

На правах рукописи



КАЧЕСОВ ВЛАДИМИР ЕГОРОВИЧ

**Однофазные повреждения в электрических сетях среднего
и высокого классов напряжения**
(теория, методы исследований
и меры предотвращения повреждений)

Специальности:

05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы;

05.14.12 – Техника высоких напряжений.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор

Кадомская Кира Пантелеймоновна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Лавринович Валерий Александрович

доктор технических наук,
профессор

Самородов Герман Иванович

доктор технических наук,
профессор

Халилов Ферудин Халилович

Ведущая организация – Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, г. Иркутск.

Защита состоится 14 октября 2008 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «_____» _____августа_____ 2008 г.

Ученый секретарь
совета Д 212.269.10

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В конце 19-го века русский ученый М.О. Доливо-Добровольский разработал систему передачи электрической энергии переменным трехфазным током. Сегодня именно эта система является основным каналом передачи электроэнергии как на большие расстояния – по сетям сверхвысокого напряжения (500 - 1000 кВ), так и на малые - посредством распределительных сетей среднего (6-35 кВ) и низкого (0,4 кВ) напряжений.

Передача электрической энергии по трехфазным системам является экономически и технически оптимальной, что было показано еще ее создателем.

Симметричный, сбалансированный режим передачи энергии нарушается при возникновении кратковременной или квазистационарной несимметрии является следствием различных плановых и аварийных коммутаций. Серьезные нарушения в системе передачи электроэнергии изначально и принципиально не могут быть трехфазными. Они возникают с тем или иным временным разбросом с момента инициирования какой-либо однофазной или двухфазной аномалии, развитие которой может приводить к общему трехфазному сбою в системе, сопровождаемому серьезными материальными и финансовыми издержками.

В сетях собственных нужд электрических станций напряжением 6-10 кВ, начиная с 80-х годов прошлого столетия, в нарастающем темпе идет модернизация коммутационной аппаратуры - происходит вытеснение масляных выключателей вакуумными (ВВ), которые имеют целый спектр технических преимуществ, стимулирующих сам процесс модернизации и делающих его необратимым.

Однако технология прерывания тока, основанная на высоких диэлектрических свойствах вакуума, создает возможность обрыва не только тока промышленной частоты, но и сопровождающего в процессе отключения первой фазы и повторных пробоев межконтактного промежутка выключателя тока высокой частоты. При отключении индуктивной нагрузки в силу эскалации перенапряжений при повторных пробоях межконтактного промежутка выключателя создается опасность пробоя ее изоляции. Последнее относится в большей мере к изоляции электродвигателей (ЭД) в силу их огромного парка и пониженного, по сравнению с другим электротехническим оборудованием, уровнем изоляции, который в процессе эксплуатации постепенно снижается из-за деградации изоляции под действием влажности, вибрации, динамических нагрузок на обмотки во время пуска, температурных перегрузок и других факторов. Испытательные напряжения изоляции электродвигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, в общем случае, не соответствуют допустимой электрической прочности зарубежных электрических машин: они имеют меньшие значения, что дополнительно обостряет вопросы координации их изоляции с воздействующими перенапряжениями.

Помимо указанного выше механизма эскалации перенапряжений значительной кратности, перенапряжения возникают при естественном (классическом)

срезе тока, предпробоях межконтактного промежутка и дребезге контактов в процессе включения, а также при виртуальных срезах тока, обусловленных существенными взаимными междофазными связями в питающих фидерах.

Традиционные подходы к защите электродвигателей далеко не всегда применимы и эффективны. Во-первых, установка защитных аппаратов непосредственно на выводах электрической машины встречает серьезные, часто неразрешимые технические и технологические трудности. Во-вторых, помимо воздействия перенапряжений на главную (корпусную) изоляцию значительные электрические нагрузки принимает на себя витковая (продольная) изоляция. При большой крутизне воздействующих перенапряжений возрастают градиентные перенапряжения на входных катушках, которые неэффективно защищаются с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

Таким образом, новые технологии дугогашения, разработанные для коммутационных аппаратов среднего напряжения и придавшие им значительный набор преимуществ, породили одновременно проблему электромагнитной совместимости с индуктивной нагрузкой, в частности, двигательной.

В распределительных сетях основным видом повреждения, связанным с однофазной несимметрией, является замыкание на землю, которое составляет 80-90% общего количества нарушений нормального режима эксплуатации сети. Хотя этот вид повреждения не приводит к перерыву электроснабжения потребителей, длительное его существование повышает электрическую нагрузку на изоляцию оборудования (и ускоряет ее деградацию), особенно, если замыкание носит неустойчивый, дуговой (перемежающийся) характер.

Перенапряжения, возникающие при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ), имеют, в целом, небольшую кратность – не более $\sim 3,1 U_{фм}$. Применение общеизвестного подхода к их ограничению с помощью защитных аппаратов – ОПН или оставшихся в эксплуатации вентильных разрядников (РВ), защитный уровень которых составляет $2,9...3,4 U_{фм}$, практически не решает задачи защиты ослабленной изоляции и, следовательно, повышения надежности эксплуатации сетей данного типа.

Кратность максимальных дуговых перенапряжений в протяженных кабельных сетях в силу значительных затуханий свободных колебаний еще меньше – составляет лишь $2,4-2,5 U_{фм}$, поэтому даже резистивное (высокоомное) заземление нейтрали таких сетей не дает заметного положительного эффекта.

Таким образом, мероприятия по снижению отрицательного воздействия перенапряжений на изоляцию распределительных сетей должны быть направлены, в основном, на сокращение количества перенапряжений (или длительности процесса дугового замыкания) на основе непрерывного мониторинга, on-line диагностики и своевременной профилактики изоляции, т.е. интеллектуального управления сетью. При наличии резерва питающих линий достоверная информация о поврежденном фидере может использоваться для его быстрого отключения.

Однофазное КЗ в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) так же, как и однофазное замыкание на землю в распределительных сетях, является наиболее вероятным повреждением. ЛЭП СВН часто являются систе-

мообразующими электрическими связями, поэтому к надежности их работы предъявляются особые требования. Операции по ликвидации КЗ на таких ЛЭП не должны вносить значительных возмущений в работу примыкающих систем, а само время восстановления нормального эксплуатационного режима работы ЛЭП должно быть минимальным. В связи с тем, что большинство однофазных КЗ носит неустойчивый характер, они эффективно устраняются с помощью однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ).

Рост рабочего напряжения линий электропередачи, их длины и уплотнение канала передачи энергии осложняют протекание аварийных и послеаварийных режимов. При ликвидации однофазного КЗ с помощью ОАПВ утяжеляются процессы гашения дуги подпитки (вторичной дуги) вследствие сильных электростатических и электромагнитных связей между аварийной и неповрежденными фазами. При этом значительное увеличение времени гашения дуги подпитки приводит к длительным бестоковым паузам, неприемлемым по условиям динамической устойчивости примыкающих к линии систем, либо к необходимости применения для ликвидации однофазного КЗ трехфазного АПВ. Это существенно снижает эксплуатационную надежность электропередачи.

В последние десятилетия разработаны новые методы и электротехническое оборудование, позволяющие существенно облегчить протекание всех стадий цикла ОАПВ. Совместно с современной измерительной и вычислительной базой это позволяют строить эффективные автоматические системы управления аварийными режимами.

