

На правах рукописи



КОПЫЛОВ РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕР,
ПОВЫШАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ
СЕТЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2003

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор, Кадомская
Кира Пантелеймоновна

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор, Дульзон
Альфред Андреевич

кандидат технических наук,
Хныков Владимир
Анатольевич

Ведущая организация – ООО “ВНИИГАЗ”, г. Москва

Защита диссертации состоится 26 июня 2003 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете (630092, Новосибирск, пр-т К. Маркса 20, НГТУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



И.П. Тимофеев

2003-А
10949

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Надежная эксплуатация электрических и компрессорных станций в значительной степени зависит от безотказной работы электрооборудования сети собственных нужд (СН), в том числе высоковольтных двигателей. Согласно опубликованным данным примерно от 4 до 12 % установленных двигателей выходит из строя в течение года. Анализ отказов показывает, что их доля из-за перенапряжений составляет 2,5-4 % от общего числа поврежденных двигателей, т.е. эта доля не столь велика. Однако воздействие перенапряжений может привести к преждевременному старению изоляции и выходу двигателя из строя по другим причинам (работа в условиях загрязнения и увлажнения, повышенной температуры и т.д.).

Из-за старения повреждается дополнительно примерно 5-8 % установленных двигателей ежегодно. Повреждения отдельных электродвигателей приводят иногда к последующему выходу из строя нескольких электродвигателей вследствие опасных перенапряжений на сборных шинах.

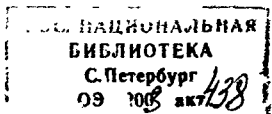
Основными видами перенапряжений в сетях собственных нужд электрических и компрессорных станций являются:

- Перенапряжения при дуговых однофазных замыканиях на землю.
- Перенапряжения, возникающие при коммутациях включения и отключения присоединений с электрическими двигателями;

Перенапряжения, возникающие при однофазных дуговых замыканиях, охватывающие все электрооборудование, подключенное к секции СН, существенно зависят от режима заземления нейтральной точки сети собственных нужд. На кратности коммутационных перенапряжений, зона охвата которых ограничена коммутируемым присоединением, режим заземления нейтрали сети практически не оказывает влияния.

В последние годы вопросам анализа и защиты от перенапряжений в сетях средних классов напряжения, к которым относятся и сети 6, 10 кВ электрических и компрессорных станций, уделяется достаточно большое внимание. Существенный вклад в решение этой задачи внесли Г.А. Евдокунин, Ф.Х. Халилов, А.И. Таджибаев, А.А. Челазнов и др. Однако, однозначного мнения по мерам обеспечения надежной эксплуатации изоляции оборудования этих сетей в настоящее время еще нет. Это, в частности, касается и вопроса заземления нейтрали таких сетей: сети эксплуатируются как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через низкоомные или высокоомные резисторы. Внедрение в сети новой коммутационной аппаратуры, в частности, вакуумных выключателей (ВВ), поставило также задачу оптимизации мер защиты от коммутационных перенапряжений – анализа ниш преимущественного использования нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и RC-цепочек.

Очевидно, что решение сформулированных задач должно опираться на разумное сочетание экспериментальных исследований и исследований, проводимых с помощью математических моделей. При этом математические



модели постепенно усложняются, что обусловлено как появлением новых экспериментальных данных (например, повреждений электрооборудования при внедрении вакуумных выключателей), так и умощнением вычислительной техники.

В работе предпринята попытка комплексного подхода к разработке методов и средств, обеспечивающих надежную эксплуатацию изоляции электрооборудования сетей собственных нужд электрических станций различного типа (ТЭЦ и АЭС), а также компрессорных станций, входящих в состав магистральных газопроводов. Каждый из этих объектов исследования имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при решении поставленной задачи.

Основная цель настоящей работы: разработка системы мер, обеспечивающих надежную эксплуатацию изоляции электрооборудования сетей собственных нужд ТЭЦ, АЭС и компрессорных станций с учетом структуры этих сетей.

Для достижения поставленной цели в работе **сформулированы и решены следующие задачи:**

- разработаны математические модели, реализованные в виде программ на ЭВМ, позволяющие исследовать перенапряжения как при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ), так и при включениях и отключениях присоединений с двигателями. В моделях предусмотрена возможность воспроизведения распределенных параметров кабелей присоединений и статорной обмотки двигателей;
- проанализированы электромагнитные переходные процессы применительно к АЭС с целью выбора оптимальной величины сопротивления резистора в нейтральной точке сети и места установки трансформаторов, выделяющих нейтраль, при питании ССН как от рабочего, так и от резервного источников питания;
- проанализированы процессы, возникающие при включении двигателей, с целью выбора защитных устройств и их параметров в сетях СН в том числе и в схемах с токоограничивающими реакторами;
- проанализированы процессы, возникающие при отключении присоединений с электродвигателями (ЭД) вакуумными выключателями, позволившие установить связь уровней перенапряжений с параметрами вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) и параметрами присоединений с ЭД и наметить рациональные меры защиты;
- сформулированы требования к комплексу аппаратных мер, позволяющих обеспечить надежную эксплуатацию изоляции сетей собственных нужд электрических станций и высоковольтного электрооборудования компрессорных станций.

