [15]: удельное активное и индуктивное сопротивления r_0=0,89 Ом, x_0=0,95 Ом/км; емкостная проводимость $b_0=85x10^{-4}$ См*км, сумма зарядных мощностей 6-ти емкостей $Q_0=10,7x10^3$ квар/км.

Тогда для линии длиной 30 м (0,03 км) произведем расчет согласно формулам (2.1):

$$R_k=R_Л=r_0 * L_Л; \quad x_{L_k}=X_Л=x_0 * L_Л; \tag{2.1}$$

$$R_Л=0,89 * 0,03 = 0,027 \text{ Ом}; \quad X_Л=0,95 * 0,03 = 0,0026 \text{ Ом}.$$

Для определения зарядной мощности кабельной линии, состоящей из шести емкостей рассмотрим рисунок 2.3.

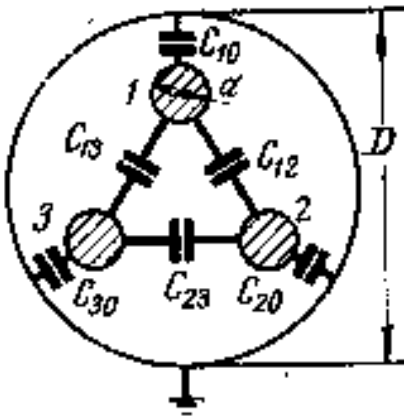

Рисунок 2.3 – Схема емкости в кабеле

На рисунке 2.3: $C_{10}=C_{20}=C_{30}=C_{12}=C_{13}=C_{23}=C_ф$ – частичные емкости на землю; C_{13}, C_{12}, $C_{23}=C_{мф}$ – частичные емкости между жилами.

Междуфазная емкость находится по формуле (2.2):

$$C_{мф} = \frac{1}{3} * C_ф \tag{2.2}$$

И отвечающая ей зарядная емкость фазы (2.3):

$$Q_ф = \frac{U_ф^2}{X_ф}; \tag{2.3}$$

С учетом (2.1)

$$Q_ф = U_ф^2 * \omega_0 * C_ф, \tag{2.4}$$

где ω_0- угловая частота сети, 314 $с^{-1}$;

Тогда линейная зарядная мощность (2.5):

$$Q_л = \frac{U_л^2}{X_{мф}} \tag{2.5}$$

С учетом (2.1):

$$Q_л = U_ф^2 * \omega_0 * C_ф \tag{2.6}$$

Или

$$Q_л = (\sqrt{3} * U_ф)^2 * \omega_0 * \frac{C_ф}{3} = Q_ф. \tag{2.7}$$

С учетом вышеизложенного фазная емкость кабеля (2.8):

$$Q_ф = \frac{Q_0}{6} * L. \tag{2.8}$$

$$Q_ф = \frac{10{,}7 * 10^3}{6} * 0{,}03 = 53{,}5 \text{ вар.}$$

Тогда емкостное сопротивление линии найдем по формуле (2.9):

$$x_{C_k} = \frac{U_ф^2}{Q_ф}; \tag{2.9}$$

$$x_{C_k} = \frac{(\frac{10 * 10^3}{\sqrt{3}})^2}{53{,}5} = 623 \text{ кОм.}$$

Далее определим емкость линии (2.10):

$$C_k = \frac{1}{\omega_0 * x_C}, \tag{2.10}$$

где ω_0- угловая частота сети, 314 $с^{-1}$;

$$C_k = \frac{1}{314 * 623} = 0{,}51 * 10^{-10}\ Ф.$$

Далее определим индуктивность кабельной линии по формуле (2.11):

$$L_k = \frac{x_0 * l}{\omega_0}. \qquad (2.11)$$

Тогда по формуле (2.11):

$$L_k = \frac{0{,}95 * 0{,}03}{314} = 9*10^{-5}\ Гн.$$

Далее рассмотрим параметры трансформатора: активное и индуктивное сопротивление обмоток. Для примера рассмотрим двухобмоточный трансформатор ТМ-1000/10/0,4. Технические характеристики трансформатора [16]: напряжение короткого замыкания $U_{кз}$=5,5%, ток холостого хода $I_{хх}$=0,75%, потери холостого хода $\Delta P_{КЗ} = 1{,}6$ кВт.

Рассчитаем сопротивление намагничивания трансформатора (2.6):

$$X_\mu = \frac{100}{I_{хх\%}} * \frac{U_Н^2}{S_Н}, \qquad (2.6)$$

Тогда,

$$X_\mu = \frac{100}{0{,}75} * \frac{(10 * 10^3)^2}{1000 * 10^3} = 1{,}3\ кОм.$$

Далее определим индуктивность намагничивания по формуле (2.7):

$$L_\mu = \frac{X_т}{\omega_0}, \qquad (2.7)$$

Тогда,

$$L_\mu = \frac{1{,}3*10^3}{314} = 0{,}32 * 10^3\ Гн$$

Рассчитаем активное сопротивление трансформатора (2.7):

$$R_т = \frac{\Delta P_{КЗ} * U_Н^2}{1000 * S_{ном}^2}, \qquad (2.7)$$

Тогда,

$$R_т = \frac{1{,}6*10^3 * (10 * 10^3)^2}{1000 * (1000)^2} = 0{,}16\ Ом.$$

Частота в контуре L-C определяется выражением:

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}, \tag{2.9}$$

$$f = \frac{1}{2 * 3{,}14 * \sqrt{0{,}32 * 10^3 * 0{,}51 * 10^{-10}}} = 7827 \text{ Гц}. \tag{2.7}$$

Полученная частота колебательного контура соответствует частоте переходного процесса.

Сведем в таблицу 2.1 полученные значения параметров кабельной линии, питающей ТП 10/0,4.

Таблица 2.1 – Сводная таблица параметров кабельной линии

L_k, Гн	C_k, Ф	R_k, Ом	x_{C_k}, Ом	x_{L_k}, Ом
$9*10^{-5}$	$0{,}51 * 10^{-10}$	0,027	$623 * 10^3$	0,0026

Произведем упрощения в исходной схеме замещения на участке кабельной линии и отобразим на рисунке 2.3:

1) Индуктивность кабельной линии x_{L_k}, а также активное сопротивление R_k в отличие от емкости кабельной линии x_{C_k}, ввиду своей малости могут быть опущены.

Произведем упрощения в исходной схеме замещения на с трансформатором:

1) Поскольку силовой трансформатор работает на холостом ходу, ток по вторичной обмотке не протекает, но обмотка находится под напряжением. Также берем во внимание то, что число вторичных обмоток силового трансформатора много меньше числа витков на первичной обмотке, а из этого следует, что емкость C_{TII} – емкость вторичной обмотки на корпус – мала. Соответственно, параметры этой обмотки во внимание не принимаются.

2) В связи с тем, что сопротивление трансформатора $R_T = 0{,}16$ Ом достаточно низкое, по сравнению с $X_\mu = 0{,}32 * 10^3$, им можно пренебречь.

3) Из произведенных расчетов следует учитывать в дальнейшем емкость трансформатора.

4) Исходя из полученного значения емкости трансформатора, можем судить, что оно достаточно мало и его можно не учитывать.

Произведенные расчеты дают возможность перейти к упрощенной схеме замещения (рисунок 2.3).

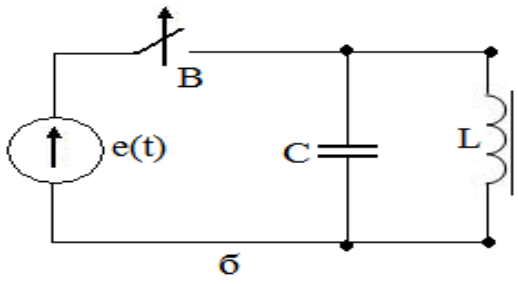

Рисунок 2.3 - Преобразованная (упрощенная) схема замещения сети с ненагруженным трансформатором

На рисунке 2.3 схема приведена к упрощенному виду, на которой C_0 – емкость контура, обусловленная емкостью кабельной линии, L_0 – индуктивность контура, обусловленная индуктивностью намагничивания.

2.2 Энергетические соотношения, характеризующие процессы в схеме замещения

При отключении ненагруженного трансформатора – при малых токах – происходит срез тока.

При протекании тока по обмоткам трансформаторов образуется запас энергии W_L (2.11) и W_c(2.12):

$$W_L = \frac{i_0^2 * L}{2}; \tag{2.11}$$

$$W_c = \frac{u_0^2 * C}{2}. \tag{2.12}$$

Собственная частота колебаний контура (2.13):

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L * C}} \tag{2.13}$$

Из баланса энергии (2.14):

$$W_{C\Sigma} = W_L + W_C \tag{2.14}$$

Следует (2.15):

$$\frac{U_{Cmax}^2}{2} = \frac{i_0^2 * L}{2} + \frac{u_0^2 * C}{2}, \tag{2.15}$$

В левой части баланса U_{max}, так как энергия из большой индуктивности переходит в малую емкость.