Таким образом, исследования направленные на минимизацию отрицательных последствий однофазных повреждений в сетях различного назначения, определяют актуальность данной работы.

Цель и задачи работы

Целью работы является развитие теории, математических моделей, методов и средств, позволяющих на основе анализа квазистационарных режимов и переходных процессов минимизировать отрицательные последствия однофазно-несимметричных режимов, возникающих в сетях 6-10 кВ, содержащих электродвигатели, распределительных сетях 6-35 кВ и системах электропередачи сверхвысокого напряжения.

Для достижения этой цели в диссертации сформулированы и решены следующие задачи, а именно:

- 1.1 выполнен анализ влияния деформации импульсов напряжения, формируемых при повторных зажиганиях межконтактного промежутка выключателя и распространяющихся по силовым кабелям с бумажно-масляной изоляцией, на крутизну перенапряжений, воздействующих на обмотки высоковольтных вращающихся электрических машин (ЭМ);
- 1.2 выполнено исследование влияния топологии и состава электрооборудования питающей сети на крутизну волн перенапряжений, воздействующих на продольную изоляцию ЭМ;

- 1.3 разработана аналитическая методика оценки максимальных перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрических машин при их отключении в заторможенном состоянии;
- 1.4 разработана методика определения вероятности возникновения эскалации перенапряжений на двигательных присоединениях с различными параметрами, а также методика оценки критической скорости нарастания электрической прочности межконтактного промежутка выключателя;
- 1.5 определены условия виртуального среза тока в вакуумном выключателе при отключении заторможенной ЭМ; разработана методика определения вероятности его возникновения для электрического двигателя, несущего механическую нагрузку;
- 1.6 исследованы особенности применения фазных и межфазных защитных *RC*-цепочек, устанавливаемых за выключателем присоединения или на приемном конце кабеля, питающего ЭД;
- 2.1 разработаны и внедрены аппаратная, алгоритмическая и программная части системы непрерывного мониторинга переходных процессов в распределительных сетях 6-35 кВ;
- 2.2 выполнен систематический анализ процессов при ОДЗ, определены статистические характеристики перенапряжений в протяженных кабельных сетях;
- 2.3 разработана структура системы on-line диагностики распределительных сетей;
- 3.1 разработана математическая модель компенсированной линии электропередачи для анализа стационарных режимов, в том числе, режима ОАПВ;
- 3.2 исследованы и определены области применимости методов адаптивного ОАПВ в ВЛ с высокой и малой асимметрий первичных параметров;
- 3.3 разработаны эффективные методы снижения длительности бестоковой паузы ОАПВ.

Методы исследования.

В качестве главных инструментов исследований использованы экспериментальные методы, основанные на мониторинге реальных событий (пассивное наблюдение), методы активного, целенаправленного эксперимента, методы теории вероятности, математическое моделирование исследуемых процессов.

Теоретические результаты и новизна.

- Разработана распределенно-сосредоточенная (РС) модель обмотки высоковольтной электрической машины с учетом частотных зависимостей всех первичных параметров, использование которой позволяет достоверно моделировать процесс распространения электромагнитной волны вдоль обмотки и получать точные оценки перенапряжений как на главной, так и продольной изоляции электрической машины.

- Показано, что для формирования адекватной высокочастотной РС модели обмотки электрической машины, необходимо рассчитывать эффективную индуктивность катушки на частотах, эквивалентных фронту воздействующего импульса напряжения, используя данные о длине намотки, емкости катушки и экспериментально полученную зависимость скорости распространения электромагнитной волны от фронта воздействующего импульса напряжения, отражающую увеличение скорости распространения основного (энергоемкого) фронта электромагнитной волны при уменьшении фронта воздействующего импульса.
- Усовершенствована аналитическая методика определения критической скорости нарастания электрической прочности межконтактного промежутка вакуумного выключателя и вероятности возникновения эскалации перенапряжений при отключении заторможенных электродвигателей с различными параметрами присоединения и выключателя, учитывающая возможность повторного пробоя межконтактного промежутка выключателя как на первой, так и второй волне колебания переходного восстанавливающегося напряжения и позволяющая делать вывод о необходимости применения средств защиты электродвигателя.
- На основе анализа физических процессов, происходящих в сети с ЭД на частотах собственных колебаний и в вакуумном выключателе, впервые предложена аналитическая модель процесса эскалации перенапряжений при отключении заторможенных ЭД. На основе расчетов с использованием модели получены интегральные характеристики максимальных неограниченных перенапряжений на ЭД в зависимости от параметров двигательных присоединений и характеристик вакуумных выключателей, позволяющие совместно с оценкой вероятности перенапряжения и его крутизны принимать решение о необходимости защиты ЭД.
- Впервые показано, что достоверное распознавание замыкания на землю в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю выполняется на основе анализа соотношения действующих значений фазных напряжений поврежденной и неповрежденных фаз, измеренных на малом временном отрезке переходного процесса после пробоя изоляции. Определено минимальное значение признака однофазного замыкания K , при котором надежно подтверждается факт замыкания.
- Показано, что надежное и быстрое выделение фидера с однофазным замыканием на землю, основанное на анализе полярностей первых полуволн переходных токов нулевой последовательности, выполняется с помощью одновременного распознавания замыкания по параметрам переходного процесса.
- Разработаны новые методы локализации однофазных замыканий на землю частотно-параметрический, дифференциально-параметрический, дифференциально-волновой и разброса, которые совместно с методами мониторинга, распознавания замыкания, выделения поврежденного фидера решают задачу on-line диагностики сети, своевременной и целенаправленной профилактики и ремонта изоляции.
- Введено понятие и разработан метод управляемого ОАПВ, наиболее эффективно подавляющий режимные параметры бестоковой паузы ОАПВ, выпол-

няющий функции адаптивного ОАПВ и управляемого включения отключенной фазы.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

- *Применительно к сетям 6-10 кВ, содержащим ЭД, экспериментально получены скорости снижения и нарастания электрической прочности отечественных вакуумных выключателей, подтверждающих необходимость защиты от перенапряжений электродвигателей, подвергающихся частым коммутациям. Оценка необходимости их защиты основывается на основе полученных расчетных зависимостей вероятности эскалации перенапряжений от параметров двигательного присоединения.*
- *Методика расчета крутизны перенапряжений на стадии проектных решений позволяет оценить уровень опасности градиентных перенапряжений и определить комплекс мер защиты вращающихся ЭМ в системах электропитания различного рода.*
- *Полученные интегральные зависимости кратности максимальных перенапряжений, возникающих при эскалации, позволяют, исходя из уровня электрической прочности электрической машины, скорости восстановления электрической прочности выключателя и параметров двигательного присоединения, определить необходимость защиты ЭД.*
- *Установлено, что для отключения большинства двигательных присоединений без повторных пробоев межконтактного промежутка вакуумного выключателя необходима скорость нарастания электрической прочности в межконтактном промежутке выключателя более 90-100 кВ/мс.*
- *Показана высокая эффективность межфазной RC-цепочки, не приводящей к увеличению емкостных токов замыкания на землю, что позволяет рекомендовать её к применению.*
- *Метод селекции фидера с ОДЗ синхронно с распознаванием ОДЗ, внедренный в аппаратно-программном измерительном комплексе в опытную эксплуатацию, показал хорошую достоверность и может без серьезных усложнений переноситься в микропроцессорные системы РЗА.*
- *Разработанный комплекс on-line диагностики позволяет оперативно осуществлять оптимальное управление сетью в предаварийных и аварийных режимах сети. Формируемая в процессе эксплуатации карта аварийности сети, включающая информацию как об устойчивых замыканиях, так и устранившихся, дает возможность целенаправленно выполнять профилактику изоляции сети, минимизируя издержки электро-сетевых эксплуатирующих организаций.*
- *Разработанные методы локации повреждений (однофазных замыканий на землю) могут использоваться в виде отдельных самостоятельных блоков в системах мониторинга распределительных сетей. Их применение особо эффективно для выявления дефектов и выполнения*

своевременных ремонтных работ на протяженных воздушных линиях, когда в силу технологических особенностей электропотребителей перемены в электроснабжении недопустимы или сильно ограничены.

