

На правах рукописи

Барышников Дмитрий Владимирович

**ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6-10 КВ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и
электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО
«Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кузьмин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Христинич Роман Мирославович

кандидат технических наук, доцент
Бастрон Андрей Владимирович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Сибирский государствен-
ный индустриальный университет (Си-
бГИУ), г. Новокузнецк

Защита диссертации состоится «05» мая 2010 г. в 14 часов на заседа-
нии диссертационного совета ДМ212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский
федеральный университет» по адресу:
660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского феде-
рального университета по адресу: г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, 26, ауд.
Г 274.

Автореферат разослан «05» апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДМ 212.099.07
канд. техн. наук, доцент

Т.М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В процессе эксплуатации изоляция высоковольтного электрооборудования технологических установок горно-металлургических предприятий испытывает негативное воздействие многочисленных факторов, в результате чего происходит снижение ее диэлектрической прочности. Это впоследствии приводит к ее частым повреждениям, простоям оборудования и экономическому ущербу.

Одним из таких факторов являются внутренние перенапряжения, в частности, коммутационные перенапряжения, поскольку имеют значительные по величине амплитуды возникающих напряжений, высокую частоту собственных колебаний и значительную первоначальную скорость нарастания импульса.

Опыт эксплуатации показал, что основной объем аварийного выхода из строя электрооборудования связан с пробоями изоляции вследствие воздействия коммутационных перенапряжений (КП). Свыше 40% однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий возникает из-за КП.

Проблема защиты изоляции высоковольтного электрооборудования от коммутационных перенапряжений приобрела наибольшую актуальность после внедрения в промышленную эксплуатацию вакуумной коммутационной аппаратуры. Во-первых, величина перенапряжений при отключении нагрузки может достигать значений, значительно превышающих диэлектрическую прочность изоляции электроустановки. Во-вторых, эти аппараты внедряются в электроустановки с частыми коммутациями. В-третьих, многократные повторные зажигания дуги в дугогасящей камере при неблагоприятных условиях могут привести к эскалации напряжения на вводах электроприемников, что сопровождается ростом кратности КП.

Данная проблема наиболее актуальна для электроприемников с пониженным уровнем прочности изоляции: двигатели, длительно находящиеся в эксплуатации или вышедшие из капитального ремонта, гибкие кабели, трансформаторы с сухой изоляцией.

В период 2000 - 2006 г. интенсивно разрабатываются эффективные средства ограничения КП, такие как ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) и RC-гасители.

Это позволило несколько снизить остроту проблемы коммутационных перенапряжений, так как снизилось число пробоев изоляции кабельных линий, однако интенсивность пробоев изоляции обмоток электродвигателей и трансформаторов остается весьма высокой.

Это в первую очередь связано, с тем, что нет эффективной методики,

позволяющей без сложных методов математического или виртуального моделирования определить величину максимальных перенапряжений в системе: выключатель – кабель – электропотребитель (электродвигатель, трансформатор) и спрогнозировать изменение величины КП в случае замены одного типа выключателей на другой или изменения параметров нагрузки.

Решение данной задачи является актуальным, так как позволит выбирать необходимые средства защиты от коммутационных перенапряжений и устанавливать их в тех местах, где будет обеспечиваться максимальная эффективность ограничителей.

Цель работы: разработка экспресс-методов оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в высоковольтной системе «выключатель – кабель – электродвигатель (трансформатор)» и обоснованный выбор средств ограничения коммутационных перенапряжений и мест их установки.

Идея работы заключается в обеспечении надежной и эффективной защиты электродвигателей и трансформаторов напряжением 6 – 10 кВ от коммутационных перенапряжений, путем обоснования выбора наиболее эффективного средства защиты и рационализацией места его установки.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ современного состояния исследований КП в системе электроснабжения 6-10 кВ промышленных предприятий и методов их оценки и прогнозирования.
2. Экспериментальные исследования перенапряжений, возникающих при коммутации электродвигателей и трансформаторов и их статистическая обработка, позволяющая выявить основные факторы, влияющие на величину и характер КП.
3. Анализ влияния длины и сечения кабельной линии на величину и характер КП.
4. Обоснование эффективности использования средств ограничения КП на основе экспресс-методов.

Объект исследования: вакуумные и масляные выключатели, асинхронные и синхронные электродвигатели, сухие и масляные трансформаторы, а так же кабельные линии, которые эксплуатируются в системах электроснабжения 6-10 кВ промышленных предприятий.

Предмет исследования: КП, возникающие в системе: выключатель – кабельная линия – электроприемник напряжением 6-10 кВ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории электрических аппаратов, электрических цепей и электрических измерений, теории систем электроснабжения промышлен-