Перейдем к анализу и преобразованию данных соотношений, объясняющих процессы в схеме замещения.

2.3 Преобразование и анализ соотношений, характеризующих процессы в схеме замещения

Рассмотрим подробнее баланс энергии (2.15). Выразим U_{Cmax}:

$$U_C = \sqrt{u_0^2 + i_0^2 * \frac{L}{C}}. \qquad (2.16)$$

Так как напряжение на отключаемой индуктивности не достигает значения U_{Cmax} из-за повторных зажиганий дуги в выключателе. С учетом этого:

$$U_{Cmax} = i_{0\,max}\sqrt{\frac{L}{C}}, \qquad (2.17)$$

где i_{0max} – амплитудный ток среза;

C – емкость трансформатора;

L – индуктивность намагничивания трансформатора;

Амплитуда U_{Cmax} колебаний напряжения на емкости $C_э$, с погрешностью в сторону запаса (без учета активных потерь и нелинейности индуктивности шунта намагничивания L_μ) может быть определена, исходя из равенства энергии магнитного поля катушки (формула 2.11) и энергии электрического поля конденсатора $C_э$ (формула 2.12).

Изобразим на рисунке 2.4 процесс отключения силового ненагруженного трансформатора без пробоя.

Пусть, срез тока происходил в момент в момент времени t_0 со значением I_0.

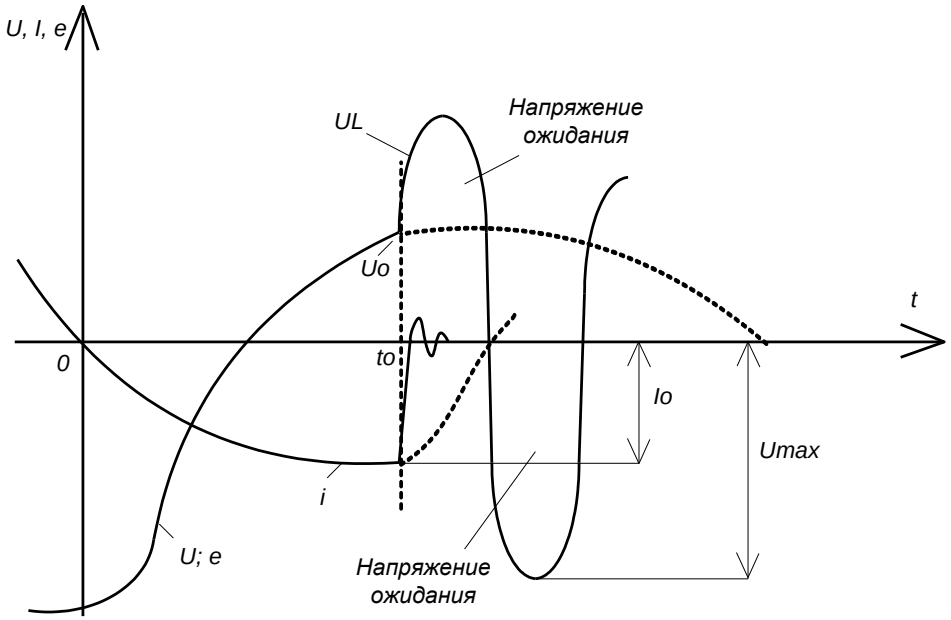

Рисунок 2.4 – Процесс отключения силового ненагруженного трансформатора без пробоя

Ток, протекающий через замкнутые контакты выключателя, в первом приближении равен току в индуктивности трансформатора. После обрыва тока $i_в$, в выключателе ток в индуктивности i_μ, который не может мгновенно измениться, замыкается через эквивалентную емкость $C_э$, представляющую собой сумму емкостей трансформатора, емкости ошиновки между ними и выключателем (с учетом присоединенного к этой ошиновке электрооборудования). Возникает колебательный процесс, частота которого определяется индуктивностью L_μ, емкостью $C_э$ и потерями в контуре (рисунок 2.5). На рисунке моменты времени t_1,t_2,t_3 соответствуют срезам тока в выключателе. Рост напряжения $и_т$ после среза в моменты t_1 и t_2 оказывается выше восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка $и_{пр}$, поэтому дуга загорается вновь и ток восстанавливается. Окончательное гашение дуги происходит в момент t_3, после чего следует максимум перенапряжения U_{max}. В реальных конструкциях выключателей число повторных зажиганий дуги при отключении индуктивных токов, до момента окончательного ее гашения, может достигать нескольких сотен.

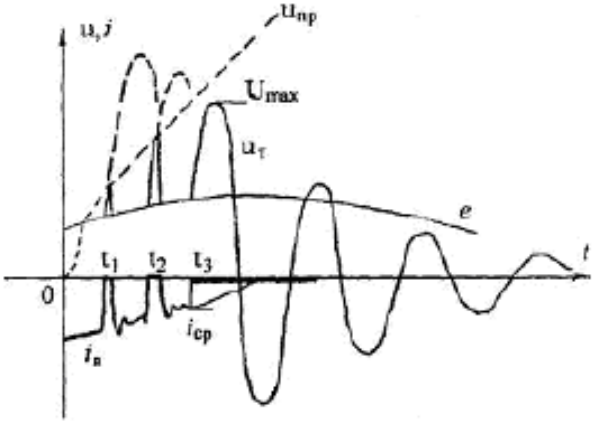

Рисунок 2.5 – Форма кривой тока в выключателе $i_в$, электрической прочности межконтактного промежутка $u_{пр}$ и напряжения на трансформаторе u_m при отключении ненагруженного трансформатора

После пробоя напряжение между контактами выключателя снижается почти до нуля, напряжение U_L до величины напряжения источника. В выключателе появляется ток, который резко возрастает.

Далее происходит новый срез тока при меньшем мгновенном значении.

В результате нового среза тока может появиться следующий пик напряжений и процесс выглядит в виде чередующихся срезов тока и последующих пробоев контактного промежутка.

Повторные зажигания дуги в выключателе могут прекращаться довольно быстро, но могут продолжаться и несколько полупериодов. Длительность существования повторных зажиганий зависит от ожидаемого перенапряжения, интенсивности затухания собственных колебаний и скорости роста восстанавливающейся прочности выключателя.

2.4 Оценка уровня перенапряжения по упрощенной схеме замещения

Рассмотрим распределительный пункт, совмещенный с трансформаторной подстанцией 10/0,4 кВ с трансформаторами ТМ-1000-10/0,4. Распределительный пункт питается от подстанции по двум кабельным линиям, выполненных сдвоенным кабелем ААШв-3х35-10. РУ-10 кВ состоит из 20 ячеек серии КСО-203 Орского завода электромонтажных изделий. Камеры оборудованы вакуумными выключателями BB/TEL-10-20/1000.

Перенапряжения при отключении ненагруженного трансформатора определяются по формуле (2.18):

$$U = \sqrt{U_0^2 + I_0^2 * \frac{L_0}{C_0}} \qquad (2.18)$$

Причем наибольших уровень перенапряжений будет при $I_0 = I_{0max}$, тогда по формуле (2.19):

$$U_{max} = I_0\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (2.19)$$

где I_0- ток холостого хода трансформатора;

L_0 – индуктивность ветви намагничивания;

C_0 – емкость кабеля, которым подключен трансформатор.

Емкость трансформатора и индуктивность кабеля учитывать не будем из-за их малой величины.

Рассмотрим случай отключения ненагруженного трансформатора собственных нужд ТМ-1000-10/0,4, запитанного по кабелю ААШв-(3х35)-10 длиной 30 м.

Найдем ток холостого хода трансформатора, для ТМ-1000, $I_{хх} = 0{,}75\%$, найдем номинальный ток трансформатора по формуле (2.20):

$$I_н = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_н} \quad (2.20)$$

где $S_н$– номинальная полная мощность;

$U_н$- номинальное напряжение сети.

Тогда по формуле (2.20) находим:

$$I_н = \frac{1000 * 10^3}{\sqrt{3} * 10 * 10^3} = 57{,}7 \text{ А}$$

Найдем ток холостого хода (2.21):

$$I_{хх} = \frac{I_н * I_{хх\%}}{100} \quad (2.21)$$

$$I_{хх} = \frac{57{,}7 * 0{,}75}{100} = 0{,}433 \text{ А}.$$

Индуктивность контура намагничивания была ранее определена, поэтому:

$$L_\mu = L_0 = 0{,}32 * 10^3 \text{ Гн}$$

Емкость кабеля определим по формуле (2.18):

$$C_0 = C_{уд} * L, \quad (2.18)$$

где $C_{уд}$ – удельная емкость кабеля, Ф;

L- длина кабеля, удельная емкость, Гн.