- Для широкого спектра протяженных ВЛ, как с горизонтальным расположением фаз, так и по вершинам равностороннего (равнобедренного) треугольника, показана возможность применения *адаптивного ОАПВ*, которое без сложностей встраивается в современные микропроцессорные системы релейных защит.
- Практически для всех ЛЭП, оснащаемых управляемыми ШР, может применяться метод «мягкого» включения отключенной фазы, предложенный в рамках управляемого ОАПВ.

Результаты исследований перенапряжений, возникающих при отключении высоковольтных ЭД, и разработок мер защиты от них используются в ОАО «Красноярскэнерго» и ОАО «Красноярская генерация» (г. Красноярск), а также в ЗАО «Сибирский проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «Сибэнергопроект» (г. Новосибирск) в проектах систем автономного электропитания.

Аппаратно-программный измерительный комплекс для мониторинга аварийных режимов внедрен в ОАО «Городские кабельные сети» «Алтайэнерго» (г. Барнаул), использован на объектах ОАО «Новосибирскэнерго» (ОАО «Новосибирская ТЭЦ-3», ЗАО «Региональные электрические сети») для разработки комплекса мероприятий по повышению надежности работы сетей 6-10 кВ.

Аппаратно-программный комплекс on-line диагностики распределительной сети 10 кВ внедрен в ОАО ГУП «УЭВ СО РАН» (г. Новосибирск). Для комплекса разработаны и сопряжены с ним устройства выделения фидера с ОДЗ.

Параметрические методы локации использованы при разработке измерительного комплекса для определения мест однофазных замыканий на землю на ВЛ 10 кВ в ОАО «Сибэнергосервис» (г. Новосибирск).

Методы снижения режимных параметров паузы ОАПВ с использованием управляемых ШР использованы ОАО «Сибэнергопроект» при проектировании противоаварийной автоматики межгосударственной ЛЭП 500 кВ «Экибастуз-Алтай».

На защиту выносятся (основные положения):

1. Распределенно-сосредоточенная модель обмотки высоковольтной ЭМ, учитывающая частотные зависимости всех первичных параметров катушки. Для получения минимальной погрешности перенапряжений на продольной изоляции катушек их эффективную индуктивность на частотах, эквивалентных фронту воздействующего импульса напряжения, необходимо рассчитывать, используя экспериментально полученную зависимость скорости распространения электромагнитной волны от фронта воздействующего импульса.
2. Аналитическая модель процесса эскалации перенапряжений при отключении заторможенных электрических двигателей, полученные на основе ее примене-

ния интегральные характеристики максимальных неограниченных перенапряжений на электродвигателях.

3. Аналитическая методика определения критической скорости нарастания электрической прочности межконтактного промежутка вакуумного выключателя и вероятности возникновения эскалации перенапряжений при отключении заторможенных высоковольтных электродвигателей с различными параметрами присоединения, учитывающая возможность повторного пробоя межконтактного промежутка выключателя как на первой, так и второй волне колебания переходного восстанавливающегося напряжения.

4. Метод распознавания замыкания на землю для сетей с нейтралью, заземленной через ДГР, основанный на анализе соотношения действующих значений фазных напряжений поврежденной и неповрежденных фаз, измеренных на малом временном отрезке переходного процесса после пробоя изоляции и рекомендованное численное значение признака замыкания на землю $K > 3$.

5. Новые методы автоматической локализации места замыкания на землю в распределительных сетях: частотно-параметрический, дифференциально-параметрический, дифференциально-волновой, метод разброса, обеспечивающие в совокупности с методами достоверного распознавания замыкания на землю и выделения поврежденного фидера информационную основу для формирования карт аварийности сети, целенаправленной профилактики и ремонта изоляции.

6. Понятие и метод управляемого ОАПВ, требования к управляемому реактивному элементу и алгоритмы управления им в цикле бестоковой паузы, обеспечивающие оптимальное протекание всех стадий аварийного режима и минимальную бестоковую паузу.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры ТВН НГТУ, на научно-технических конференциях, посвященных дням науки НГТУ (2004-2006 гг.), на Всесоюзных и Всероссийских научно-технических семинарах, конференциях, симпозиумах: "Проблемы осуществления ОАПВ линий электропередачи высших классов напряжений" (СибНИИЭ, Новосибирск, 1984), «Управление режимами и надежность электрических систем» (АН МССР, 1984), «Методы расчетов переходных процессов и электрических полей в сетях высокого напряжения» (КПИ, Каунас, 1985), «Вопросы повышения надежности и экономичности работы энергосистем», (СибНИИЭ, Новосибирск, 1986), «Оптимизация схемно-режимных характеристик электропередач повышенной пропускной способности и меры повышения их надежностных показателей», (СибНИИЭ, Новосибирск, 1987), «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей 3-6-10-35 кВ» (НГТУ, Новосибирск, 2000, 2002, 2004, 2006 гг.); на международных научно-технических конференциях, симпозиумах, конгрессах: Технический университет, г. Вроцлав, 1985 г.; «Третий межд. Конгресс по прикладной и индустриальной математике ИНПРИМ-98» (Институт прикл. математики СО РАН РФ, Новосибирск, 1998); «International

Conference on Electrical Insulation – I.C.E.I-99» (СПб.ГТУ, Санкт-Петербург, 1999); «Korean-Russian Int. Symp. on Science and Technologies» (НГТУ, Новосибирск; Ulsan, Ulsan University, 1999, 2002, 2003); «CIGRE» (Paris, 2002); «IEEE PowerTech'05», (St.-Petersburg, 2005); «The 7th International Scientific Conference on Electric Power Engineering», University of Brno, 2006.

По материалам диссертации опубликовано 57 научных работ из них 46 в виде статей, материалов международных, всесоюзных и республиканских конференций; 11 - в форме патентов и авторских свидетельств на изобретения. В автореферате приведен список из 38 наиболее значимых работ по теме диссертации.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения трех глав, заключения, списка литературы, включающего 180 наименований, и приложения. Объем основного текста диссертации составляет 449 страниц, включая 204 рисунка и 42 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи. Показано в чем состоит научная новизна и прикладная значимость полученных в работе результатов. Описана структура диссертации и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена вопросам перенапряжений на высоковольтных электродвигателях 6-10 кВ, коммутируемых вакуумными выключателями. В этой главе рассмотрены механизмы развития перенапряжений, получена оценка вероятности возникновения максимальных перенапряжений, рассмотрены меры ограничения.