Научная новизна основных положений и результатов работы может быть сформулирована следующим образом.

- Проведенный анализ электромагнитных процессов при коммутациях в системе кабель-высоковольтный двигатель; показал, что исследование переходных процессов без учета распределенности параметров этих элементов

приводит к занижению кратностей перенапряжений, воздействующих на статорную изоляцию двигателя.

- Показано, что наличие в схемах присоединений токоограничивающих реакторов приводит к снижению уровня неограниченных перенапряжений, сопровождающих коммутации включения и отключения присоединений, а, следовательно, и к облегчению условий эксплуатации аппаратных защитных мер.

- Показано, что кратности перенапряжений на главной и витковой изоляции статорной обмотки двигателей можно ограничить до допустимого уровня путем установки ограничителей перенапряжений непосредственно у электродвигателя. При установке ограничителя на присоединении непосредственно за выключателем добиться приемлемого уровня ограничения перенапряжений можно лишь в случае достаточно коротких кабелей (длиной примерно до 30-40 м).

- Определена область эффективного использования RC-цепочки для защиты от перенапряжений при коммутациях. Показано, что с помощью цепочки при включении двигателя можно обеспечить надежную защиту статорной изоляции двигателя лишь при отсутствии разброса в действии полюсов выключателя, а при отключении - при отсутствии повторных дуговых пробоев межконтактного промежутка в выключателе. При этих условиях осуществления коммутаций электромагнитный переходный процесс характеризуется лишь одной определяющей частотой собственных колебаний.

- Разработана аналитическая методика, подтвержденная вычислительными экспериментами, позволившая установить функциональную связь вероятности повторных зажигания дуги в выключателе и, следовательно, эскалации перенапряжений при отключении вакуумным выключателем электродвигателей, с параметрами вакуумных дугогасительных камер и присоединений с двигателями. С помощью полученного выражения, отражающего эту связь, можно оценить как эффективность мер для ограничения перенапряжений, так и выдвинуть требования к основной характеристике вакуумной камеры – скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка после погасания дуги.

Практическая значимость результатов работы:

- Для расчетов переходных процессов, сопровождающих однофазные дуговые замыкания на землю и коммутации включения и отключения электродвигателей в схемах собственных нужд станций различной структур, создан программный комплекс, позволяющий учитывать распределенность параметров кабелей и статорной обмотки двигателей.

- Сформулированы требования к комплексу защитных мер, обеспечивающих надежную эксплуатацию изоляции электрооборудования при внутренних перенапряжениях в ССН электрических станций и в электрических сетях компрессорных станций, а также позволяющих осуществлять селективное распознавание поврежденного присоединения с электродвигателем.

Достоверность результатов работы основывается на:

- хорошем согласии результатов аналитического анализа в упрощенных схемах замещения с результатами соответствующего компьютерного исследования, проводимого с применением достаточно полных математических моделей, описывающих переходные процессы при ОДЗ и при коммутациях присоединений с ЭД;

- хорошем согласии ряда расчетов с экспериментальными данными, полученными другими исследователями, в том числе и сотрудниками каф. ТиЭВН НГТУ.

Апробация работы и публикации. Отдельные результаты работы и работа в целом обсуждались на семинарах каф. ТиЭВН и факультета Энергетики НГТУ, а также на Всероссийских и международных конференциях в Новосибирске, Томске и Санкт-Петербурге. По теме диссертации в периодической научно-технической литературе опубликовано 5 статей.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников (34 наименования) и четырех приложений. Работа проиллюстрирована 30 таблицами и 57 рисунками.

В первом разделе рассматриваются структуры сетей собственных нужд ТЭЦ, АЭС и компрессорных станций, приводятся характеристики основного электрооборудования и излагается методика определения параметров, входящих в математические модели исследуемых электромагнитных переходных процессов.

Во втором разделе анализируется эффективность высокоомного резистивного заземления нейтральных точек сети на примере сети СН АЭС, характеризуемой различной структурой при рабочем и резервном питании секций «для ограничения перенапряжений, возникающих в процессе однофазного дугового замыкания на землю (ОДЗ);

В третьем разделе посвященном исследованию перенапряжений, возникающих при включениях присоединений с ЭД в различных эксплуатационных режимах с учетом возможного разброса в действии полюсов выключателя, в качестве основной меры защиты предлагается установка на всех присоединениях ОПН и производится оценка требуемой энергоемкости этих аппаратов;

В четвертом разделе рассматриваются аспекты, связанные с отключением присоединений вакуумными выключателями; анализируется влияние на процессы как параметров ВДК, так и самих присоединений. Оценивается сравнительная эффективность ОПН и РС-цепочек, устанавливаемых на присоединениях, и связь этой эффективности с параметрами ВДК.