$C_{уд} = 0{,}208$ мкФ/км [15, таблица 6.28], тогда получаем:

$$C_0 = 0{,}208 * 0{,}03 = 6{,}24 * 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Тогда по формуле (2.19) получаем:

$$U_{max} = 0{,}433 * \sqrt{\frac{42{,}46}{6{,}24 * 10^{-9}}} = 35717{,}87 \text{ В}.$$

Определим кратности перенапряжений по формуле (2.20):

$$k = \frac{U_{max}}{U_н} \qquad (2.20)$$

По формуле (2.20) находим:

$$k = \frac{\sqrt{2} * 35717{,}17}{\sqrt{3} * 10000} = 2{,}9.$$

Полученный уровень перенапряжений не представляет опасности. Проведем аналогичные вычисления для трансформатора ТМ-630-10/0,4. По формуле I_{xx} = 0,7% (2.15) получаем:

$$I_н = \frac{630}{\sqrt{3} * 10} = 36{,}37 \text{ А}.$$

Найдем ток холостого хода:

$$I_{xx} = \frac{36{,}37 * 0{,}7}{100} = 0{,}255 \text{ А}.$$

Определим индуктивность ветви намагничивания по формуле (2.17):

$$L_0 = \frac{\frac{100}{0{,}7} * \frac{(10 * 10^3)^2}{630 * 10^3}}{314} = 72{,}21 \text{ Гн}.$$

Тогда по формулам (2.19) и (2.20):

$$U_{max} = 0{,}255 \sqrt{\frac{72{,}21}{6{,}24 * 10^{-9}}} = 45772{,}64 \text{ В};$$

$$k = \frac{\sqrt{2} * 45772{,}64}{\sqrt{3} * 10000} = 3{,}7.$$

Как видно из полученных результатов с уменьшением мощности трансформатора уровень перенапряжений снижается.

Определим величину перенапряжений при малой длине кабеля, примем L=10 м, тогда для трансформатора мощностью 1000 кВА:

$$U_{max} = 0{,}433 * \sqrt{\frac{42{,}46}{2{,}08 * 10^{-9}}} = 61864{,}17 \text{ В};$$

$$k = \frac{\sqrt{2} * 61864}{\sqrt{3} * 10000} = 5{,}05.$$

Получим более чем пятикратное перенапряжение, в таком случае установка ОПН обязательная.

Полученные результаты не противоречат руководству по эксплуатации ОПН компании «Таврида Электрик».

Допустимая кратность внутренних перенапряжений $k_{доп}$ для электрооборудования 6-20 кВ приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Допустимая кратность внутренних перенапряжений $k_{доп}$ для электрооборудования 6-20 кВ

$U_н$, кВ	6	10	15	20
Нормальная изоляция	7	5,9	5,2	4,9
Облегченная изоляция	4,5	4,1	4,3	4,4
Изоляция электродвигателей	3,4	5,5	-	-

Поскольку перенапряжения при отключении индуктивностей лишь в очень редких случаях достигают предельных значений и имеют форму кратковременных импульсов, то установленные на присоединениях трансформаторов грозозащитные разрядники и ОПН легко справляются с их ограничением. Возможно существенное ограничение перенапряжений с применением выключателей с шунтирующими сопротивлениями, через которые часть энергии, запасенной в индуктивности, возвращается в сеть.

В нашем случае для надежного ограничения перенапряжений используется ОПН, что вполне оправдано.

Значительный объем экспериментальных данных по коммутационным перенапряжениям, вызванных отключением ненагруженных трансформаторов средних классов напряжений, систематизирован. В основном эти данные относятся к воздушным и масляным выключателям. Наибольшие зарегистрированные кратности составляют 4-6 о.е. и зависят главным образом от величины тока среза и параметров сети.

ОПН должны подключаться между фазой и землей со стороны коммутируемого присоединения или параллельно контактам выключателя. ОПН, установленные на шинах, не защищают присоединение при его отключении вакуумным выключате-

лем. Устанавливаемые между фазой и землей ОПН должны располагаться непосредственно у защищаемого объекта или в начале кабеля, в ячейке КРУ у выключателя, если длина кабеля не больше 50 м.

ОПН, подключаемый непосредственно на зажимах защищенного объекта, обеспечивает ограничение перенапряжений до необходимого уровня и, вместе с тем, оказывается неуязвимым в режиме с перемежающейся дугой. Последнее обусловлено тем, что при перенапряжениях, вызванных перемежающейся дугой, ток через ОПН имеет безопасные значения, поэтому такие ОПН могут применяться в схемах с любым значение емкостного тока замыкания на землю.

При включении ОПН параллельно контактам выключателя обеспечивается более глубокое ограничение перенапряжений, а сам ОПН подвергается менее тяжелым воздействиям.

Существенное влияние на кратность перенапряжений, при отключении ненагруженных трансформаторов, оказывают значение тока среза, ёмкость между выключателем и трансформатором (ёмкость кабеля и входная ёмкость трансформатора), исходный режим работы сети, предшествующий отключению, форма кривой намагничивания и мощность трансформатора (индуктивность нагрузки).

При значительной длине кабельного присоединения перенапряжений из-за среза тока в выключателе вообще не возникает. В то же время на энергетических предприятиях существует множество схем, особенности режимов работы и состав оборудования которых способствует генерации опасных уровней перенапряжений.

Вывод по разделу 2:

1. Произведены расчеты, позволяющие производить вычисления коммутационных перенапряжений ненагруженных трансформаторов по упрощенной схеме.
2. Ключевыми параметрами схемы замещения при коммутационных перенапряжений ненагруженных трансформаторов являются емкость кабельной линии и индуктивность трансформатора.
3. Длина кабельной линии является определяющим фактором при уровне коммутационного перенапряжения.

3 УРОВНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Параметры схемы, влияющие на величину перенапряжения

В 2 главе данной исследовательской работы были рассмотрены зависимости, которые позволили упростить для дальнейших расчетов схему замещения. Это также позволяет сделать выводы о мощности трансформатора и длине питающей кабельной линии, как о параметрах, влияющих на величину и характер перенапряжения.

Установлено, что снижение кратности перенапряжений обусловлено правильным выбором длины и сечения кабельной линии.

Таким образом, отмечается следующее:

1) с увеличением длины питающей кабельной линии кратность перенапряжений уменьшается;
2) при вариации момента коммутации, с уменьшением величин тока среза, снижается запасенная в индуктивности трансформатора энергия;
3) при выборе силовых трансформаторов с большей мощность вероятность возникновения перенапряжений существенно возрастает.

Исходя из предыдущих глав, рассмотрим полученные зависимости в виде таблиц и диаграмм.

3.2 Обоснование необходимости исследования перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора

В дальнейших расчетах используются следующие исходные данные: паспортные данные трансформаторов напряжением от 25 кВА до 1600 кВА (таблица 3.1) и справочные данные питающего кабеля (таблица 3.2), а также таблица 3.3.

Таблица 3.1 – Паспортные данные трансформаторов

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	U1, В	U2, В	Pxx, Вт	Pк, Вт	uk, %	Ixx, %
ТМ-25/10	25	10000	400	95	625	4,5	2,2
ТМ-40/10	40	10000	400	135	860	4,5	1,8
ТМ-63/10	63	10000	400	190	1270	4,5	1,5
ТМ-100/10	100	10000	400	280	1780	4,5	1,4
ТМ-160/10	160	10000	400	390	2410	4,5	1,1
ТМ-250/10	250	10000	400	520	3590	4,5	0,9
ТМ-400/10	400	10000	400	820	5500	4,5	0,8
ТМ-630/10	630	10000	400	1000	7600	5,5	0,7
ТМ-1000/10	1000	10000	400	1400	10600	5,5	0,6
ТМ-1600/10	1600	10000	400	1950	16000	6,0	0,5

Таблица 3.2 – Данные для расчета сечения питающего кабеля

$S_{наг.т.}$, кВА	$P_{р.т.}$, кВт	$Q_{р.т.}$, квар	$\Delta P_{т.ном.}$, кВт	$\Delta Q_{т.ном.}$, квар	$S_{р.кл.норм}$, кВА	$I_{р.кл.нор}$, А	$F_{эк}$, мм2	Марка и сечение кабеля, мм2	C_0, мкФ/км
17,5	15,75	7,53	0,40	1,10	18,31	1,01	0,84	ААШв-3*16/10	0,286
28,0	25,20	12,04	0,56	1,60	29,15	1,60	1,34	ААШв-3*16/10	0,286
44,1	39,69	18,96	0,81	2,33	45,76	2,52	2,10	ААШв-3*16/10	0,286
70,0	63,00	30,10	1,15	3,61	72,47	3,98	3,32	ААШв-3*16/10	0,286
112,0	100,80	48,16	1,57	5,29	115,48	6,35	5,29	ААШв-3*16/10	0,286
175,0	157,50	75,25	2,28	7,76	180,06	9,90	8,25	ААШв-3*16/10	0,286
280,0	252,00	120,40	3,52	12,02	287,79	15,82	13,19	ААШв-3*16/10	0,286
441,0	396,90	189,63	4,72	21,39	453,69	24,95	20,79	ААШв-3*25/10	0,341
700,0	630,00	301,00	6,59	32,95	718,87	39,53	32,94	ААШв-3*35/10	0,379
1120,00	1008,00	481,60	9,79	55,04	1150,60	63,27	52,72	ААШв-3*70/10	0,495