В электрических вращающихся машинах наряду с главной изоляцией электрическим перегрузкам подвергается также продольная (витковая) изоляция. Сочетание крутизны и величины перепада импульса перенапряжений определяет степень опасности воздействия на витковую изоляцию.

Оценка крутизны и расчетные модели сети и электрических машин.

Достоверная оценка степени опасности перенапряжений для изоляции обмоток ЭМ требует формирования адекватных расчетных высокочастотных моделей сети, питающего кабеля и электрической машины.

Исследование механизма распространения волны напряжения в кабеле с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) показало, что наибольшее влияние на деформацию импульса оказывает существенная зависимость поперечной проводимости от частоты, увеличивающаяся приблизительно в 25 раз в диапазоне частот от 50 Гц до единиц МГц. Результаты моделирования деформации волн, выполненные спектральным методом, показали хорошее совпадение с экспериментальными результатами, полученными на кабелях разного сечения.

Проведенные измерения и расчеты позволили установить, что для широкого диапазона сечений кабеля метрическое увеличение длительности фронта (τ_d) при воздействии импульса с прямоугольным фронтом составляет 1,5-3 нс/м. Модели длинных линий, представленные в широко известных программах моделирова-

ния переходных процессов в электрических сетях и не учитывающие частотные зависимости поперечных параметров линий, не отражают реальной деформации импульсов, что ограничивает их область использования применительно к подобным классам задач.

Для учета частотных свойств питающего кабеля разработана модель линии, в которой частотные характеристики передаточной функции по напряжению $H(j\omega)$ и волновая проводимость $Y_C(j\omega)$ аппроксимированы рациональными функциями вида

$$\hat{H}(j\omega) = \sum_{k=1}^N \frac{c_k}{j\omega - a_k} + d + j\omega e$$

Сопоставление результатов моделирования с помощью разработанной модели и результатов эксперимента показало хорошее совпадение результатов.

Разнообразие топологии и параметров реальных схем подключения ЭМ к секции шин, зависящее от состава и технологических режимов работы оборудования, определяет крутизну волны на питающем конце двигательного присоединения. В компактных схемах с большой зарядной емкостью и малой индуктивностью эквивалентного источника продольная изоляция обмоток коммутируемого двигателя нагружается (электрически) в большей степени. Наибольшим градиентным перенапряжением подвергается изоляция машин, подключенных короткими кабелями. Это обусловлено не только большей крутизной падающей на обмотку волны напряжения, но и тем, что коммутация коротких кабелей приводит к меньшим падениям напряжения на внутреннем сопротивлении эквивалентного источника.

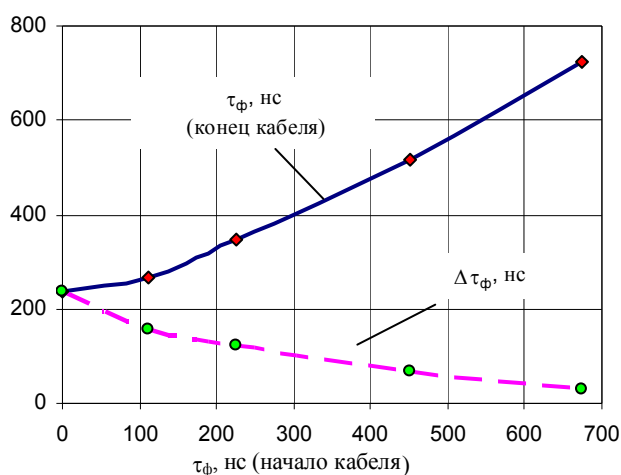


Рис. 1. Зависимость длительности фронта импульса в конце кабеля от длительности фронта в его начале и их разности

Постоянная времени разрядного контура и длительность фронта коммутационного импульса напряжения, определяются, в основном, эквивалентной индуктивностью ошиновки распределенного источника, в качестве которого выступают все заряженные кабели за исключением коммутируемого, и волновым сопротивлением коммутируемого кабеля. Установлено, что для типичных схем электропитания собственных нужд электрических станций длительность фронта импульса в начале питающего кабеля колеблется от $\sim 0,3$ до 4

мкс, поэтому влияние деформации импульса в питающем кабеле на крутизну импульса на ЭМ имеет достаточно слабое влияние: при длительности фронта импульса на питающем конце кабеля 250-300 нс деформация (увеличение фронта) импульса не превысит порядка 1 нс/м, а при длительности фронта более 1 мкс деформацией импульса в кабеле можно пренебречь (рис. 1).

В тех случаях, когда коммутируемое присоединение удалено по отношению к остальным присоединенным к секции кабеля, индуктивность эквивалентного источника по отношению к коммутируемому присоединению значительна, крутизна воздействующего импульса напряжения мала, поэтому продольная изоляция ЭМ в некоторых схемах электропитания «самозащищена».

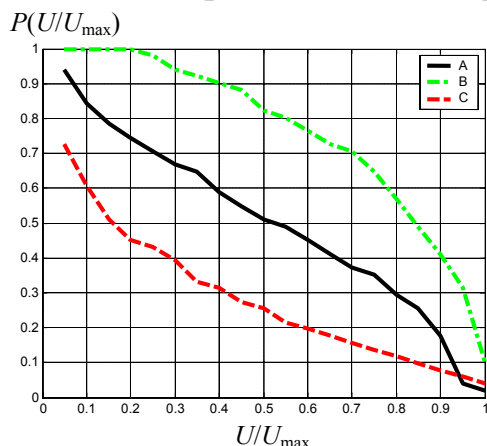


Рис. 2. Вероятность превышения относительной кратности перенапряжений при ОДЗ

нужд станций, а также в других преимущественно кабельных сетях.

В режиме дугового замыкания на землю вероятность возникновения перенапряжений значительной кратности выше, чем при устойчивом замыкании на землю. На основе обработки натурных экспериментов в кабельных сетях получены вероятности превышения относительной кратности перенапряжений в режиме ОДЗ (рис.2), показывающие, что вероятность превышения перенапряжений с уровнем $0,9U_{\max}$ значительна и составляет 0,2-0,4.

Исходя из умеренной оценки кратности дуговых перенапряжений в преимущественно кабельных сетях на уровне $2,3-2,5 U_{\text{фм}}$ перенапряжения при включении ЭД при ОДЗ могут достигать на высоком уровне вероятности значительных величин — от $4,5$ до $5 U_{\text{фм}}$. В сетях с малыми емкостными токами замыкания на землю уменьшение как самой вероятности, так и максимума перенапряжений может осуществляться путем резистивного заземления нейтрали, благодаря которому за период между пробоями происходит заметное снижение среднего напряжения на нейтрали.

Приближенная оценка продольных перенапряжений при воздействии на обмотку ЭМ импульса перенапряжений экспоненциальной формы может выполняться аналитически на основе расчетных первичных параметров конкретной ЭМ. Для этого предложен метод, использующий би-экспоненциальное представление импульсной передаточной характеристики катушки.