Положения, выносимые на защиту:

- обеспечение надежной эксплуатации электрооборудования сетей собственных нужд электрических и компрессорных станций различной структуры может быть достигнуто при комплексном применении высокоомного резистивного заземления нейтральных точек секций сети и нелинейных ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на каждом присоединении;

- обеспечение надежной эксплуатации изоляции электрооборудования ССН АЭС при питании общеблочных секций (ОБС) как от рабочего, так и от резервного трансформаторов собственных нужд достигается путем заземления нейтрали специальных трансформаторов, установленных на ОБС, с помощью резисторов с сопротивлением порядка 500-600 Ом;

- для обеспечения достоверных результатов при анализе перенапряжений, характеризующихся высокими частотами собственных колебаний (например, при отключении ЭД вакуумным выключателем) необходим учет распределенности параметров как кабелей присоединений с ЭД, так и обмотки статора двигателя;

- защита изоляции статора ЭД при коммутациях присоединений должна быть возложена на ОПН второй группы по энергоемкости. При длине кабелей присоединений, превышающей 30-40 м, ОПН должны устанавливаться непосредственно у двигателя.

- эффективное использование RC-цепочки на присоединениях с ЭД возможно лишь при коммутациях, характеризующихся возникновением опасных перенапряжений на одной определяющей частоте собственных колебаний. Такие процессы возникают при включении ЭД при малом разбросе в действии полюсов выключателя, а при отключении ЭД с помощью вакуумного выключателя при отсутствии повторных зажиганий дуги в ВДК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Характеристики сетей собственных нужд электрических станций и электрических сетей компрессорных станций.

Системы питания собственных нужд электрических станций различного назначения, а также электрических сетей компрессорных станций на магистральных газопроводах имеют близкую структуру, так как обеспечивают, в основном, питание электрических двигателей, используемых в соответствующем технологическом процессе. Однако назначение электрических сетей обуславливает некоторые особенности в их компоновке, что приводит к необходимости более детального анализа перенапряжений того или иного вида в зависимости от назначения сети.

Перенапряжения, воздействующие на изоляцию оборудования рассматриваемых сетей можно подразделить на два основных вида:

- перенапряжения, охватывающие все электрооборудование сети, возникающие при однофазных дуговых замыканиях на землю;

- перенапряжения, зона действия которых распространяется на отдельные присоединения, возникающие при коммутациях присоединений с двигателями.

Первый вид перенапряжений существенно связан с режимом заземления нейтрали сети. Поэтому обеспечение надежной эксплуатации

электрооборудования при ОДЗ в большой мере зависит от сложности сети и наличия или отсутствия резервного питания механизмов собственных нужд.

Перенапряжения, возникающие при коммутациях двигателей, зависят в основном, от параметров присоединений с двигателями – от протяженности кабелей и мощности двигателей. В случае достаточно мощных двигателей последние присоединяются к шинам секций электрической сети через токоограничивающие реакторы. Это обстоятельство приносит некоторые особенности в протекание электромагнитных процессов, сопровождающих, в частности, включение двигателей.

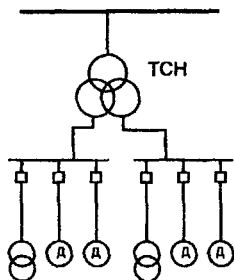


Рис.1 Упрощенная схема питания сети собственных нужд ТЭЦ

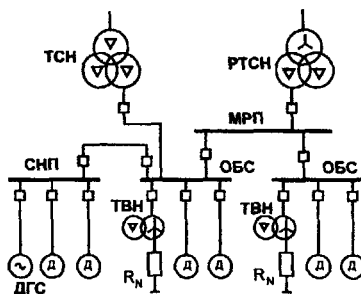


Рис.2 Фрагмент сети собственных нужд АЭС

Вопросы, связанные с отключением присоединений вакуумными выключателями рассматривались применительно к ССН ТЭЦ, так как в настоящее время именно в этих сетях практикуется замена электромагнитных и масляных выключателей на вакуумные. Принципиальные схемы рассмотренных сетей приведены на рис.1-3.

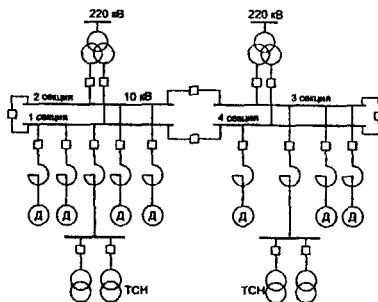


Рис.3 Принципиальная схема электрической сети КС

Перенапряжения при однофазных дуговых замыканиях на землю.

Схема замещения для компьютерного исследования перенапряжений при однофазном дуговом замыкании на землю представлена на рис.4.

Перенапряжения, возникающие в сетях с изолированной или заземленной через дугагасящий реактор (ДГР) нейтралью, могут превышать допустимый для статорной изоляции двигателя уровень. В качестве характеристики электрической прочности статорной изоляции двигателя принималось испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты,

прикладываемое к изоляции при ее профилактических испытаниях, т.е. $1,7U_{ном}=2,95U_{фт}$.

Если ориентироваться на систему защиты от перенапряжений сетей собственных нужд лишь с помощью специальных аппаратов типа ОПН, то можно рассматривать такие варианты мест установки аппаратов: на всех присоединениях; на секциях и на присоединениях.