Таблица 3.3 - Рассчитываемые параметры схемы замещения

Табличные данные	Рассчитываемые параметры схемы замещения																
Тип транс-форматора	Номи-нальная мощ-ность, кВА	U1, В	U2, В	Pxx, Вт	Pк, Вт	uk, %	Ixx, %	k	I1н, А	zk, Ом	rk, Ом	xk, Ом	R1, Ом	L1, мГн	R2, Ом	L2, мГн	Rm, Ом
ТМ-25/10	25	10000	400	95	625	4,5	2,2	25	1,4	180,000	100,000	149,666	50,000	238,201	0,08000	0,38112	1052631
ТМ-40/10	40	10000	400	135	860	4,5	1,8	25	2,3	112,500	53,750	98,829	26,875	157,291	0,04300	0,25167	740740,
ТМ-63/10	63	10000	400	190	1270	4,5	1,5	25	3,6	71,429	31,998	63,861	15,999	101,637	0,02560	0,16262	526315,
ТМ-100/10	100	10000	400	280	1780	4,5	1,4	25	5,8	45,000	17,800	41,330	8,900	65,779	0,01424	0,10525	357142,
ТМ-160/10	160	10000	400	390	2410	4,5	1,1	25	9,2	28,125	9,414	26,503	4,707	42,180	0,00753	0,06749	256410,
ТМ-250/10	250	10000	400	520	3590	4,5	0,9	25	14,4	18,000	5,744	17,059	2,872	27,150	0,00460	0,04344	192307,
ТМ-400/10	400	10000	400	820	5500	4,5	0,8	25	23,1	11,250	3,438	10,712	1,719	17,049	0,00275	0,02728	121951,
ТМ-630/10	630	10000	400	1000	7600	5,5	0,7	25	36,4	8,730	1,915	8,518	0,957	13,556	0,00153	0,02169	100000,
ТМ-1000/10	1000	10000	400	1400	10600	5,5	0,6	25	57,7	5,500	1,060	5,397	0,530	8,589	0,00085	0,01374	71428,6
ТМ-1600/10	1600	10000	400	1950	16000	6,0	0,5	25	92,4	3,750	0,625	3,698	0,313	5,885	0,00050	0,00942	51282,1

Таблица 3.4 - Рассчитываемые параметры схемы замещения

		0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
	Lm, Гн	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588

ТМ-25/10	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	78833,709	55743,850	45514,663	39416,854	35255,506	32183,727	29796,341	27871,925	26277,903	24929,408
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	9,66	6,83	5,58	4,83	4,32	3,94	3,65	3,41	3,22	3,05
ТМ-40/10	Lm, Гн	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	90322,105	63867,373	52147,491	45161,052	40393,273	36873,845	34138,547	31933,686	30107,368	28562,357
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	11,06	7,82	6,39	5,53	4,95	4,52	4,18	3,91	3,69	3,50
ТМ-63/10	Lm, Гн	344	344	344	344	344	344	344	344	344	344
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	103618,703	73269,488	59824,286	51809,352	46339,693	42302,158	39164,189	36634,744	34539,568	32767,111
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	12,69	8,98	7,33	6,35	5,68	5,18	4,80	4,49	4,23	4,01
ТМ-100/10	Lm, Гн	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	126106,728	89170,922	72807,753	63053,364	56396,643	51482,856	47663,863	44585,461	42035,576	39878,449
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163

	к	15,45	10,92	8,92	7,72	6,91	6,31	5,84	5,46	5,15	4,89
ТМ-160/10	Lm, Гн	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	141731,035	100218,976	81828,451	70865,517	63384,046	57861,453	53569,296	50109,488	47243,678	44819,289
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	17,36	12,28	10,02	8,68	7,76	7,09	6,56	6,14	5,79	5,49
ТМ-250/10	Lm, Гн	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	160432,776	113443,104	92625,906	80216,388	71747,718	65496,406	60637,889	56721,552	53477,592	50733,298
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	19,65	13,90	11,35	9,83	8,79	8,02	7,43	6,95	6,55	6,22
ТМ-400/10	Lm, Гн	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
	C0, мкФ/км	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
	C0, пФ	0,095	0,191	0,286	0,381	0,477	0,572	0,667	0,763	0,858	0,953
	Umax, В	191951,395	135730,133	110823,190	95975,698	85843,274	78363,829	72550,808	67865,067	63983,798	60700,361
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	23,51	16,63	13,58	11,76	10,52	9,60	8,89	8,31	7,84	7,44
ТМ-630/10	Lm, Гн	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
	C0, мкФ/км	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341
	C0, пФ	0,114	0,227	0,341	0,455	0,568	0,682	0,796	0,909	1,023	1,137
	Umax, В	205588,374	145372,934	118696,503	102794,187	91941,916	83931,102	77705,102	72686,467	68529,458	65012,752

	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	25,19	17,81	14,54	12,59	11,26	10,28	9,52	8,90	8,40	7,96
ТМ-1000/10	Lm, Гн	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
	C0, мкФ/км	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379
	C0, пФ	0,126	0,253	0,379	0,505	0,632	0,758	0,884	1,011	1,137	1,263
	Umax, В	227645,632	160969,770	131431,267	113822,816	101806,221	92935,940	86041,961	80484,885	75881,877	71987,870
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	27,89	19,72	16,10	13,94	12,47	11,39	10,54	9,86	9,30	8,82
ТМ-1600/10	Lm, Гн	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
	C0, мкФ/км	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495
	C0, пФ	0,165	0,330	0,495	0,660	0,825	0,990	1,155	1,320	1,485	1,650
	Umax, В	230312,674	162855,653	132971,084	115156,337	102998,959	94024,755	87050,008	81427,827	76770,891	72831,262
	Um.ном.ф, В	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163	8163
	к	28,21	19,95	16,29	14,11	12,62	11,52	10,66	9,98	9,40	8,92

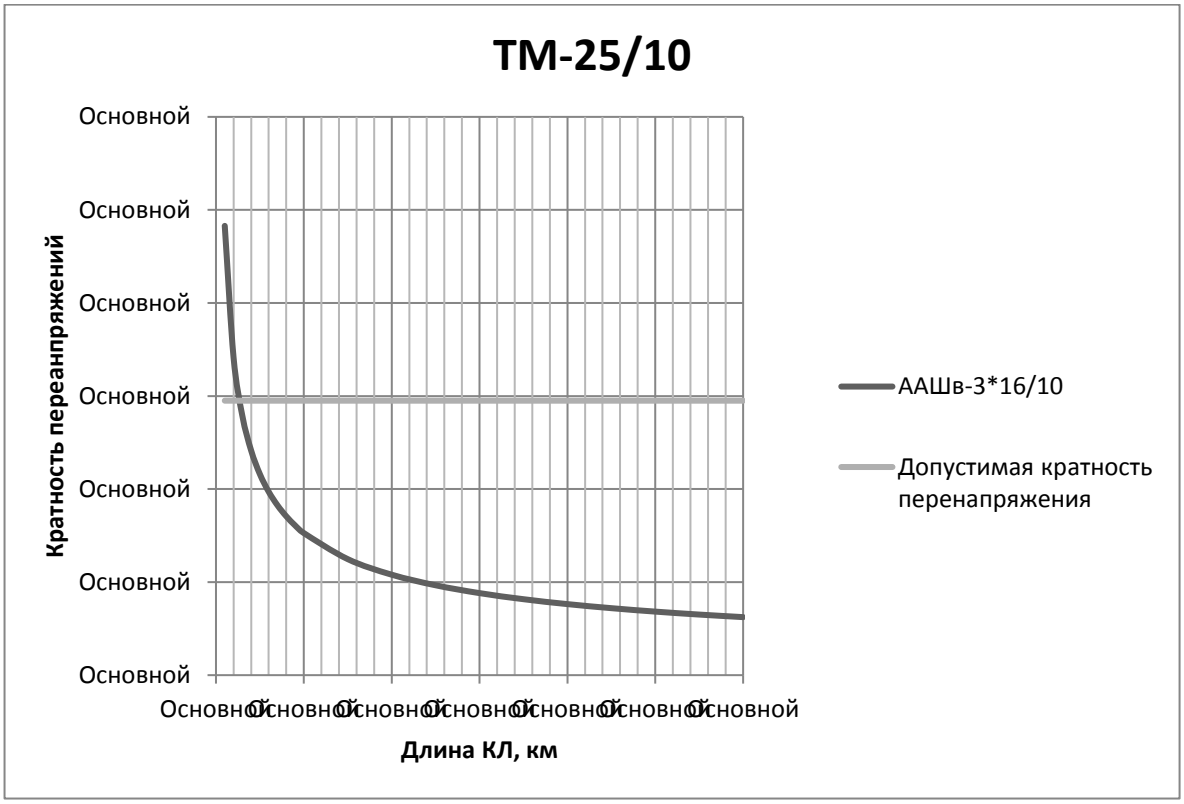

Рисунок 3.1- Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-25/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