Детальное исследование различных моделей катушки показало, что расчет переходного процесса в обмотке при произвольной форме воздействующего напряжения (в сложной электрической сети) может выполняться при представлении ЭМ в виде цепочечных П-схем. Однако, применение П-схем с постоянными параметрами возможно только в случае их соответствия эквивалентной частоте воздействующего импульса напряжения, что затруднительно для всех катушек

В режиме устойчивого замыкания на землю уровни перенапряжений при включении ЭМ, приближающиеся к $3,5U_{\text{фм}}$, допустимы с позиций международной практики (для мощности ЭМ $S_{\text{ЭД}} < 1$ МВт — электрическая прочность $U_{\text{ЭП}} = 4,1U_{\text{фм}}$ при $\tau_{\text{ф}} > 5$ мкс). В то же время градиентные перенапряжения представляют опасность уже при кратностях (перепадах) напряжения $\sim 2,5 U_{\text{фм}}$ для минимальных фронтов импульсов напряжения ($\sim 0,3$ мкс), которые возможны в сетях собственных

магнитных волн вдоль катушки с сильными электрическими и магнитными продольными связями между витками.

На основе проведенных экспериментов и их обобщения предложено корректировать эффективную индуктивность катушки (витков) на частотах, эквивалентных фронту падающей на изоляцию волны ($f > 150 \div 250$ кГц)

$$L(\omega_3) \approx \frac{l_k^2}{v^2(\omega_3)C}$$

в соответствии с экспериментально полученной зависимостью $v = \varphi(\tau_\phi)$.

Сопоставления измерительных данных с результатами моделирования переходных процессов с использованием разработанной модели показали как качественно правильную форму напряжения в конце катушки, так и хорошее количественное совпадение – погрешность расчета максимальных градиентных перенапряжений не превысила $+6 \div 8\%$. Пространственно-временное распределение максимальных продольных перенапряжений, полученных с помощью разработанной модели, показано на рис. 4.

В типовых схемах электропитания ЭД ограниченная скорость восстановления (нарастания) электрической прочности (K) межконтактного промежутка (МП) современных ВДК оказывается недостаточной для отключения двигательного присоединения без повторных пробоев, инициирующих возникновение и постоянное нарастание (*эскалацию*) при повторных пробоях перенапряжений на первой отключаемой фазе ЭД.

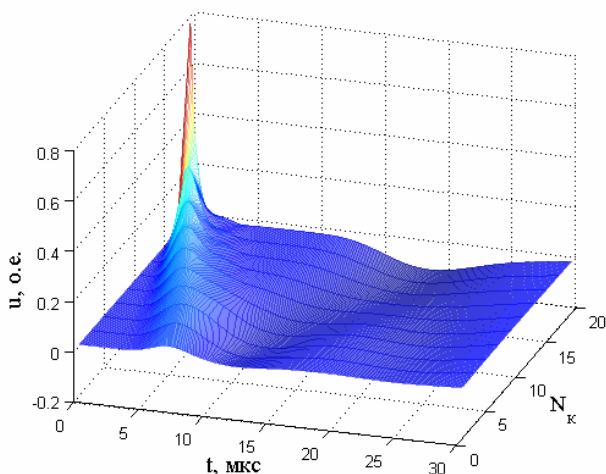


Рис. 4. Расчетное пространственно-временное распределение продольных (междукатушечных) напряжений ($\tau_\phi = 170$ нс; N_k – номер катушки, отсчитываемый от конца обмотки)

Первично, перед решением задачи защиты ЭМ от перенапряжений такого вида, необходима оценка вероятности возникновения самого процесса эскалации, и лишь в дальнейшем ставится вопрос о выборе средств их предотвращения или защиты от них в зависимости не только от амплитуды, но и крутизны перенапряжений.

Очевидно, что условия возникновения эскалации напряжения определяются скоростью нарастания ЭП ВДК. После размыкания контактов выключателя в точке касания (в момент времени t_Π) прямой электрической прочности $u_{ЭП}(t)$ и переходного восстанавливающегося напряжения

на межконтактном промежутке $u_{МП}(t)$ выполняется условие равенства их производных. Исходя из этого условия, которое при пренебрежении затуханием, имеет вид

$$U_{НЧ} \sqrt{[\beta(t_\Pi + t_0)]^2 + 1} \cdot \sin(\beta t_\Pi - \varphi_0 + \varphi_1) - 1,5U_{\phi M} = 0,$$

получено выражение для критической скорости $K_{кр}$, т.е. минимальной скорости, нарастания ЭП ВДК, при которой еще не происходит ее пробой:

$$K_{кр} = \frac{u_{МП}(t_{п})}{t_{п} + t_0} = \frac{1,5U_{фм} - U_{НЧ} \cos(\beta t_{п} - \varphi_0)}{t_{п} + t_0}.$$

$K_{кр}$ определяется параметрами двигательного присоединения, временем горения дуги t_0 и током среза выключателя. Показано, что, в общем случае, повторный пробой МП ВДК возможен как на первой, так и второй четверти периода свободных колебаний ($T_{НЧ}$) в контуре двигатель-кабель. При пробое на первой четверти периода свободных НЧ колебаний критическая скорость $K_{кр}$ резко возрастает с увеличением тока среза выключателя, т.е. с ростом амплитуды низкочастотных свободных колебаний ($U_{НЧ}$). Поэтому выключатели двигательных присоединений с большим характеристическим сопротивлением (с малой длиной питающего кабеля ($l_{каб}$) и мощностью ЭД (S)), характеризующиеся большими токами среза, должны одновременно обладать повышенной скоростью нарастания ЭП в ВДК.

$K_{кр}$ резко возрастает с уменьшением t_0 , которое является случайной величиной. Исходя из того же условия повторного пробоя МП ВДК и задаваясь предельным током среза, определяется амплитуда свободных НЧ колебаний $U_{НЧ}$, которая при заданной скорости нарастания K ограничивает время t_0 :

$$t_0 = \frac{1}{K} [1,5U_{фм} - U_{НЧ} \cos(\beta t_{п} - \varphi_0) - K t_{п}].$$

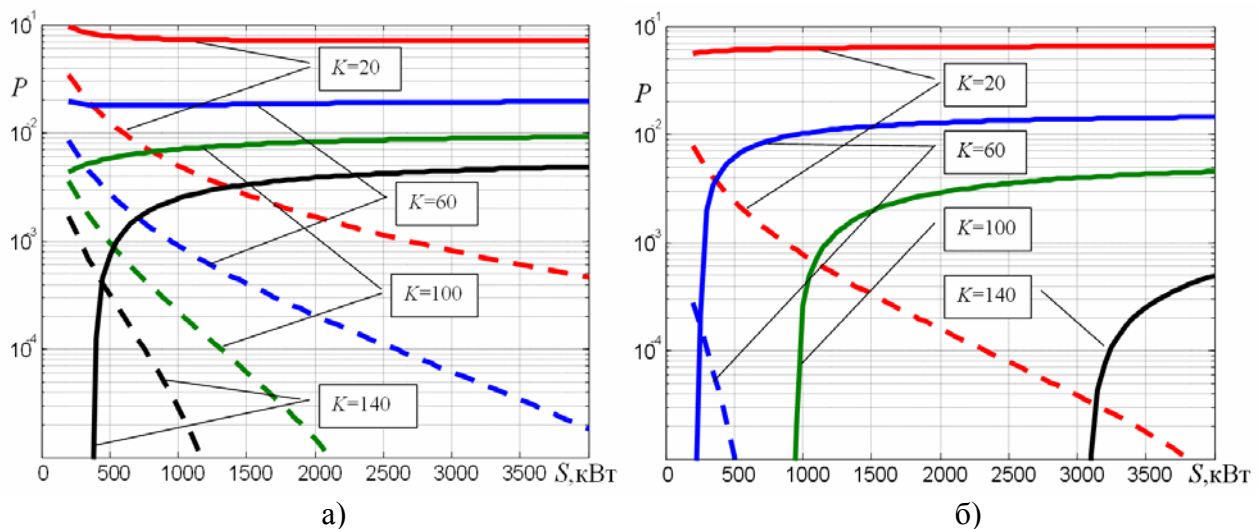


Рис. 5. Вероятность первичного повторного пробоя при отключении заторможенных двигателей: длины кабелей 50 (а), 250 (б); скорости нарастания электрической прочности $K=20,60,100,140$ кВ/мс; пунктирные линии - пробой на первой четверти периода НЧ колебаний, сплошные - на второй; ток среза – 5 А