ных предприятий, численные методы решения уравнений, методы моделирования переходных процессов в электрических системах, методы математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено, что на величину КП основное влияние оказывает совокупность следующих факторов: вид коммутации, тип и мощность электроприемника, длина и сечение кабельной линии, тип коммутационного аппарата и частота коммутационного импульса, что позволило разработать экспресс-методы оценки прогнозирования КП при коммутации электроприемников;
2. Получены экспериментальные зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для масляных и вакуумных выключателей, что позволяет оценить кратность КП на вводах электроприемников при использовании указанных типов выключателей;
3. Установлено влияние длины и сечения кабельной линии на величину и характер КП в системе «выключатель – кабель – электроприемник» в зависимости от частоты коммутационного импульса, что позволяет обосновать рациональные места установки средств ограничения КП;
4. Предложено учитывать влияние распределенной емкости кабельной линии по отношению к земле на величину КП с помощью понижающего коэффициента кратности КП на основе полученных зависимостей величины данного коэффициента от длины и сечения кабеля, связывающего выключатель с электроприемником.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны экспресс-методы оценки и прогнозирования КП, позволяющие оценить величину КП в любом месте высоковольтной системы: выключатель – кабель - электродвигатель или трансформатор, что позволяет определить точки с наибольшей кратностью КП и обоснованно выбрать необходимые средства защиты;
2. Определено, что наиболее эффективным средством защиты электродвигателей от КП является РС-гаситель, так как обеспечивает кратности КП не выше 1,8 и снижает частоту коммутационного импульса, что в свою очередь, позволяет кабельной линии частично снижать величину КП на зажимах электродвигателя;
3. Установлено, что по технико-экономическим показателям для защиты трансформаторов достаточно использовать нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), предусмотрев при этом меры по устойчивой работе ОПН в режиме однофазного замыкания на землю;

4. На основе экспресс-методов оценки КП определены рациональные места установки средств защиты от КП для электродвигателей и трансформаторов: при длине КЛ не более 50 м – ячейка выключателя, а при длине КЛ более 50 м – ввод электроприемника.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается совпадением расчетных значений КП на основе экспресс-методов и экспериментальных данных полученных при измерениях в системах электроснабжения 6-10 кВ таких предприятий как ОАО «Русал-Ачинск»; ОАО «АНПЗ ВНК»; ОАО «САЗ»; ОАО «БрАЗ»; ОАО «КрАЗ»; ФГУП «ГХК»; ООО «Красноярский цемент».

Защищаемые научные положения:

1. Полученные зависимости максимальных кратностей КП от типа и мощности электродвигателей и трансформаторов для масляных и вакуумных выключателей, позволяют оценить кратность КП на вводах электроприемников;
2. Установленные зависимости понижающего коэффициента кратности КП от длины и сечения кабельной линии позволяют оценить влияние кабельной линии на величину перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов;
3. Методы экспресс-оценки КП в системе: выключатель – кабельная линия – электроприемник напряжением 6-10 кВ, позволяют определить точки с максимальной кратностью КП в зависимости от параметров кабелей и электроприемников, частоты коммутационного импульса и обоснованно выбрать необходимые средства защиты, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации данной системы;
4. Рационализацию мест установки средств ограничения КП, основанную на использовании результатов экспресс-методов оценки и прогнозирования КП в системе: выключатель – кабельная линия – электроприемник.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, межрегиональных и региональных конференциях: I Международная научно-практическая конференция «ИНТЕХМЕТ-2008» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные материалы: получение и технологии обработки» (г. Красноярск, 2004 г.); Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2005 г.); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г. Красноярск, 2007 г.); Всероссийская научно-техническая

конференция «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин, 2005 г.); Региональная межвузовская научно-техническая конференция «Перспективные технологии» (г. Ачинск, 2006 г.).

Реализация полученных результатов: разработанные экспресс-методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений использовались при выборе средств защиты от КП электродвигателей и трансформаторов на следующих промышленных предприятиях: ОАО «Русал-Ачинск», ОАО «АНПЗ ВНК», ОАО «САЗ», ОАО «БрАЗ», ОАО «КрАЗ», ФГУП «ГХК», ООО «Красноярский цемент», за период эксплуатации с 2006 по 2010 г. не было зафиксировано ни одного случая выхода из строя электродвигателя или трансформатора по причине воздействия КП.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 9 печатных работах, из которых: 1 статья из перечня ВАК, 2 статьи в периодических изданиях, 6 статей в сборниках трудов международных и российских конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и библиографического списка из 81 наименований. Основной текст диссертационной работы изложен на 147 страницах, проиллюстрирован 45 рисунками и 37 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дается общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований, её научная новизна и практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы реализации и апробации научных результатов.

В первом разделе рассмотрен вопрос возникновения коммутационных перенапряжений, их влияния на изоляцию электроприёмников, обосновывается актуальность проблемы создания простых и эффективных методов оценки и прогнозирования КП в системе: выключатель – кабельная линия – электроприемник.

Эксплуатация электродвигателей переменного тока и трансформаторов совместно с вакуумными или масляными выключателями может привести к возникновению коммутационных перенапряжений, которые представляют опасность для изоляции статорной обмотки двигателя переменного тока. Допустимые уровни перенапряжений для двигателей переменного тока, находящихся в эксплуатации более 5 лет составляет $1,8U_{ном}$, а для трансформаторов – $2,8U_{ном}$, для электродвигателей находящихся в эксплуатации менее 5 лет допустимый уровень перенапряжений – $2,8U_{ном}$, для трансформаторов – $4,3 U_{ном}$. Максимальные перенапряжения зафиксированные при измерении

коммутационных перенапряжений значительно превышают указанный уровень.

Для эффективной защиты электрооборудования от КП, необходимо знать уровень максимально-возможных перенапряжений.

В настоящее время существуют следующие методы оценки и прогнозирования КП: экспериментальный, методы математического и физического моделирования.