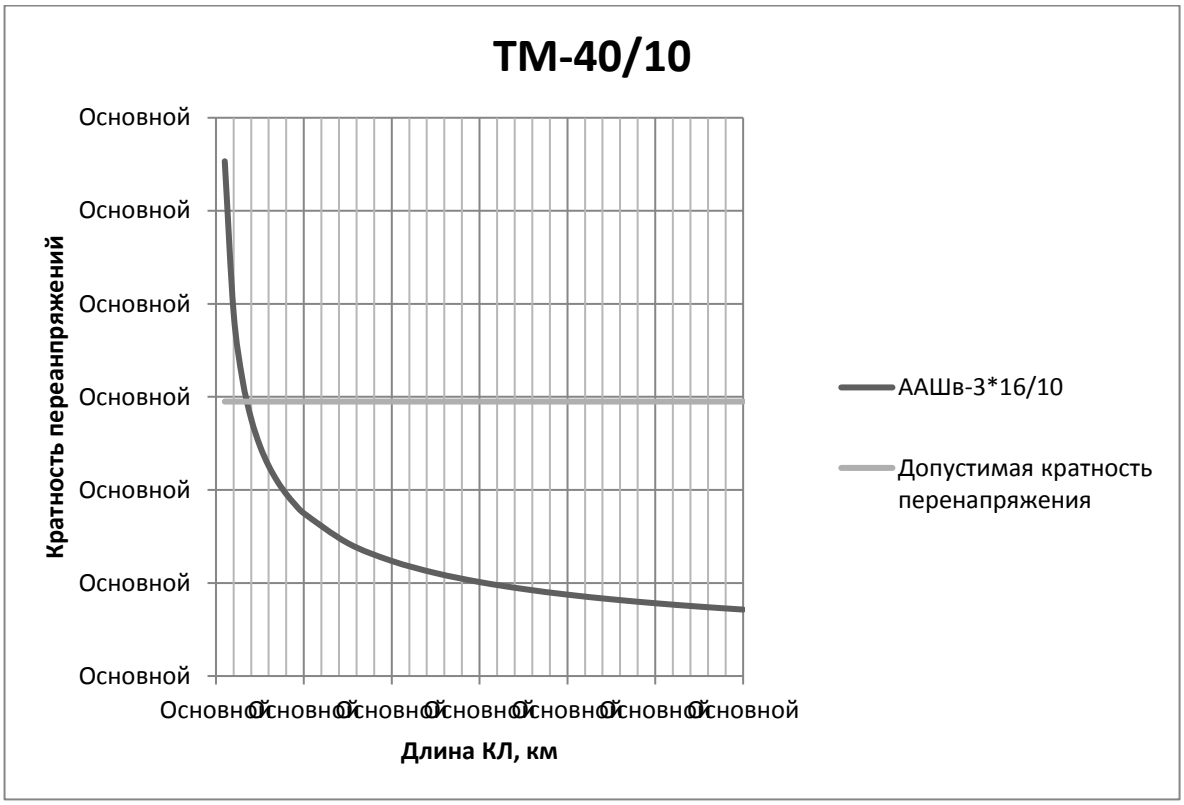

Рисунок 3.2 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-40/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

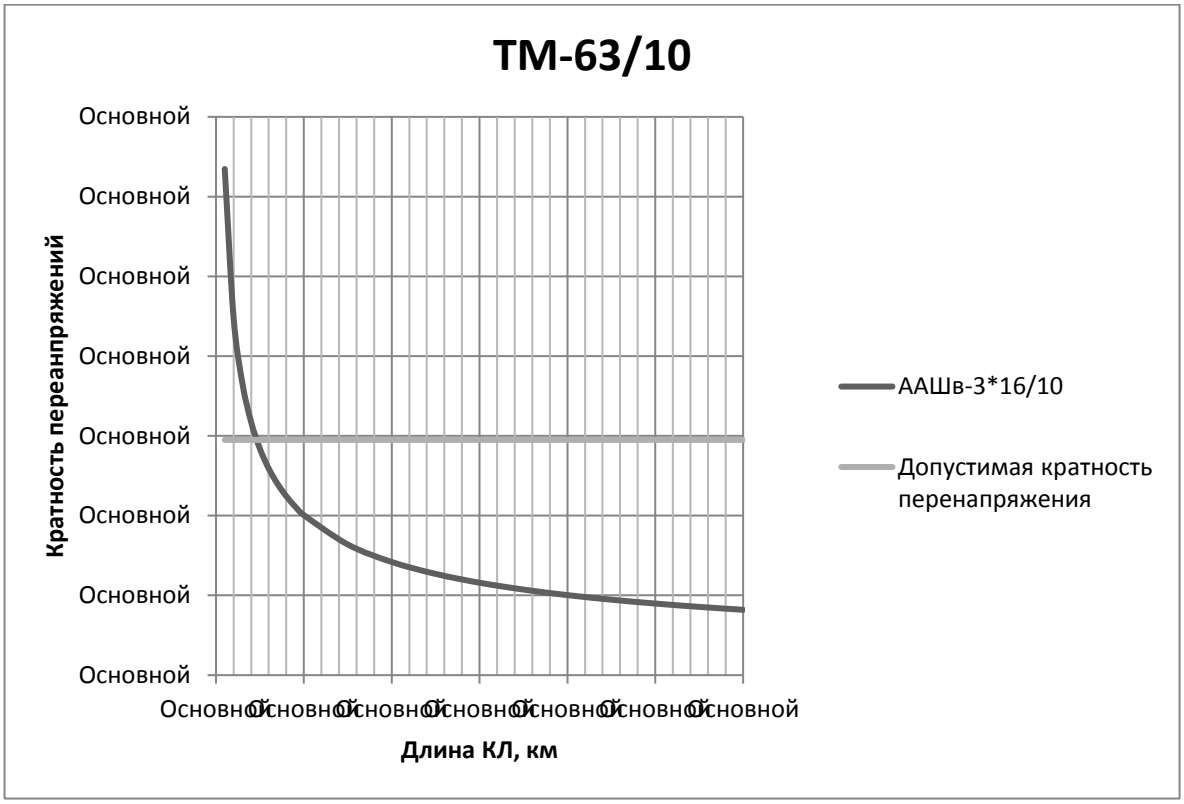

Рисунок 3.3 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-63/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

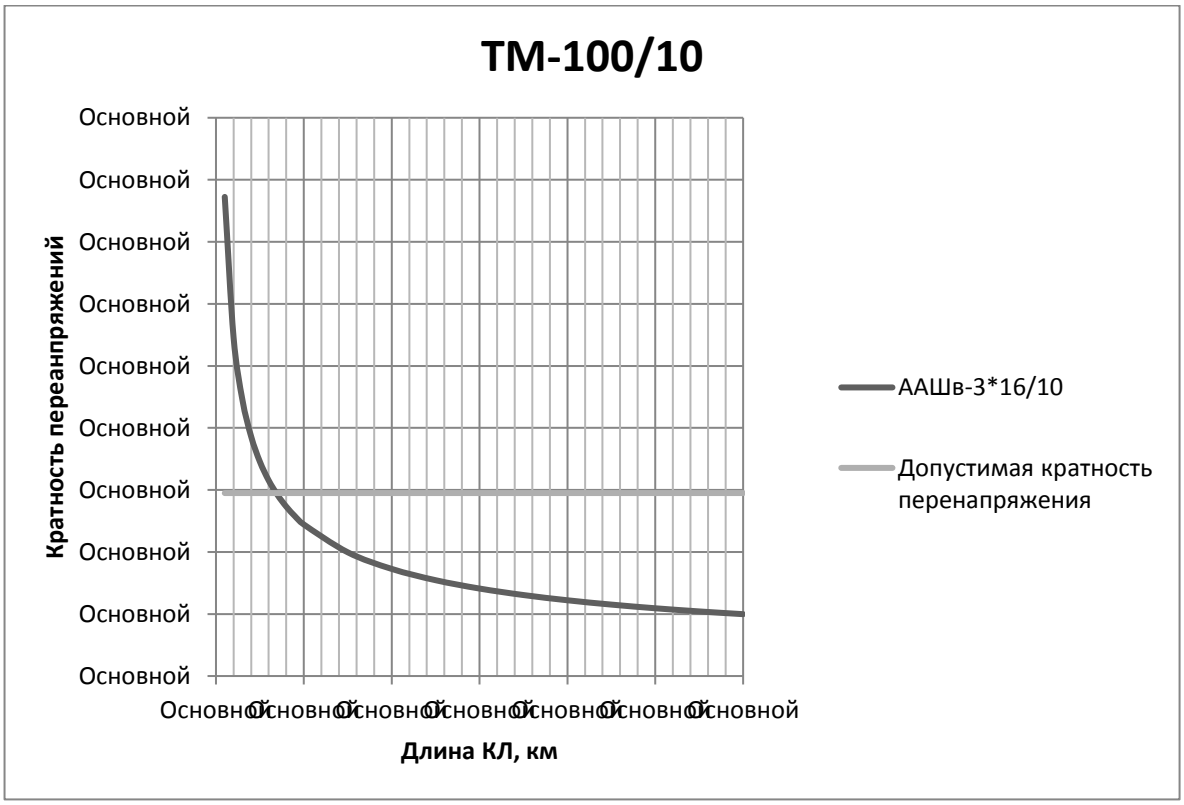

Рисунок 3.4 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-100/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