Оба эти варианта при необходимости ограничения перенапряжений, возникающих при ОДЗ, имеют свои недостатки. **Первый вариант** установки ОПН лишь на присоединениях за выключателями приводит по-существу к «распределенному» ОПН при ОДЗ. В этом случае требуется соблюдение точной настройки вольтамперных характеристик (ВАХ), так как при несоблюдении этого требования при ОДЗ будет «срабатывать» тот ОПН, ВАХ которого ниже, чем у остальных. Следовательно, потребуется устанавливать ОПН высокой удельной энергоемкости, что вряд ли экономически оправдано. Добиться же полного совпадения ВАХ аппаратов согласно данным их производителей практически невозможно.

Второй вариант предполагает установку ОПН на шинах и на присоединениях. В этом варианте необходима также координация между ВАХ ОПН, установленных на шинах и на присоединениях. Исследования, проведенные применительно к ТЭЦ 3 Новосибирскэнерго показали, что требуемая координация ВАХ ОПН, установленных на шинах и на присоединениях, приводит к необходимости снижения уровня ограничения ОПН на шинах по отношению к уровню ограничения ОПН на присоединениях примерно на 10-15%. Такое требование приводит к увеличению энергоемкости аппарата, установленного на шинах и не исключает полностью требования отсутствия разброса в ВАХ ОПН, установленных на присоединениях.

Поэтому наиболее рациональным вариантом является **третий вариант** – оснащение нейтральной точки сети резистором, при котором перенапряжения при ОДЗ не превышают уровня допустимого для изоляции электродвигателей.

Величину сопротивления резистора целесообразно выбирать, исходя из практического разряда емкости сети через сопротивление в нейтрали за время порядка половины периода промышленной частоты. Перенапряжения в этом случае не превысят опасного уровня.

Оснащение сети резисторами затрагивает следующие эксплуатационные режимы и процессы:

- стационарные режимы однофазного замыкания на землю (ОЗЗ),

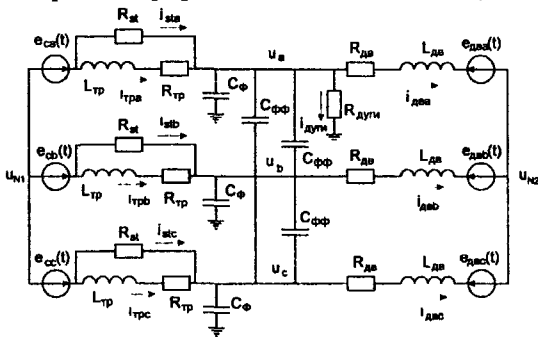


Рис.4 Схема замещения секции сети при ОДЗ

- переходные процессы, сопровождающие ОДЗ.

При решении вопроса о целесообразности низкоомного или высокоомного сопротивления заземления нейтрали необходимо также принимать во внимание возможность обеспечения чувствительной и селективной защиты при соединении с ЭД при ОЗЗ.

Очевидно, что оснащение нейтрали низкоомным сопротивлением более надежно решает эту последнюю задачу. Однако протекание больших активных токов в месте замыкания на землю при низкоомном сопротивлении может привести к нарушению тепловой устойчивости электрооборудования и к его повреждению.

Величина тока замыкания при этом, в основном, определяется активной составляющей тока замыкания на землю, т.е. величиной сопротивления резистора в нейтрали. При малой величине сопротивления резистора повышается вероятность расплавления стали статора двигателя даже при быстром отключении аварии (неудачный опыт внедрения низкоомного сопротивления на восьми блоках 500 МВт Рефтинской ГРЭС). При таком большом токе также теряется основное преимущество режима изолированной нейтрали – эксплуатация оборудования при ОЗЗ в течение некоторого времени. При высокоомном же сопротивлении заземления нейтральной точки сети токи замыкания существенно снижаются, однако, требование селективного распознавания поврежденного присоединения, как правило, выполняется.

Перенапряжения, возникающие при включении двигателя.

Перенапряжения, возникающие при включении присоединений с двигателями зависят от условий включения и могут классифицироваться следующим образом:

- включение заторможенного двигателя,
- включение двигателя в процессе автоматического повторного включения (АПВ),
- включение в цикле АВР (автоматического ввода резерва),
- включение на неустраненное металлическое замыкание в тех схемах, в которых защита двигателя от замыканий на землю срабатывает не на отключение, а на сигнал.

Расчетная схема для компьютерного анализа перенапряжений при учете разброса в действии полюсов выключателя приведена на рис.5.

Анализ этой схемы показывает, что переходный процесс определяется составляющими двух частот. Средняя частота собственных колебаний на двигателе определится как $\omega_{01} = 1/\sqrt{L_d C_\phi}$. Высокая частота собственных колебаний будет $\omega_{02} \approx 1/\sqrt{(L_k + L_{TR})C_\phi}$. Средние частоты собственных колебаний лежат в диапазоне от одного до десяти килогерц, высокие же частоты достигают значений от нескольких десятков до четырех сотен килогерц. В случае включения двигателя, присоединенного к шинам через токоограничивающий реактор, частоты собственных колебаний уменьшаются:

высокая частота принимает значения от 10 до 20 кГц, средняя – единицы килогерц.