Экспериментальная оценка кратности КП не всегда возможна в условиях действующего предприятия и требует значительных затрат времени.

Математическое моделирование процесса КП выполняется при определенных допущениях и сводится к составлению и решению дифференциальных уравнений в частных производных составленных по однолинейной схеме замещения: сеть – выключатель – кабельная линия – электроприемник.

Итоговые выражения математических расчетов для определения перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов в нормальном режиме или в режиме однофазного замыкания на землю, с учетом и без учета повторных зажиганий дуги в камере выключателя очень сложно использовать при оценке и прогнозировании КП для большого числа электродвигателей и трансформаторов, так как не все параметры, используемые в аналитических выражениях, имеются в паспортных данных.

Математическое моделирование позволяет исследовать основные зависимости при коммутации электрических машин, но не позволяет в полной мере оценить влияние типа и мощности нагрузки, типа коммутационного аппарата, длины и сечения кабельной линии на возникновение максимальных перенапряжений.

Оценка максимальных перенапряжений для большого количества реальных электроприемников методом физического моделирования потребует широкой вариации параметров элементов синтетической модели и не позволит учесть конструктивные особенности двигателей и трансформаторов, а также нелинейные зависимости параметров электрических машин от частоты.

Методы математического и физического моделирования не учитывают всех возможных факторов влияющих на величину КП в их случайном сочетании. Наиболее достоверные данные о величине коммутационных перенапряжений с учетом всех факторов можно получить только путем статистической обработки экспериментальных данных.

В втором разделе проведена статистическая обработка экспериментальных данных КП, выявлены основные закономерности и факторы влияющие на величину и характер КП.

В период с 1980 по 2007 г.г. на кафедре «Электрификации горно-металлургического производства» Сибирского Федерального университета и

на предприятии ООО «РУТАС» были проведены многочисленные экспериментальные исследования КП на разных типах высоковольтных электродвигателей и трансформаторов, по результатам которых получено свыше 4000 измерений КП.

На рисунках 1 и 2 показаны зависимости КП от типа коммутационного аппарата, типа и мощности электродвигателя и трансформатора. Данные графики получены по результатам статистической обработки экспериментальных данных, при этом максимальные значения КП проверены на экстремальность, доказано, что максимальные значения КП имеют закономерный характер и принадлежат к генеральной совокупности. Для определения степени влияния различных факторов на величину КП проведено сравнение выборок на однородность по критерию Пирсона, сравнению средних значений и дисперсий.

Зависимости рисунка 1 и 2 позволяют оценить кратность КП на вводах электродвигателя и трансформатора в зависимости от типа и мощности электроприемника и типа коммутационного аппарата и обосновать необходимость ограничения КП.

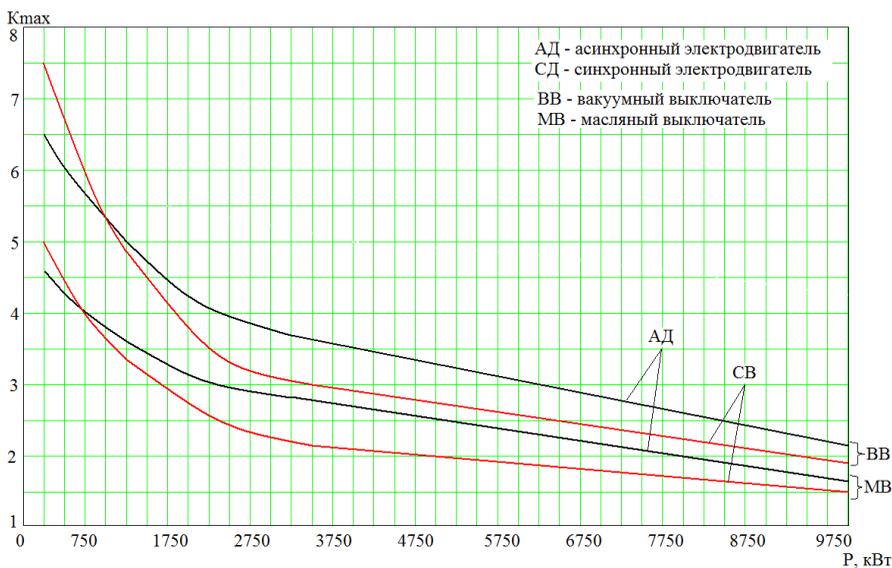


Рисунок 1 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности электродвигателя