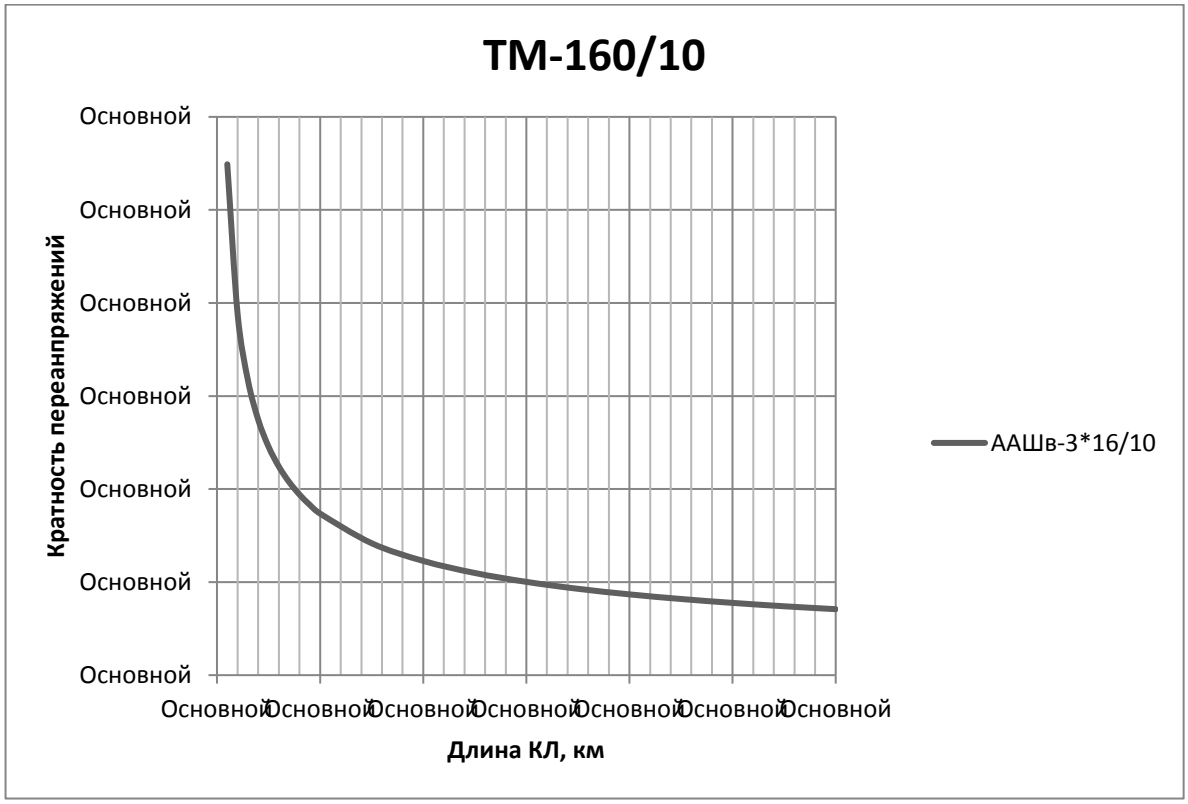

Рисунок 3.5 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-160/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

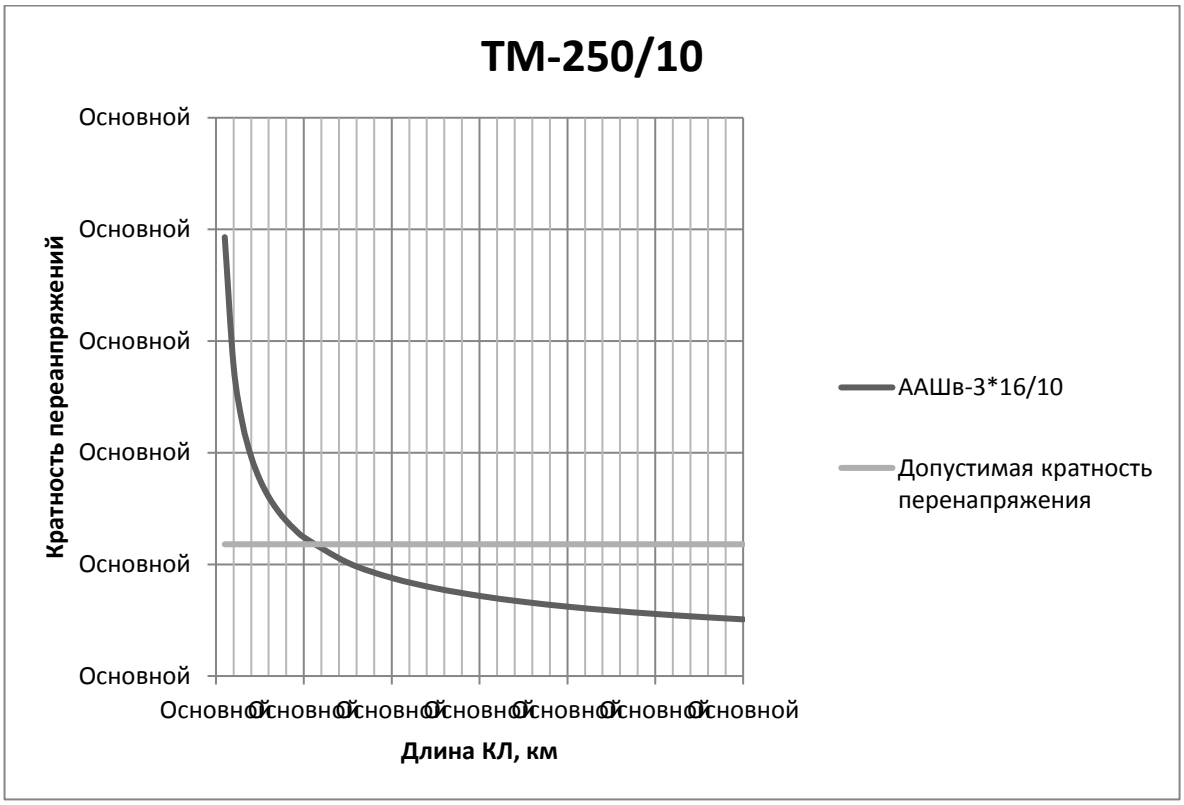

Рисунок 3.6 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-250/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

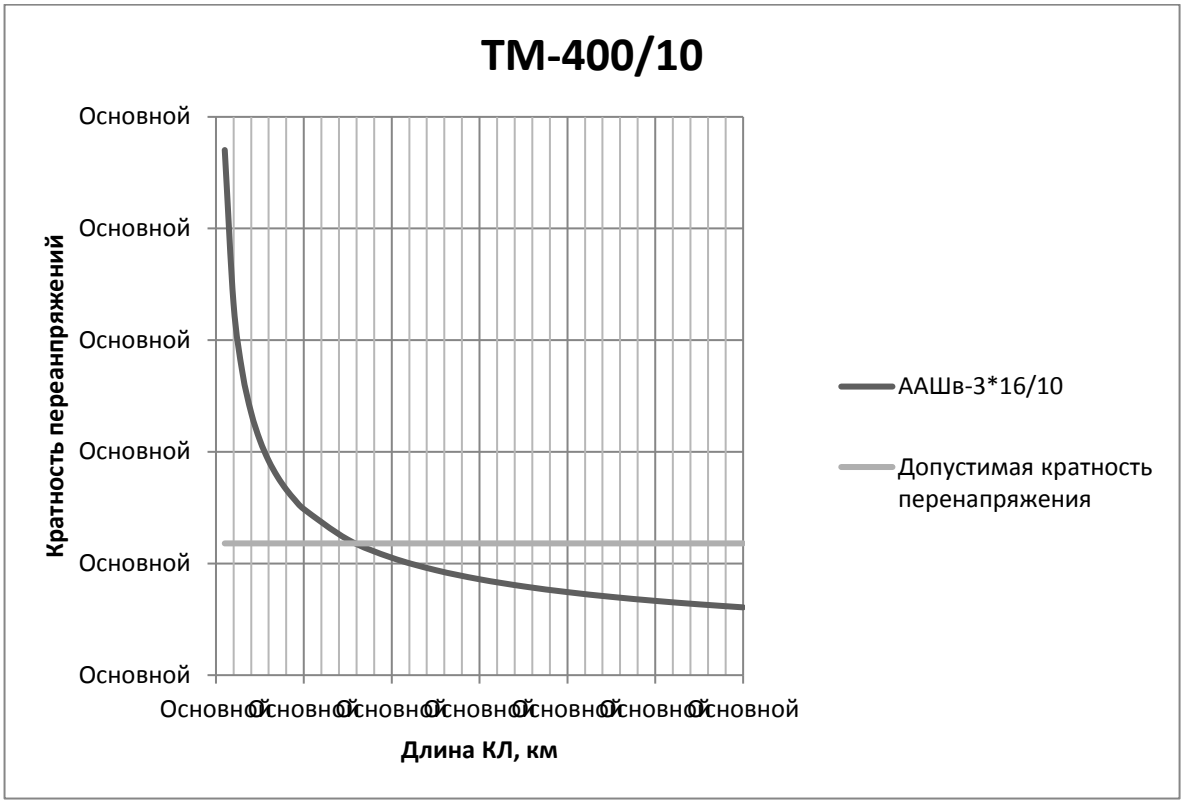

Рисунок 3.7 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-400/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