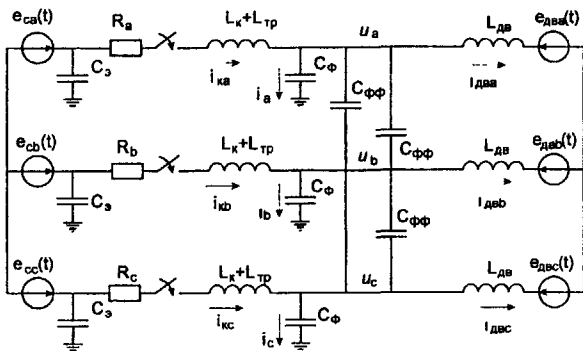


Рис.5 Расчетная схема для исследования перенапряжений, возникающих при включении двигателя с учетом разброса в действии полюсов выключателя

Перенапряжения при симметричном включении полюсов выключателя определяются высокочастотной составляющей и при включении заторможенного двигателя не превосходят двукратных. Существенно большие кратности перенапряжений могут возникнуть при самозапуске двигателей, так как в этом случае векторы напряжений на шинах секции и на электродвигателе в момент включения могут находиться в противофазе. Экспериментальными исследованиями установлено, что при перерывах питания двигателей в течение времени действия АВР порядка $0.5 \dots 0.6$ с величина остаточной сверхпереходной э.д.с. составляет примерно $0.5 \dots 0.8 U_{\text{фн}}$.

Так как сети СН ЭС эксплуатируются в режиме изолированной нейтрали, то, в течение некоторого времени, возможна их работа с замыканием на землю одной из фаз. В течение этого времени возможны коммутации включения и отключения присоединений, как для поиска места повреждения, так и из-за ошибок обслуживающего персонала. Максимальное переходное напряжение в этом случае определяется не только максимумами ЭДС системы и двигателя, но и напряжением на нейтрали в этот момент времени.

При учете разброса в действии полюсов выключателя наибольшие перенапряжения наблюдаются при включении второй по очереди фазы, если её включение происходит в момент достижения максимума напряжения на первой включаемой фазе.

В табл.1 сведены перенапряжения на двигателе при различных условиях его включения.

Как видно из таблицы, коммутации при разбросе в действии полюсов выключателя, что характерно для эксплуатации, сопровождаются перенапряжениями, превышающими допустимый уровень для статорной изоляции двигателя. Отсюда следует необходимость установки защитного аппарата на каждом присоединении с двигателем.

Таблица 1

Максимальные кратности перенапряжений, возникающих при включении двигателей

Условия включения	Одновременное включение фаз	Включение фаз с разбросом
Включение заторможенного двигателя	2.0	3.0
Включение двигателя при АВР	2.8	4.7
Включение двигателя при ОЗНЗ в сети	3.3	3.2

При защите двигателя с помощью ОПН типа МКВ-5 производства предприятия АВВ-УЭТМ перенапряжения на двигателе составили величину $2.5U_{\text{фmax}}$ (рис.6). Энергия, поглощенная ОПН в процессе включения, составила 9,5 кДж, приведение ее к максимально допустимому рабочему напряжению (МДРН) дает величину $W_{\text{уд}}=1,9$ кДж/кВ. Максимальные перенапряжения при защите двигателя с помощью аппарата типа ОПН-6/5,5-10(II) производства АО «Феникс-88» составили величину $2.6U_{\text{фmax}}$; удельная энергия, поглощаемая ОПН в процессе коммутации, – 1,3 кДж/кВ. Перенапряжения на двигателе снижаются до безопасного уровня при удельной поглощаемой энергии в процессе коммутации, не превышающей 2 кДж/кВ, что отвечает второй группе аппаратов по энергоемкости.

Исследования, проведенные при установке на присоединении RC-цепочки, показали недостаточную эффективность этой меры. Это объясняется присутствием в напряжении на двигателе двух составляющих – высокочастотной и среднечастотной, со значительно различающимися частотами (десятки и сотни кГц). Эффективное же использование RC-возможно лишь в процессах, характеризующихся одной определяющей переходной составляющей.

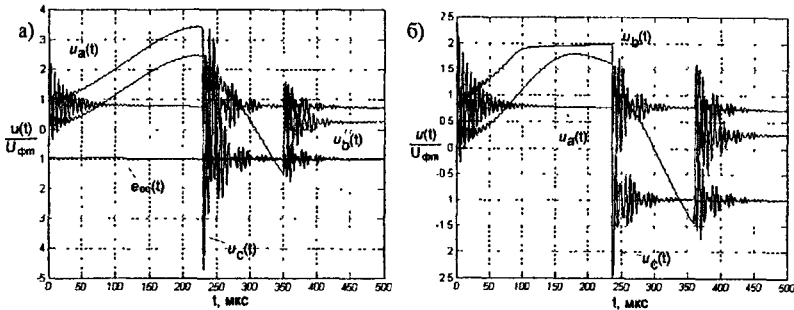


Рис 6 Процессы при включении двигателя а) без защитных аппаратов, б) при установке ОПН

Перенапряжения при отключении заторможенных двигателей вакуумными выключателями и их ограничение

Горение дуги в вакуумных выключателях сопровождается интенсивным отводом тепла с ее поверхности. Это приводит к неустойчивому горению (и обрыву) дуги при малых мгновенных значениях токов, когда отключаемый ток промышленной частоты приближается к нулевому значению.