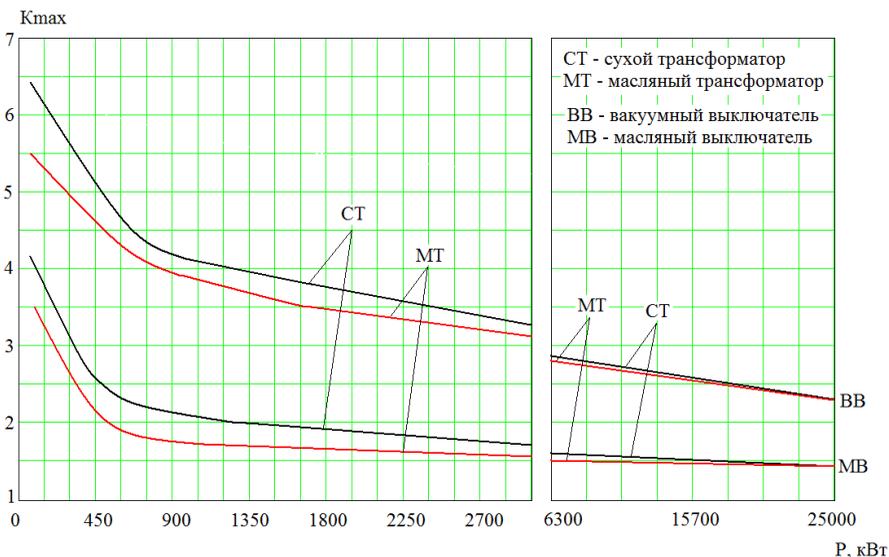


Рисунок 2 - Зависимость максимального коэффициента перенапряжения от мощности трансформатора

Выявлено, что при длине кабельной линии не более 50 м КП при коммутации электрических машин зависят от мощности и типа электрической машины, типа коммутационного аппарата. Величина КП с увеличением мощности электрической машины снижается.

Амплитуда КП, создаваемых вакуумными выключателями в 1,5-2 раза больше, чем амплитуда КП, создаваемых масляными выключателями.

Длина и сечение кабельных линий оказывают существенное влияние на величину КП, если электродвигатель коммутируется масляным выключателем. С увеличением длины и сечения кабельных линий между масляным выключателем и электродвигателем величина КП на зажимах электродвигателя уменьшается.

Длина и сечение кабельных линий практически не оказывают влияния на величину КП на зажимах электродвигателя, если последний коммутируется вакуумными выключателями, а мощность электродвигателя менее 2500 кВт. Это связано с высокой частотой коммутационного импульса (КИ) значение которой не опускается ниже 45 кГц. Если мощность электродвигателя 2500 кВт и более, то длина и сечение кабельной линии влияют на величину и характер КП, с увеличением длины и сечения кабельной линии происходит снижение величины перенапряжения.

При коммутации трансформатора любым типом выключателя длина и сечение кабельных линий оказывают существенное влияние на величину КП. С увеличением длины и сечения кабельной линии между выключателем и трансформатором величина КП на зажимах трансформатора уменьшается.

Определено, что технологические процессы, марка выключателя, материал жил высоковольтного кабеля, серия электродвигателя и трансформатора одной мощности - не влияют на величину и характер КП.

В третьем разделе приведены результаты моделирования КП в системе: выключатель – кабельная линия – электродвигатель, позволяющие оценить влияние частоты коммутационного импульса, параметров электродвигателя и кабеля на величину КП, возникающих на зажимах электродвигателя и выключателя.

В настоящее время принято считать, что кабельная линия (КЛ), связывающая выключатель и нагрузку, будет уменьшать величину КП за счет увеличения присоединенной емкости на зажимах нагрузки. В частности утверждается, что при длине кабеля более 100 м, защита электродвигателя от КП не требуется.

Однако аварийность высоковольтных электродвигателей мощностью до 2500 кВт показывает, что при их коммутации вакуумными выключателями наблюдается рост числа пробоев изоляции статорных обмоток, хотя длина кабельной линии между выключателем и электродвигателем, превышала 100 м, что подтверждается статистической обработкой экспериментальных данных.

Объяснить данный эффект можно с помощью гипотезы, которая учитывает зависимость продольного активного и индуктивного сопротивления кабеля от частоты коммутационного импульса.

Исследования показали, что при отключении электродвигателей и трансформаторов масляным выключателем, частота КИ не превышает 15 кГц. Однако при отключении электродвигателя мощностью до 2500 кВт вакуумным выключателем, частота импульса достигает значений 60÷150 кГц, т.е. возрастает в десятки раз. В этом случае увеличивается продольное индуктивное сопротивление кабеля, а за счет эффекта вытеснения тока, возрастает и продольное активное сопротивление кабеля. Это приводит к тому, что при отключении электродвигателя магнитная энергия, запасенная в обмотке статора, будет «заперта» высоким продольным сопротивлением кабеля. Следовательно, емкость колебательного контура будет обусловлена малой емкостью статорной обмотки по отношению к земле, а емкость КЛ не будут влиять на величину КП, возникающих на зажимах электродвигателя мощностью до 2500 кВт.

При коммутации вакуумным выключателем электродвигателей

мощностью 2500 кВт и выше, а так же трансформаторов частота коммутационного импульса не превышает 18 кГц. В этом случае не происходит резкого увеличения продольного сопротивления кабеля, и часть емкости кабеля будет сосредоточена на зажимах электродвигателя или трансформатора, что и приводит к ограничению амплитуды КП, т.е. длина и сечение кабельной линии будут оказывать влияние на величину КП.

Для подтверждения данной гипотезы выполнено виртуальное моделирование переходных процессов, возникающих в системе «вакуумный выключатель — кабель–электродвигатель» при отключении электродвигателя СДЭ-14-29-6 мощностью 500 кВт.

При моделировании процесса коммутации электродвигателя вакуумным выключателем учитывалось изменение параметров электродвигателя и КЛ при увеличении частоты коммутационного импульса до 100 кГц.