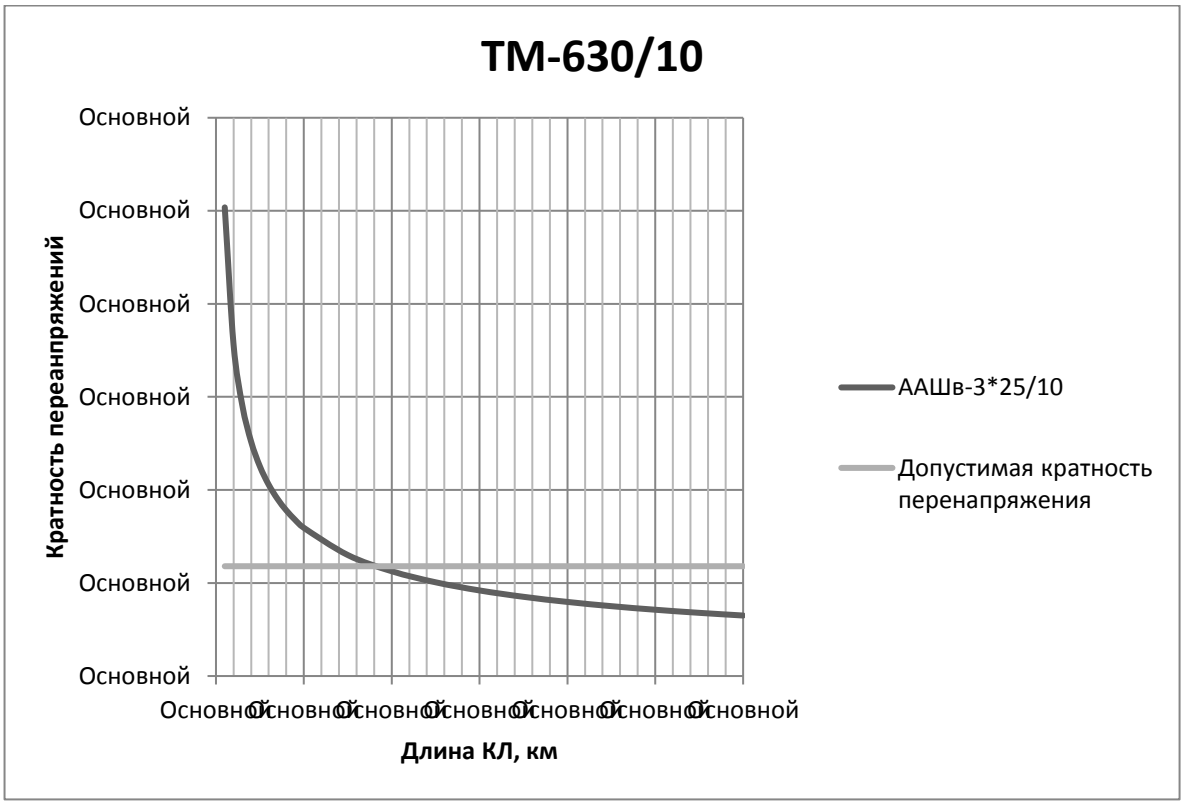

Рисунок 3.8 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

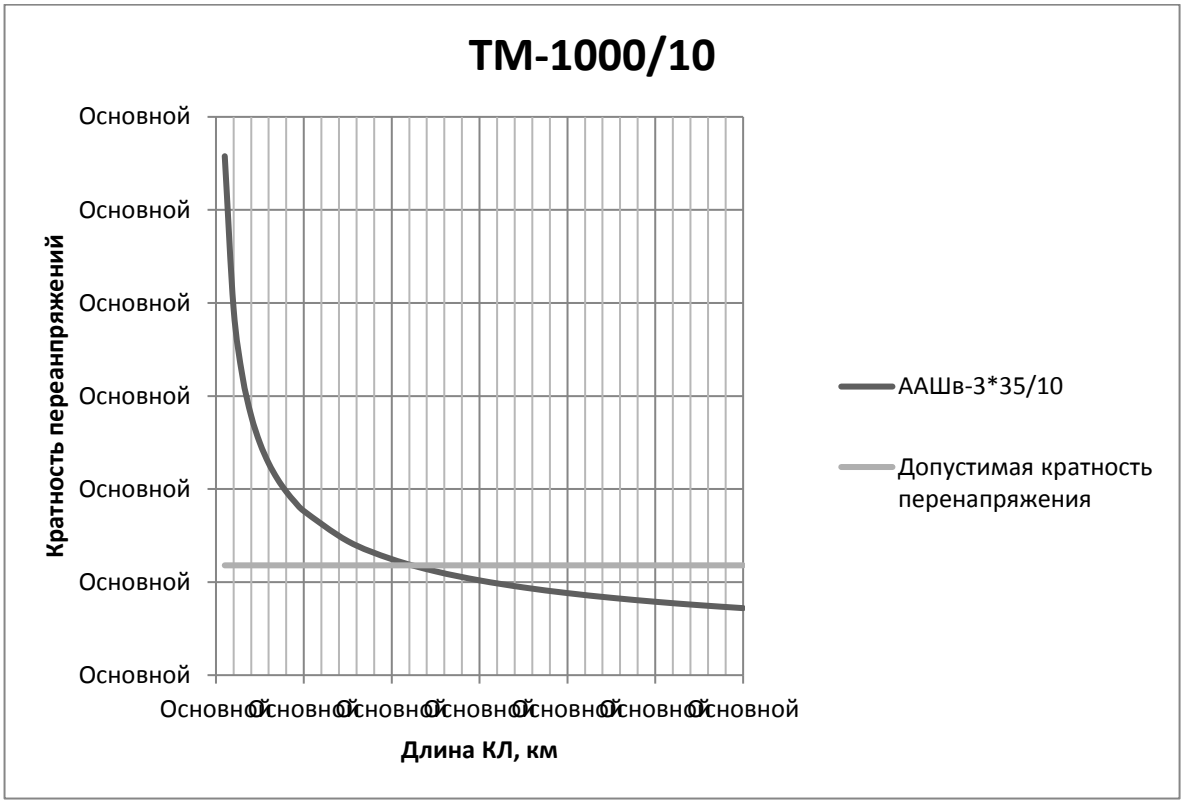

Рисунок 3.9 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-1000/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

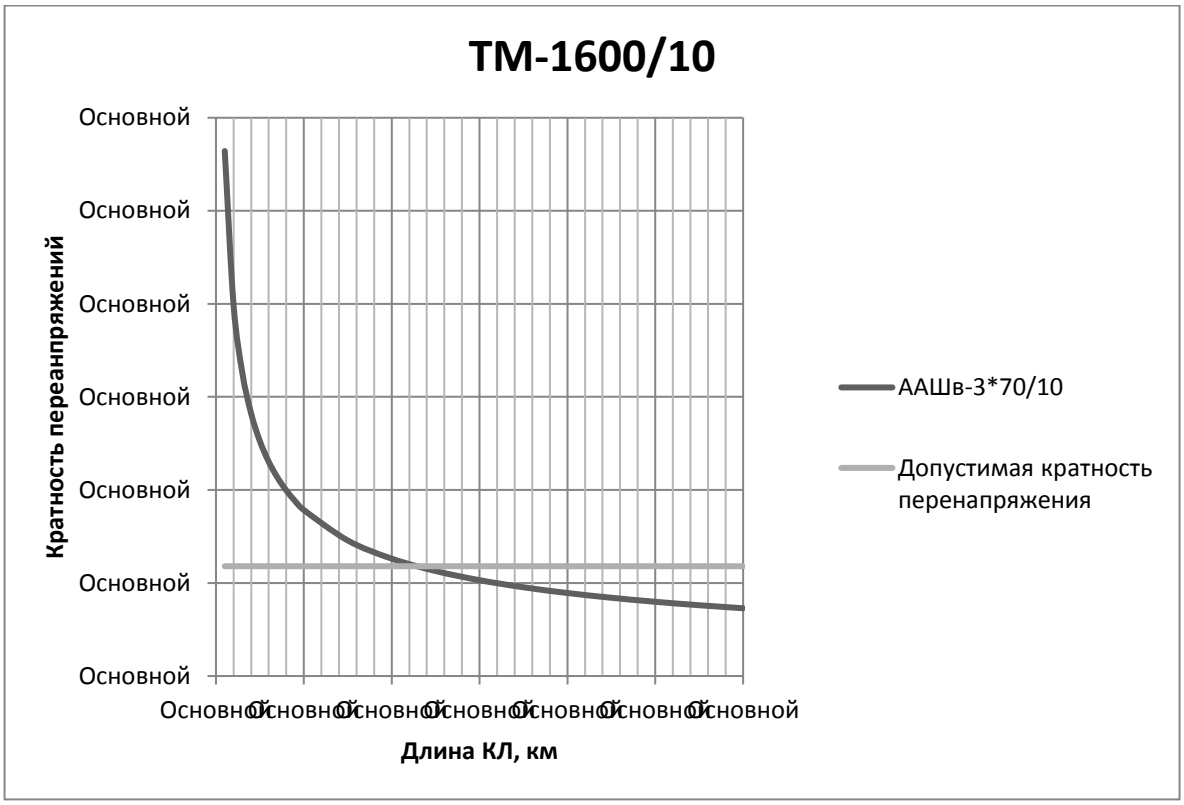

Рисунок 3.10 - Кратность перенапряжений для трансформатора ТМ-1600/10 и питающей линии ААШв-3х16/10