Опыт эксплуатации вакуумных выключателей (в том числе и за рубежом) показывает, что процесс отключения может сопровождаться несколькими повторными зажиганиями, в процессе которых на изоляции коммутируемого присоединения возникают перенапряжения, которые могут превысить допустимый уровень.

Исследуемые процессы определяются тремя основными характеристиками вакуумной дугогасительной камеры (ВДК): током среза ($i_{ср}$), скоростью восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка (K) и максимальной скоростью прохождения полного тока через нулевое значение, когда еще возможен его обрыв в вакуумной камере (di/dt_{max}). Все эти характеристики носят случайный характер, который учитывался при проведении исследований. В случае высокой скорости восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка и отсутствии повторных зажиганий дуги в ВДК максимумы перенапряжений будут определяться током среза и параметрами отключаемого присоединения – мощностью двигателя и емкостью кабеля. При выполнении работы были обработаны данные по величинам токов среза в ВДК производства ОАО «ЭЛКО» и предприятия «Таврида Электрик».

Анализ данных показывает, что математическое ожидание токов среза для разных камер лежит в диапазоне 2.3...3.6 А. При проведении расчетов можно принять максимальный ток среза равным 7 А. Среднее значение тока среза, вероятность превышения которого составляет 0.05, может быть принято равным 6,3 А.

Несомненный интерес представляет анализ процессов при первичном обрыве тока в ВДК с целью установления вероятности повторного зажигания дуги в ВДК. Этот анализ может быть проведен в простейшей расчетной схеме рис.7.

При отсутствии повторных зажиганий дуги в ВДК, напряжение как на двигателе, так и между контактами выключателя

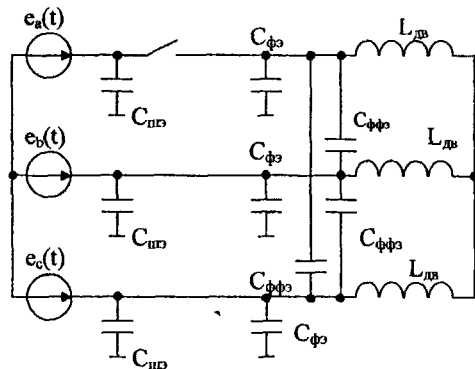


Рис 7 Упрощенная расчетная схема при отключении тока промышленной частоты с помощью вакуумного выключателя

носит колебательный характер с частотой от 1 до 10 кГц.

Максимум перенапряжений на двигателе зависит от параметров отключаемого присоединения и тока среза. При малых длинах кабеля и маломощных электродвигателях перенапряжения могут превысить допустимый уровень.

После обрыва дуги в вакуумной камере начинается “соревновательный” процесс между переходным восстанавливающимся напряжением (ПВН) на контактах ВВ, определяемым параметрами коммутируемого присоединения, и растущей диэлектрической прочностью межконтактного промежутка, определяемой параметрами коммутирующего выключателя. При достижении ПВН прочности межконтактного промежутка происходит его пробой.

Зная параметры вакуумной дугогасительной камеры и отключаемого присоединения, можно оценить вероятность появления повторных зажиганий дуги в ВДК в процессе коммутации:

$$P = 3 \cdot \left(\frac{U_{\text{восстmax}}}{K} - \frac{\pi - \arccos(i_{\text{ср}} / I_m)}{2\pi \cdot f_k} \right) / 0.01,$$

где $U_{\text{восстmax}}$ - максимальное переходное восстанавливающееся перенапряжение на контактах выключателя. Расчеты показали, что вероятность повторных пробоев в ВДК при скорости восстановления диэлектрической прочности дугового промежутка 40...60 кВ/мс составляет 0,04...0,10.

Повторные зажигания дуги в вакуумной камере приводят к появлению высокочастотной составляющей в напряжении на двигателе. Её частота может достигать нескольких сотен килогерц. При высоких частотах кабель необходимо представлять как элемент с распределенными параметрами, моделью которого может быть последовательное соединение П-образных ячеек.

Целью исследований кроме определения перенапряжений на изоляции статора на входе двигателя относительно земли была произведена оценка перенапряжений на витковой изоляции обмотки статора, а также на изоляции обмотки относительно земли в её промежуточных точках. Для этого двигатель моделировался в виде цепочечной схемы с Г-образными ячейками. В мощных двигателях катушки обмотки укладываются в отдельных пазах, в связи с чем взаимными емкостями и индуктивностями между отдельными частями обмотки можно пренебречь. Поэтому Г-ячейка состояла из продольной индуктивности и емкости на землю. Междупазная емкость двигателя учитывалась только в первой ячейке цепочечной схемы замещения.

Кратности перенапряжений на статорной изоляции двигателя при его отключении, сопровождающемся эскалацией перенапряжений, могут достигать значительных величин (до $U_{\text{двmax}} = 7.0U_{\text{фm}}$).