В ранее выполненных работах установлено, что для электродвигателя типа СДЭ-14-29-6 индуктивность фазы с изменением частоты от 10 кГц до 100 кГц уменьшается с 30 мГн до 10 мГн. Для определения значения емкости электродвигателя, задача решалась от обратного: при известных значениях максимальной кратности перенапряжений для данного электродвигателя, известной индуктивности фазы электродвигателя и величины тока среза, по выражениям (3) и (4) определен диапазон изменения емкости электродвигателя при условии, что длина кабельной линии не более 10 м, частота КИ находится в диапазоне 60-100 кГц, а максимальное перенапряжение не превышает $6,5U_{ном}$.

$$U_{max} = \sqrt{U_{\phi max}^2 + \frac{L}{C} i_0^2}, \quad (3)$$

где i_0 – ток среза, А; $U_{\phi max}$ – фазное напряжение сети, В; C – емкость электродвигателя, Ф, L – индуктивность электродвигателя, Гн.

Частота в контуре L-C определяется выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

На рисунках 4 и 5 показаны зависимости кратности КП и частоты КИ от индуктивности и емкости электродвигателя.

С учетом выполнения условий: $f_{КИ} = 60-100$ кГц и $U_{max} = 6,5U_{ном}$ емкость электродвигателя должна находиться в диапазоне $5-18$ нФ.

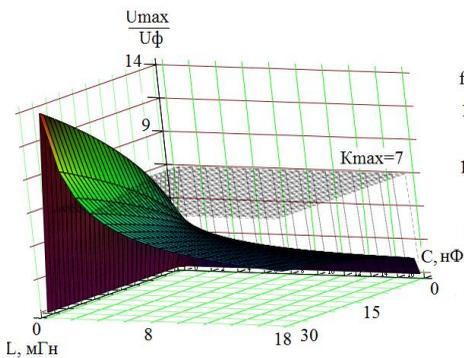


Рисунок 4 - График зависимости $U_{max} = f(L, C)$

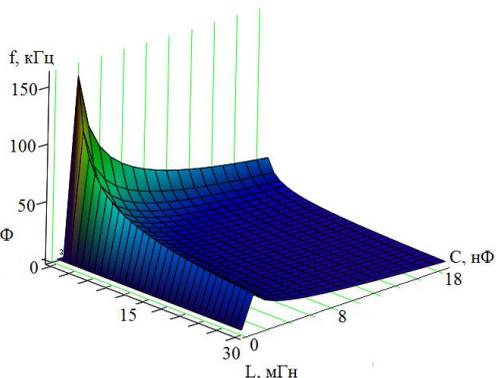
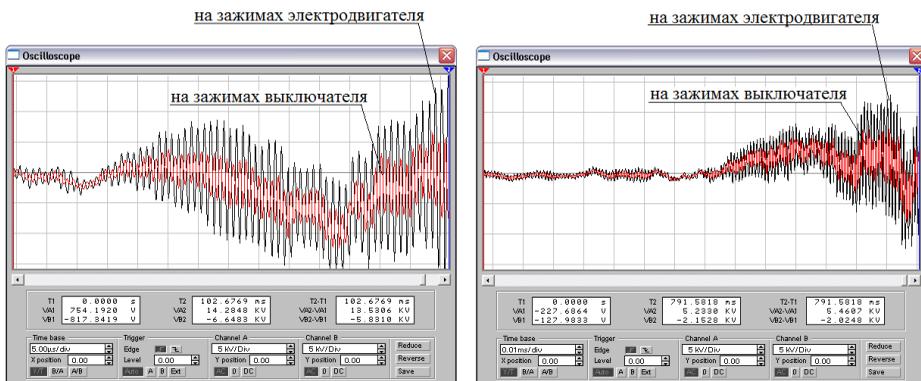


Рисунок 5 - График зависимости $f = f(L, C)$

Осциллограммы процесса отключения электродвигателя, полученная при компьютерном моделировании, для длины кабельной линии 100 и 200 м представлена на рисунке 6.

С увеличением длины кабеля, наблюдаются расхождения в переходных процессах, измеренных в начале и конце кабельной линии и по отношению к переходному процессу при длине кабеля 10 м.



а) при $l_k = 100$ м

б) при $l_k = 200$ м

Рисунок 6 - Осциллограммы процесса отключения электродвигателя СДЭ-14-29-6 вакуумным выключателем

Максимальные перенапряжения на зажимах электродвигателя, по сравнению с значениями при длине кабеля 10 м, изменяются незначительно, так при $l_k=10$ м – $K_{max}=7,4$, при $l_k=100$ м – $K_{max}=8$, при $l_k=200$ м – $K_{max}=7,6$, а снижение величины перенапряжений с ростом длины кабеля отмечается только у зажимов выключателя.

Таким образом, процессы, полученные с помощью компьютерного моделирования, согласуются с предполагаемой гипотезой и экспериментальными исследованиями.

В четвертом разделе разработаны экспресс-методы оценки и прогнозирования уровней КП в системе: выключатель - кабельная линия – электродвигатель (трансформатор), получены зависимости понижающего коэффициента кратности КП от длины и сечения кабельной линии, рассмотрен вопрос выбора эффективных устройств защиты от перенапряжений и места его установки.