Отношение t_0 к полупериоду промышленной частоты ($T_0/2$) определяет вероятность повторного пробоя МП ВДК и, следовательно, вероятность возникновения эскалации напряжения (ВВЭН) на двигателе:

$$P(K < K_{кр}) = \frac{2t_0}{T_0}.$$

На основе разработанной методики оценки ВВЭН, учитывающей возможность пробоя как на первой, так и второй четверти периода $T_{НЧ}$, рассчитаны ее зависимости от основных параметров двигательных присоединений, скорости нарастания ЭП (рис. 5) и установлено, что для широкого спектра параметров двигательных присоединений ($S=200\ldots600$ кВт, $l_{каб}>50$ м) $K_{кр}=90\ldots100$ кВ/мс при $P<0,006$.

Аналитическая методика расчета процесса эскалации перенапряжений.

На основе основных закономерностей электрофизических процессов в ВДК разработана математическая модель (аналитическая методика расчета) процесса эскалации перенапряжений на присоединениях с ЭМ. Модель позволяет в динамике анализировать процесс эскалации перенапряжений при учете параметров эквивалентного источника, питающего кабеля и ЭД и получать оценку перенапряжений, воздействующих на изоляцию (пример расчета процесса эскалации напряжения показан на рис. 6).

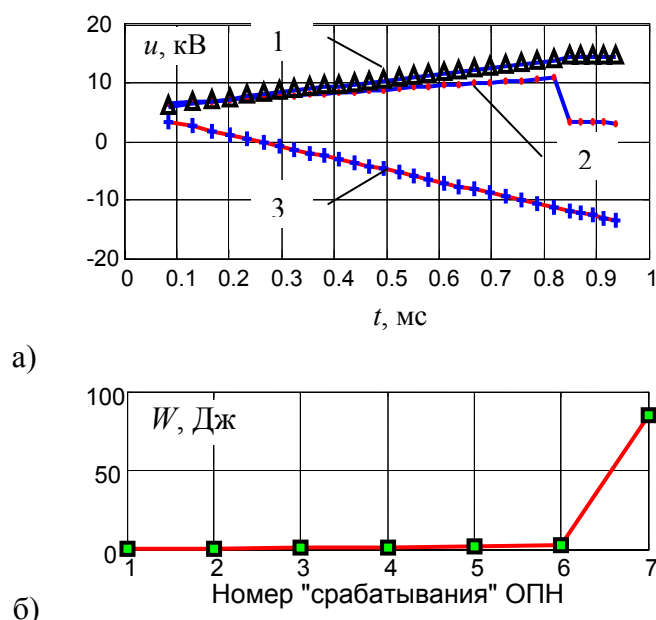


Рис. 6. Расчетные напряжения на ЭД 6 кВ (а) и энергия, выделяемая в ОПН (б), в процессе эскалации (1 – напряжение ВЧ максимума, 2 – после гашения дуги, 3- НЧ максимум)

На основе аналитической модели процесса эскалации получены интегральные оценки кратностей перенапряжений для сетей с широким спектром их параметров и выключателей с различной скоростью восстановления ЭП ВДК (K).

Увеличение S , $L_{каб}$ и K способствует снижению перенапряжений. При $K=60$ кВ/мс появляется область сочетания параметров (S , $L_{каб}$), в которой эскалация вообще не возникает (рис. 7,а). С увеличением K до 80 кВ/мс эта область значительно расширяется – она отвечает маломощным двигателям, подключенными длинными кабелями.

Полагая, что крутизна волны перенапряжения, прикладываемой к обмотке менее 0,82 о.е./мкс, и, исходя из предельного уровня перенапряжений $4,1U_{фм}$ (для двигателей мощностью до 1 МВт), принятого во многих странах, из областей, приведенных на рис. 7, выделяются подобласти, в которых изоляция электродвигателя подвергается недопустимым перенапряжениям и требуется применение специальных мер их ограничения.

Уровень изоляции электрических машин мощностью более 1 МВт составляет $4,7 U_{фм}$. Анализ зависимостей на рис. 7,б показывает, что для двигателей указанной мощности и $K>80$ кВ/мс перенапряжения вообще не опасны, а для менее мощных двигателей – только в тех ситуациях, когда они подключены кабелями длиной до ~ 100 м.

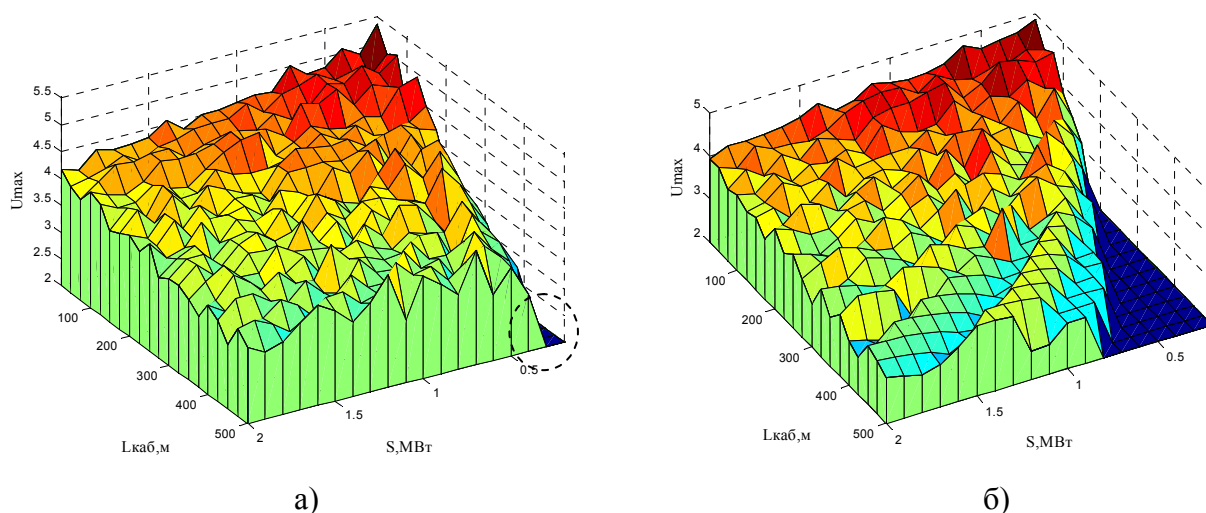


Рис. 7. Кратности максимальных перенапряжений
(а – $K=60$, б – $K=80$ кВ/мс)

Экспериментальное исследование перенапряжений на ЭД.