Высокочастотный процесс является причиной появления в обмотке двигателя свободных колебаний, приводящих к изменению распределения напряжения вдоль обмотки двигателя. Неравномерность распределения напряжения по обмотке приводит к появлению на отдельных частях обмотки

значительных перенапряжений, которые могут привести к повреждению или ускорению процесса её старения.

Наибольшая неравномерность напряжения приходится на начало и конец обмотки. Напряжение на первых витках обмотки может превышать напряжение на входе обмотки. Отсюда очевидна опасность рассматриваемой коммутации для витковой изоляции, что приводит, как показала практика, к ее достаточно частым пробоям при коммутации двигателей вакуумными выключателями.

Необходимо также отметить, что повышенные уровни перенапряжений наблюдаются и на изоляции в средней части обмотки относительно земли. Так, максимумы перенапряжений в середине обмотки превышают максимумы в начале обмотки примерно в 2 раза.

В случае повторных зажиганий дуги в выключателе, как правило, требуется защита изоляции электродвигателей от опасных перенапряжений. Защита также требуется и при отсутствии повторных зажиганий в случае отключения коротких присоединений с маломощными двигателями.

Применение ОПН позволяет снизить перенапряжения на статорной изоляции двигателя до допустимых значений. При этом необходимо отметить обязательность установки ограничителя у двигателя, в противном случае, при длине кабеля свыше 40...60 м напряжение на двигателе превысит допустимый уровень для статорной изоляции. При применении ОПН максимальные перенапряжения на первых витках статорной обмотки оказались практически равными максимальным перенапряжениям на входе двигателя. Отсюда можно сделать вывод, что при установке ОПН у двигателя снижаются не только перенапряжения на статорной изоляции двигателя относительно земли, но и на витковой изоляции.

Использование в качестве меры защиты RC-цепочки приводит к снижению перенапряжений на двигателе при отсутствии повторных зажиганий дуги в ВДК, а также к снижению вероятности их появления. Однако, при повторном пробое вакуумного промежутка с помощью RC-цепочки не удастся снизить перенапряжения до безопасного уровня. Таким образом, применение RC-цепочки эффективно лишь при отсутствии повторных зажиганий дуги в ВДК, т.е. при использовании вакуумных выключателей с высокой скоростью восстановления электрической прочности межконтактного промежутка после погасания дуги – более 40-60 кВ/мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По работе могут быть сделаны выводы как методического характера, так и по существу рассмотренных вопросов.

К основным методическим выводам можно отнести следующие:

1. Разработанные математические модели позволяют исследовать как процессы, сопровождающие однофазные дуговые замыкания на землю (ОДЗ) в сетях собственных нужд электрических станций различной структуры и в электрических сетях компрессорных станций, так и процессы,

сопровождающие коммутации включения и отключения присоединений с двигателями.

2. При использовании разработанных моделей такие элементы с распределенными параметрами как кабели и обмотка статора двигателей могут моделироваться в виде цепочечных схем, число звеньев которых диктуется частотным спектром исследуемых процессов.

3. Разработана аналитическая методика, позволяющая определять зависимость вероятности повторных зажатий дуги в вакуумном выключателе при отключении присоединения с ЭД от параметров ВДК и коммутируемого присоединения.

4. Показано, что приемлемая ниша использования RC-цепочек определяется частотным спектром рассматриваемых процессов. В случае, если на различных стадиях процесса определяющими являются составляющие, характеризующиеся существенно различными частотами, применение RC-цепочки становится неэффективным.

Основные выводы, относящиеся к существу рассмотренных вопросов, можно сформулировать следующим образом.

Ограничение перенапряжений при ОДЗ.

Решение поставленной задачи – обеспечение надежной эксплуатации изоляции электрооборудования ССН электроэнергетических объектов – должно решаться в совокупности с решением других технических задач – обеспечения термической устойчивости электрооборудования при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) и селективного распознавания присоединения с ОЗЗ. Этим требованиям удовлетворяет заземление нейтральных точек секций ССН через высокоомные резисторы. Исследования показали, что при таком способе заземления нейтрали перенапряжения при ОДЗ в рассмотренных электрических сетях оказываются не опасными для статорной изоляции ЭД. При этом выполняются требования термической устойчивости электрооборудования при ОЗЗ и селективного его распознавания.

Ограничение перенапряжений при включении двигателей.

1. Высокие кратности неограниченных перенапряжений при включении присоединений с ЭД, опасные для статорной изоляции ЭД, возникают не только при включениях ЭД в цикле АВР или АПВ, но и при включении заторможенного двигателя в случае неблагоприятного разброса в действии полюсов выключателя. Исследования показали, что приемлемого уровня ограничения перенапряжений можно добиться путем установки у двигателя защитных аппаратов типа ОПН, выпускаемых предприятиями “Феникс-88” (Новосибирск) и “АББ-УЭТМ” (Екатеринбург). Требуемые аппараты могут быть отнесены ко второй группе аппаратов по энергоемкости. В случае коротких кабелей (примерно до 30-40 м) эти аппараты могут быть установлены и непосредственно за выключателем присоединения.