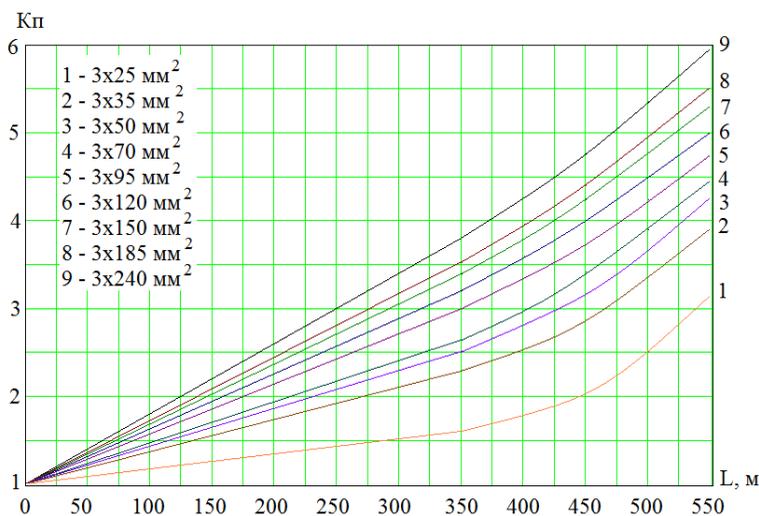


Рисунок 7 - Изменение понижающего коэффициента коммутационного перенапряжения в зависимости от длины и сечения кабельной линии

Для учета влияния длины и сечения кабельной линии на величину КП были выполнены специальные измерения. При отключении нагрузки одновременно фиксировались КП, как на зажимах электродвигателя или трансформатора, так и на зажимах выключателя.

На рисунке 7 показана зависимость понижающего коэффициента КП от длины и сечения кабельной линии. Значение данного коэффициента необходимо учитывать при оценке КП, как на зажимах двигателя, так и на зажимах выключателя.

Зная тип и мощность электродвигателя или трансформатора, тип коммутационного аппарата, длину и сечение КЛ, достаточно просто по эмпирическим формулам представленным в экспресс-методах определить величину КП на исследуемом присоединении.

Разработанные экспресс методы оценки и прогнозирования КП в системе «выключатель – кабельная линия – нагрузка» основываются на использовании зависимостей, представленных на рисунках 1, 2, 7 и влияния частоты коммутационного импульса на способность КЛ к ограничению КП.

Экспресс-методы имеют следующие алгоритмы:

Оценка коммутационных перенапряжений при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляным выключателем, а так же при коммутации электродвигателей мощностью более 2500 кВт вакуумным выключателем.

1. Величина коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя или трансформатора при отключении определяется по формуле:

$$K_{\text{П2откл.}} = \frac{K_{\text{max}}}{k_{\text{П}}}, \quad (5)$$

где K_{max} – максимальное значения коммутационных перенапряжений на зажимах электрической машины, которое выбирается по кривым, представленным на рисунках 1, 2 в зависимости от типа и мощности машины; $k_{\text{П}}$ – понижающий коэффициент, который выбирается по кривым рисунка 7 в зависимости от длины и сечения кабельной линии.

2. Величина коммутационных перенапряжений при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя определяется по формуле:

$$K_{\text{П2откл.}} = \frac{K_{\text{П2}}}{k_{\text{П}}}. \quad (6)$$

3. Величина коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя или трансформатора при включении определяется по формуле:

$$K_{\text{П2вкл}} = \frac{3.2}{k_{\text{П}}}. \quad (7)$$

4. Величина коммутационных перенапряжений в точке соединения кабельной линии и выключателя при включении определяется по формуле:

$$K_{\text{П1вкл.}} = \frac{K_{\text{П2}}}{k_{\text{П}}}. \quad (8)$$

Оценка коммутационных перенапряжений при коммутации электродвигателей мощностью до 2500 кВт вакуумным выключателем.

1. Величина коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя при отключении в точке К2 определяется по формуле:

$$K_{П2откл.} = K_{\max}. \quad (9)$$

2. Величина коммутационных перенапряжений при отключении в точке соединения кабельной линии и выключателя определяется по формуле:

$$K_{П1откл.} = \frac{K_{П2.}}{k_{П}}. \quad (10)$$

3. Величина коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя при включении определяется по формуле:

$$K_{П2вкл.} = \frac{3.2}{k_{П}}. \quad (11)$$

4. Величина коммутационных перенапряжений в точке соединения кабельной линии и выключателя при включении определяется по формуле:

$$K_{П1вкл.} = \frac{K_{П2.}}{k_{П}}. \quad (12)$$

Полученные экспресс-методами максимально-возможные кратности КП необходимо сопоставить с допустимыми значениями и при условии $K_{\max} > K_{\text{доп}}$ предусмотреть средства защиты от КП.

В настоящее время для ограничения КП используют либо ОПН либо РС-гасители.

Исследования эффективности средств защиты от КП и опыт их эксплуатации показывает, что для защиты электродвигателей необходимо использовать РС-гасители, так как их уровень ограничения КП находится в диапазоне $(1,5 \div 1,75)U_n$, что ниже допустимого значения равного $1,8U_n$.

Низкая эффективность ОПН при защите электродвигателей от КП связана: с недостаточной термической устойчивостью ОПН в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ); с невозможностью снижать крутизну переднего фронта КИ; с обнаруженным эффектом «замирания» в работе ОПН и недостаточным уровнем ограничения КП.