В сетях собственных нужд электрических станций выполнено экспериментальное исследование перенапряжений на ЭД с использованием разработанного аппаратно-программного компьютерного измерительного комплекса, позволяющего с удовлетворительной временной и амплитудной дискретизацией фиксировать переходные процессы в сетях 6-10 кВ (рис. 8).

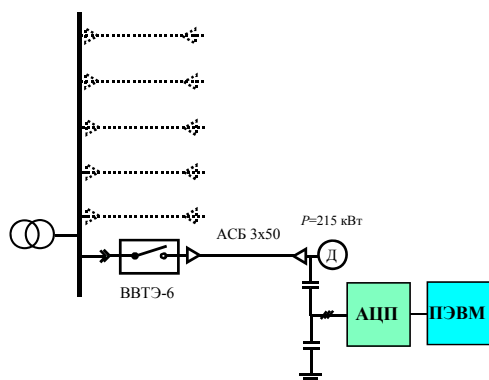


Рис. 8. Упрощенная схема измерения (а), подключение делителей к выводам ЭД (б)

Экспериментальные исследования подтвердили высокую ВВЭН при малой скорости нарастания ЭП МП ВДК, которая в экспериментах составляла ~ 25 кВ/мс, и значительную кратность перенапряжений – $4,8U_{фм}$ (рис. 9). Максимальная крутизна нарастания напряжения достигла 14 кВ/мкс (при перепаде напряжения 43 кВ), что представляет опасность для продольной изоляции ЭД. Статистическая обработка напряжений повторного пробоя показала, что скорость восстановления ЭП МП ВДК у испытуемого экземпляра ВВ возрастала по мере раздвижения контактов (рис.9,б), что положительно сказывается на срыве эскалации напряжения. Перенапряжения при включении не превысили $2,5U_{фм}$.

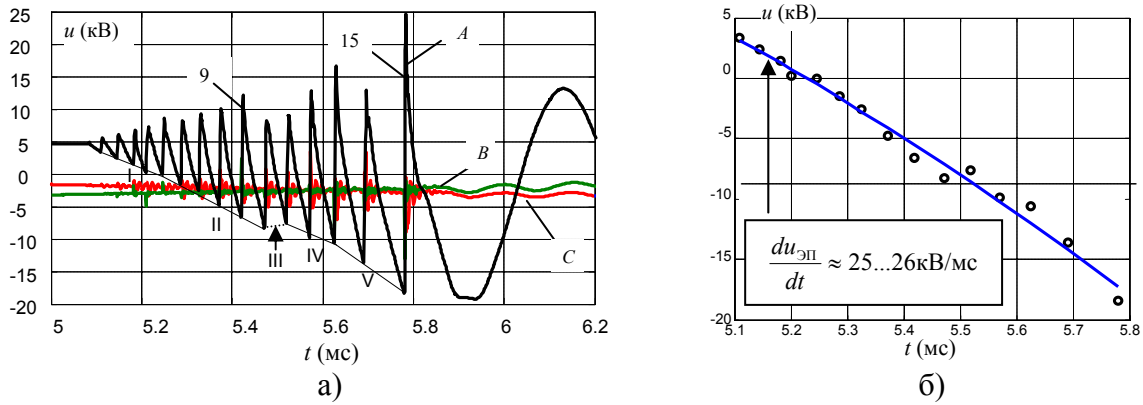


Рис. 9. Эскалация напряжения на ЭД (а), напряжения повторного пробоя и их аппроксимация (б); $S=215$ кВт, $L_{\text{каб}}=160$ м

Перенапряжения при виртуальном срезе тока.

Виртуальный срез тока (ВСТ) при отключении заторможенной ЭМ представляет достаточно редкое событие, поскольку пусковой ток значительно превышает высокочастотную (ВЧ) компоненту тока, формируемую вследствие повторных пробоев МП ВДК первой отключаемой фазы в полюсах ВВ, отключаемых во вторую очередь. Для сети, состоящей из кабелей с бумажно-масляной изоляцией и секторными жилами, получено простое приближенное условие повторного пробоя МП ВВ, которое приводит к ВСТ:

$$U_{\text{МП}} > 8,3 \left(\frac{n}{n-1} \right) Z_{\text{с,1}} I_{\text{пуск}}.$$

Показано, что с ростом мощности ЭМ вероятность ВСТ ($P_{\text{ВСТ}}$) снижается при отключении установившегося тока нагрузки. Экспериментально и теоретически показана возможность возникновения ВСТ при отключении развернувшегося ЭД.

Наряду с типичным случаем прерывания тока нагрузки на спадающем по модулю токе рассмотрена возможность его обрыва на возрастающей части синусоиды – в начале полупериода промышленной частоты ($T_0/2$). Вероятность прерывания тока на возрастающей (первой) половине полупериода определяется отношением тока среза и тока отключения:

$$P_{\uparrow} = \frac{2t_{+}}{T_0} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{i_0}{I_{\text{откл.м}}} \right),$$

где t_{+} - время достижения током отключения значения тока среза i_0 , а вероятность возникновения эскалации напряжения (P^{+}) записывается как

$$P^{+}(K < K_{\text{кр}}) = 2 \frac{\min(t_{0+}, t_{+})}{T_0}$$

и зависит от тока нагрузки. Показано, что для выключателей, характеризуемых малой скоростью K , вероятность повторного пробоя и соответственно P^{+} определяется временем t_{+} , т.е. снижается (рис. 10); ограничение вероятности P^{+} происходит также при увеличении нагрузки на ЭД (т.е. коэффициента нагрузки $K_{\text{Н}}=S/S_{\text{ном}}$).

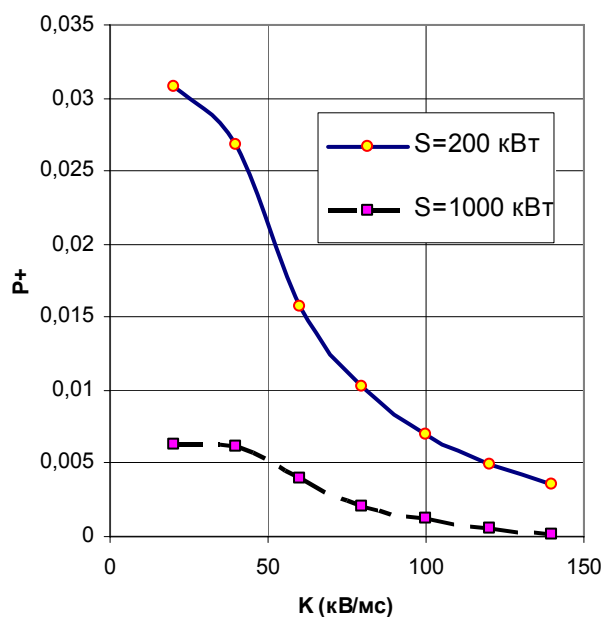


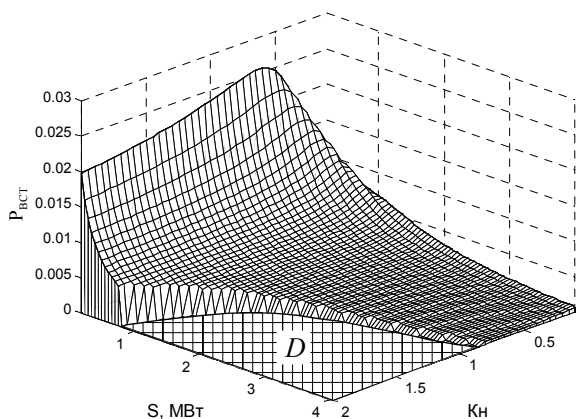
Рис. 10. Вероятности эскалации напряжения при возрастающем токе ЭД в зависимости от скорости нарастания ЭП (ток среза 5 А; коэффициент нагрузки ЭД $K_n=2$)

Установлено, что, несмотря на малую вероятность прерывания тока на возрастающем токе отключения, вероятность возникновения эскалации напряжения соизмерима с вероятностью ее возникновения на снижающемся токе. Это заключение обусловлено низкой ЭП в начальный момент размыкания контактов выключателя.