2. Использование в качестве защитного аппарата RC-цепочки может быть эффективным лишь при малом разбросе во временах включения полюсов

выключателя. В этом случае расчетными будут перенапряжения, возникающие в циклах АВР или АПВ, кратности которых определяются составляющей высокой частоты. В случае же большого разброса в действии полюсов выключателя высокие кратности перенапряжений возникают за счет составляющих высокой и средней частот, одновременное ограничение амплитуд которых с помощью RC-цепочки практически не возможно.

Ограничение перенапряжений при отключении ЭД вакуумными выключателями

1. Статистический анализ токов среза в ВДК, изготавливаемых предприятиями «ЭЛКОМ» (Минусинск) и «ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК» (Москва), показал, что математическое ожидание среза составляет величину примерно 3 А. Токи среза, вероятность превышения которых равна 0.05, не превышают 6.3 А, максимальное зарегистрированное значение тока среза оказалось равным 7 А.

2. Разработанная аналитическая методика оценки вероятности повторного зажигания дуги в ВДК при отключении присоединения с ЭД показала, что при максимальных токах среза 5-7 А и при скорости возрастания электрической прочности межконтактного промежутка в ВДК порядка 60 кВ/мс, практически не будет наблюдаться повторных зажиганий дуги в ВДК, а, следовательно не будет и опасной эскалации перенапряжений.

3. При относительно малых токах среза, достигнутых электротехнической промышленностью в настоящее время, основной характеристикой вакуумной камеры, определяющей успешность отключения присоединения, является скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка. Если эта скорость оказывается меньше упомянутого во втором пункте выводов значения, то отключение может сопровождаться эскалацией перенапряжений, при которой перенапряжения на изоляции двигателя (главной и витковой) могут превысить допустимые значения.

4. Ограничение перенапряжений до уровня, допустимого для изоляции статора относительно земли при эскалации перенапряжений может быть достигнуто путем установки на присоединении ОПН, параметры которых совпадают с параметрами, требующимися для ограничения перенапряжений при включении ЭД. Однако, следует иметь в виду, что кратности перенапряжений на вводе двигателя могут быть меньше кратностей в средней части обмотки. Распределение уровня перенапряжений по длине обмотки зависит от конструкции обмотки. Поэтому не во всех случаях установка ОПН может обеспечить надежную эксплуатацию двигателя.

5. RC-цепочка является достаточно эффективным средством ограничения перенапряжений в случае, если при ее установке, приводящей к снижению уровня перенапряжений при первичном обрыве тока в ВДК, вероятность повторных зажиганий дуги практически будет равна нулю. Если же скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка не велика (менее примерно 60 кВ/мс), и при установке RC-цепочки

возникают повторные зажигания дуги, то напряжение на изоляции ЭД в процессе эскалации может превысить допустимые значения.

Общее заключение по работе.

Обеспечение надежной эксплуатации сетей собственных нужд рассмотренных энергетических объектов (ТЭЦ, АЭС) и электрических сетей компрессорных станций должно основываться на высокоомном заземлении нейтральных точек секций этих сетей, обеспечивающем ограничение перенапряжений при ОДЗ до уровня, допустимого для статорной изоляции электродвигателей. Такое заземление приводит к общему повышению надежности эксплуатации ССН – приемлемому значению токов при ОЗЗ, обеспечивающих селективное распознавание фидера с ОЗЗ. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях двигателей, целесообразно возложить на величинные ограничители перенапряжений (ОПН). В случае оснащения присоединений вакуумными выключателями следует рекомендовать установку ОПН непосредственно на выводах выключателя. В некоторых схемах могут быть использованы также и RC-цепочки, эффективное применение которых требует тщательной регулировки приводов выключателей с целью уменьшения разброса в действии полюсов при их включении, а в случае установки в электрической сети вакуумных выключателей – высокой скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в ВДК после погасания дуги.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. **Виштитеев А.В., Кадомская К.П., Копылов Р.В.** Перенапряжения в сетях собственных нужд электрических станций и защита от них. – Электроэнергетика: Сб. научн. тр. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. –С. 123-132.
2. **Кадомская К.П., Копылов Р.В.** Перенапряжения при отключении электродвигателей вакуумными выключателями и меры защиты.- Сб. научн. тр. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000 -№3 (20).- С.89-94.
3. **Бруй С.Р., Копылов Р.В.** Моделирование кабелей при исследовании переходных процессов в присоединениях с двигателями сетей собственных нужд тепловых электрических станций //Сборник научных трудов НГТУ, 2001, -вып.4(26)–С. 95-100.
4. **Дегтярев И.Л., Кадомская К.П., Копылов Р.В.** Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами.- Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ»: –Новосибирск, 2002. –С. 147-152.
5. **Кадомская К.П., Копылов Р.В.** Требования к вакуумной дугогасительной камере и специальным мерам для обеспечения надежного отключения заторможенного двигателя // Электрические станции, 2002, №9. –С. 56-60.

Подписано в печать 20.05.03. Формат 84x60x1/16
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ.л. 1,25
Заказ № 285.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20

2003-A

10949

№ 10949