Статистика показывает, что термическое разрушение ОПН происходит в режиме ОЗЗ, а средняя наработка на отказ, в условиях горных предприятий, не превышает 3-х месяцев.

В ранее выполненных исследованиях показано, что высокая скорость нарастания напряжения $\frac{du}{dt}$ в момент коммутации определяет крутизну пе-

реднего фронта КИ и способствует возникновению электрического пробоя изоляции электродвигателя. Учитывая, что:

$$\frac{du}{dt} = \frac{i_0}{C}, \quad (13)$$

где i_0 - ток среза, А; C – присоединенная емкость, Ф,

ограничить крутизну переднего фронта КИ можно только за счет увеличения присоединенной емкости, то есть за счет использования RC-гасителя.

Современные ОПН позволяют ограничить КП до уровня (2,2÷2,3)Уном, что достаточно для защиты трансформаторов, но не достаточно для защиты электродвигателей.

Обнаружено, что «зона замирения» в работе ОПН возникает при коммутации электродвигателей, если частота КИ 45 кГц и выше. «Зона замирения» характеризуется тем, что на первоначальном интервале времени, не происходит ограничение амплитуды КИ, однако за данный интервал времени амплитуда импульса превышает порог срабатывания ОПН. Данное явление иллюстрируется осциллограммой, представленной на рисунке 8 и полученное при отключении асинхронного электродвигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем. Из данной осциллограммы видно, амплитуда коммутационного импульса достигла значения 31 кВ ($K_{\max}=5$), а ограничение амплитуды не происходит. Ограничение амплитуды импульса наступает по истечении некоторого промежутка времени.

Это обстоятельство в определенной мере объясняет пробой изоляции высоковольтных электродвигателей, которые эксплуатируются совместно с ОПН.

Таким образом, очевидно, что RC-гаситель обладает лучшими защитными свойствами, но имеет высокую стоимость и большие массогабариты по сравнению с ОПН. Поэтому к вопросу выбора средства ограничения необходимо подходить и с точки зрения технико-экономической эффективности.

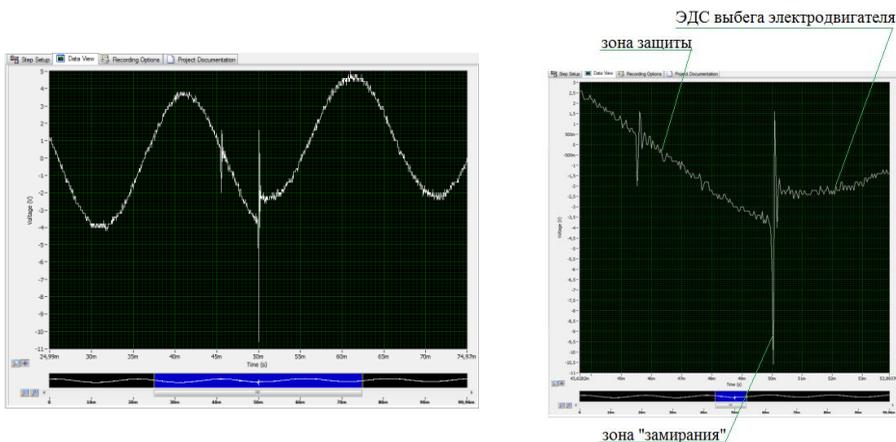


Рисунок 8 - Осциллограмма при отключении электродвигателя, с фиксацией зоны замирания в работе ОПН, при величине КП равной $2,97U_{\text{ном}}$, частота более 45 кГц

Учитывая технико-экономические показатели RC-гасителей и ОПН на рисунке 9 приведены наиболее рациональные места установки устройств защиты от КП.

Расположение устройств, ограничивающих КП, представленное на рисунке 9, позволяет комплексно подойти к защите электродвигателей, трансформаторов и разделок кабеля от КП.

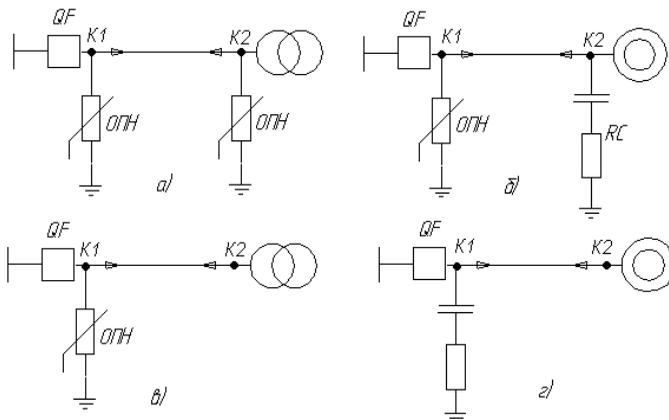


Рисунок 9 – Рациональное расположение устройств предназначенных комплексной защиты электродвигателей, трансформаторов и разделок кабеля от КП
а, б) длина кабельной линии более 15м;
в, з) длина кабельной линии 15 м и менее.

Использование ОПН, установленного в ячейке вакуумного выключателя позволяет осуществить защиту линии от воздействия внешних перенапряжений, при этом необходимо обеспечить термическую устойчивость ОПН в режиме ОЗЗ.