Далее приведем диаграмму, на которой показана кратность перенапряжений для одного трансформатора ТМ-160/10, но для разных сечений и длин кабеля (рисунок 3.11).

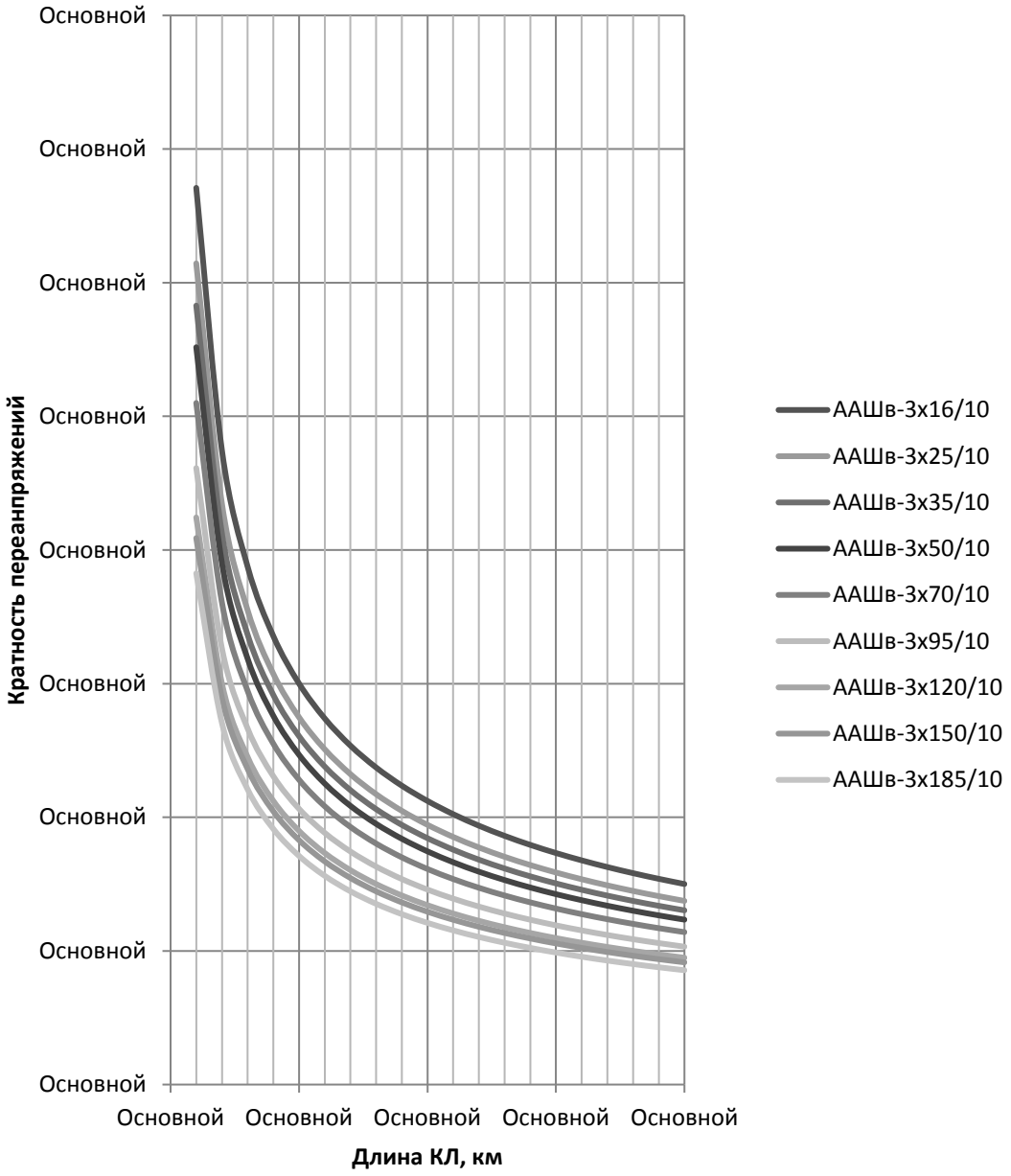

Рисунок 3.11 - Кратности перенапряжений на вводах ТМ-160/10 для КЛ различного сечения в зависимости от длины КЛ

Выводы по разделу 3

Отмечается следующее:

1) С увеличением длины питающей кабельной линии кратность перенапряжений уменьшается.
2) Выбор мощности трансформатора влияет на уровень перенапряжений: при большей мощности величина перенапряжения возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено обоснование актуальной научно-технической задачи, состоящее в решении о целесообразности установки ОПН при эксплуатации сети 10 кВ кабельных линий и трансформаторов напряжением 10 кВ.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы работы:

1. На основании расчетных данных и их обработки выявлено, что основными факторами, влияющими на величину и характер перенапряжений, являются: вид коммутации, тип и мощность трансформатора, длина и сечение кабельной линии и тип выключателя, исходя из чего построены зависимости между кратностью перенапряжений и мощностью трансформатора, позволяющие оценить уровень перенапряжений на вводах трансформаторов разной мощности и при их отключении в режиме холостого хода.

2. Произведены расчеты кратности перенапряжений для разных типономиналов силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, а также для кабельных линий различных сечений и разной длины.

3. В результате расчетов было установлено, что снижение кратности перенапряжений обусловлено длиной и сечением кабельной линии, а также мощностью силовых трансформаторов.

4. Работа по данной теме на основе типа и мощности трансформатора, длины и сечения кабельной линии, позволяет оценить кратности перенапряжений и принять решение об установке ОПН.

5. Применение ОПН для защиты от перенапряжений при эксплуатации сети 10 кВ существенно повышает уровень электробезопасности и надежности оборудования.

6. Данные, полученные в ходе исследований, могут быть использованы для проведения дальнейших научных исследований.

Список литературы

1. Буль Б.К., Буткевич Г.В. Основы теории электрических аппаратов. Учебное пособие для электротехнических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1970, 600 с.
2. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. Новосибирск: НГТУ, 2008. 343 с.
3. Клепарская, Л.Г. Синхронизированные выключатели/ Л.Г. Клепарская. – М.: Энергия. – 1973. – 112 с.: ил.
4. Снижение тока включения трансформаторов/ В.А. Кузьменко, А.И. Лурье, А.П. Панибратец, В.С. Чуприков // Электротехника. – 1997. – № 2. – С. 22–27.
5. Алферов, Д.Ф. Быстродействующие вакуумные аппараты с управляемой коммутацией/ Д.Ф. Алферов, Г.С. Белкин, В.П. Иванов и др. // Электро. – 2006. – № 1. – С. 14–18.
6. Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения/ Г.С. Белкин // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 3–9.
7. Синхронный вакуумный коммутатор/ А.И. Ковалев, А.Н. Филлипов, М.В. Чалый, О.И. Червинский. – № 2719006/24-07 ; заявл. 29.01.79 ; опубл. 23.11.80, бюл. № 13. – 4 с: ил
8. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с.
9. ГОСТ 32144-13 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»
10. http://kazan.ru/novosti/v-novo-savinovskom-rajjone-proizoshla-avarija-na-transformatornojj-podstancii.
11. http://790790.ru/object10202800.html?dest=window
12. ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции»
13. Характеристики уровней изоляции сетей 6–35 кВ // [Электронный ресурс] URL: www.websor.ru/harakteristika_izolycii.html
14. Барышников, Д.В. Экспресс методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий // Автореферат на соискание степ. к.т.н.. Красноярск. – 2010
15. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования:

Учеб. Пособие для узов. – 4-е изд., перераб. И доп. : Энергоатомиздат. – 1989. - 608 с.: ил.

16. Параметры силового трансформатора ТМ-1000/10/0,4. - http://www.prpte.ru/product/tm1000-10-04/