Реализация расположения устройств, снижающих КП, согласно схемам рисунка 9, была осуществлена в сетях 6-10 кВ угольных разрезов Красноярского края и Иркутской области, Ачинском глиноземном комбинате и Ачинском нефтеперерабатывающем заводе (ОАО «АНПЗ ВНК») и показала высокую эффективность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании экспериментальных данных и их статистической обработки выявлено, что основными факторами, влияющими на величину и характер КП являются вид коммутации, тип и мощность электродвигателя или трансформатора, длина и сечение кабельной линии и тип выключателя, исходя из чего построены зависимости между кратностью КП и мощностью электрической машины, позволяющие оценить уровень КП на вводах разных типов электродвигателей и трансформаторов при их отключении масляным или вакуумным выключателем.
2. Установлено, что при отключении электродвигателей или трансформаторов частота КИ может изменяться от 2,5 кГц до 130 кГц и зависит от типа выключателя, типа и мощности электроприемника, что позволяет оценить влияние длины и сечения кабельной линии на кратность КП возникающих как на зажимах электроприемника, так и на зажимах выключателя.
3. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование КП в системе «выключатель - кабельная линия – электроприемник» показали, что при отключении электродвигателей мощностью не более 2500 кВт вакуумным выключателем частота КИ не опускается ниже 45 кГц, что не позволяет кабельной линии влиять на величину КП, возникающих на зажимах электродвигателя, величина которых может превышать напряжение сети в 6,5 раз.

4. Доказано, что при коммутации электродвигателей и трансформаторов масляным выключателем, а так же при отключении трансформаторов любой мощности и электродвигателей 2500 кВт и более вакуумным выключателем частота КИ не превышает 45 кГц, что позволяет частично ограничивать КП на вводах электродвигателей и трансформаторов за счет емкости кабельной линии, влияние которой на ограничение КП оценивается с помощью понижающего коэффициента кратности КП.
5. Разработанные экспресс-методы оценки и прогнозирования КП в системе «выключатель – кабельная линия – электроприемник» на основе типа и мощности электроприемника, длины и сечения кабельной линии и типа выключателя, позволяют в короткий срок оценить кратности КП в любой точке данной системы, что делает возможным выбор необходимых средств защиты от КП и рационализацию места их установки для эффективного ограничения КП.
6. Исходя из технико-экономических показателей обосновано, что для защиты высоковольтных электродвигателей от КП необходимо использовать РС-газители, а при защите трансформаторов достаточно использовать ОПН, предусмотрев при этом специальные меры по термической устойчивости ОПН в режиме ОЗЗ, что позволит обеспечить кратности КП не превышающие допустимых значений.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горно-добывающих предприятий [Текст] / Д.В. Барышников, С.В. Кузьмин, Е.В. Гаврилова // Горное оборудование и электромеханика. - 2009. - №2. - 41 с.
2. Барышников Д.В. Обзор естественных и искусственных методов и средств ограничения коммутационных перенапряжений [Текст] / Д.В. Барышников, Д.А. Скакунов // Фундаментальные исследования. – 2005. - №3. – 52 с.
3. Барышников Д.В. Исследование качества электрической энергии в сетях электроснабжения цеха первичной переработки нефти ОАО «Ачинский нефтеперерабатывающий завод» [Текст] / Д.В. Барышников, Д.А. Скакунов // Фундаментальные исследования. – 2005. - №3. – 57 с.
4. Барышников Д.В. Коммутационные перенапряжения в узлах электрических нагрузок напряжением 6-35 кВ металлургических предприятий и способы их эффективного ограничения [Текст] / Д.В. Барышников, В.А. Меньши-

- ков, В.В. Дементьев, Р.А. Майнагашев // ИНТЕХМЕТ-2008: сб. науч. тез. и докл. I Международ. науч.-практ. конф. - Санкт-Петербург, 2008. – С. 74.
5. Барышников Д.В. Экспресс метод оценки коммутационных перенапряжений [Текст] / Д.В. Барышников, С.В. Кузьмин // Перспективные технологии: сб. науч. тр. - Ачинск, 2006. – С. 71-72.
6. Барышников Д.В. Эффективность средств защиты от коммутационных перенапряжений в высоковольтных сетях угольных разрезов [Текст] / Д.В. Барышников, С.В. Кузьмин // Перспективные технологии: сб. науч. тр. - Ачинск, 2006. – С. 84-85.
7. Барышников Д.В. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / Д.В. Барышников // Перспективные материалы, получение и технологии обработки: сб. науч. тр. - Красноярск, 2004. – С. 143-146.
8. Барышников Д.В. Влияние параметров схемы электроснабжения на величину коммутационных перенапряжений [Текст] / Д.В. Барышников // Инновационные технологии в обучении и производстве: сб. науч. тр. - Камышин, 2005. – С. 191-192.
9. Барышников Д.В. Влияние кабельной линии на величину и характер коммутационных перенапряжений [Текст] / Д.В. Барышников // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. - Новосибирск, 2005. – С.311-313.

Барышников Дмитрий Владимирович
**Экспресс-методы оценки и прогнозирования
коммутационных перенапряжений в системах
электропитания 6-10 кВ промышленных предприятий**
Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.04.2010. Заказ №__
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Прикладные технологии»
662972, г. Железногорск, ул.Комсомольская, 25а