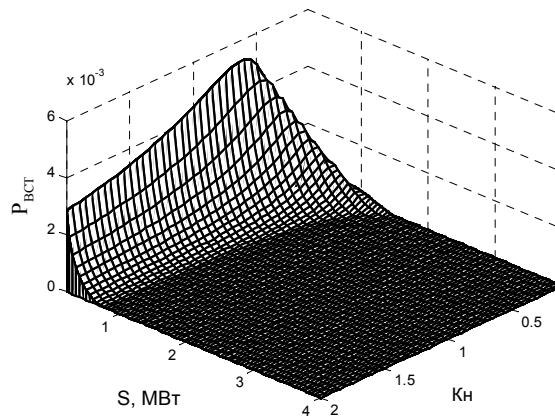
Ток среза выключателя, определяющий амплитуду свободных НЧ колебаний, в общем случае зависит от тока отключения, если последний соизмерим с током среза. На основе аппроксимирующих зависимостей тока среза от тока отключения рассчитаны ВВЭН на возрастающем токе отключения, которые показывают существенное снижение вероятности при отключении маломощных ЭД.

В работе определен подход к оценке вероятности ВСТ ($P_{\text{ВСТ}}$). Она может быть представлена как ВВЭН с заданным уровнем перенапряжений и условия, что ВЧ составляющая тока в неотключенных фазах выключателя превышает ток нагрузки (рис. 11). В предположении кратности перенапряжений в процессе эскалации, равной $3U_{\text{фм}}$, условие ВСТ для кабелей с секторными жилами записывается как:

$$\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{SZ_{C,1}} > 1,5K_n.$$



а)



б)

Рис. 11. Вероятности ВСТ при возрастающем токе ЭД для выключателей фирмы «Таврида-Электрик»: $K=40$ кВ/мс; а - $l_{\text{каб}}=50$ м; б - $l_{\text{каб}}=250$ м; D - область, где ВСТ не возникает

Защита ЭД от перенапряжений.

Защита ЭМ наиболее эффективна при установке защитных средств (ОПН, РС- цепочек) непосредственно у выводов ЭМ, однако, часто технические и технологические причины не позволяют реализовать такой подход (особенно при реконструкции конкретной сети или присоединения).

Защитные свойства ОПН, установленного на питающей стороне кабеля, в ВЧ части процесса эскалации (в первый момент после пробоя МП) зависят от механизма гашения дуги в выключателе и внутреннего сопротивления источника. Эффективность ОПН очень низка – даже в случае его «срабатывания» на питающем конце кабеля напряжение на ЭД может не ограничиваться, поскольку максимум перенапряжений на ЭД достигается ранее. Защитные свойства ОПН сказываются на втором (низкочастотном) этапе, приводящем к срыву эскалации, - в момент достижения низкочастотным максимумом напряжения «отпирания» варистора.

Для приближенных расчетов эффективности защиты ЭД с помощью ОПН, установленного на питающем конце кабеля, разработаны упрощенные аналитическая и численная методики. На основе проведенных исследований коэффициент эффективности защиты ЭД, определяемый как отношение неограниченных перенапряжений к ограниченным, составил не более 1,18 при длине питающего кабеля 50 м.

Надежная защита главной изоляции ЭД выполняется с помощью ОПН, включаемого параллельно контактам ВВ. При таком включении варисторы ОПН «отпираются» намного раньше, что сопровождается сокращением длительности процесса эскалации напряжения на величину – $U_{фм}/K$. Путем численного моделирования установлено, что коэффициент защиты при таком включении защитного аппарата часто получается выше, чем при включении защитного аппарата (ОПН) даже на выводах ЭМ.

Ограничители перенапряжений принципиально не снижают ВВЭН на ЭД, в то время как защитные РС-цепочки снижают частоту собственных НЧ колебаний, вероятность повторного пробоя и крутизну нарастания напряжения.

Применительно к защите ЭД с помощью фазной РС-цепочки получены ВВЭН для выключателей с различной скоростью восстановления ЭП, которые подтвердили эффективность этой меры защиты: при длине питающего кабеля более 50 м и $K=60$ кВ/мс на уровне вероятности $P=0,999$ обеспечивается отключение без повторных пробоев практически всех наиболее распространенных ЭД (вплоть до мощности ~ 4 МВт), а при $K=40$ кВ/мс двигателей мощностью до 600 кВт.

Для определения сопротивления защитной (демпферной) цепочки R_d выполнены исследования, и разработаны соответствующие рекомендации. Основой методики является положение, согласно которому обеспечивается не апериодический характер ВЧ переходного процесса после пробоя МП ВДК, а такого (в том числе, колебательного), при котором выполняется условие непересечения током выключателя нулевого значения. Это позволило существенно расширить диапазон рекомендованных (допустимых) значений R_d (рис. 12).

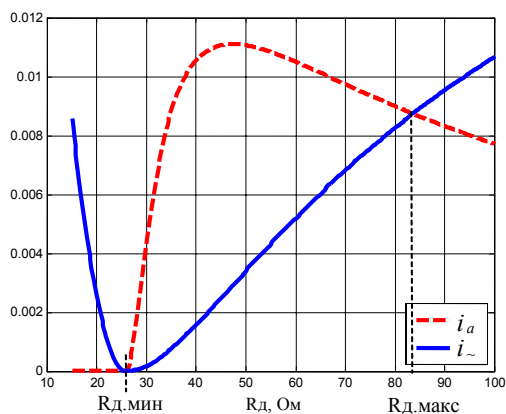


Рис. 12. К определению диапазона сопротивлений R_d

ний при применении межфазного включения цепочки приблизительно на 25÷30% ниже, что доказывает повышенную эффективность защиты с точки зрения предотвращения самого процесса эскалации напряжений.

Исследования показали, что оптимальное сопротивление демпферного резистора R_d зависит от соотношения (K_C) дополнительной емкости C_d к емкости присоединения и эквивалентной индуктивности ошиновки. Для $K_C=4\div5$ R_d находится в диапазоне от 4 до 15 $Z_{C.HЧ}$, которое определяется как $Z_{C.HЧ} = (1,5(L_{ш} + L_K) / 2C_d)^{0,5}$.

Анализ реализации защиты ЭД с помощью RC -цепочек (как фазных, так и междуфазных) показал, что оптимизация параметров цепочки, исходя из требования негашения дуги в ВДК до перехода промышленной составляющей тока выключателя через нулевое значение, часто не обеспечивает требуемого результата в силу присутствия в токе свободной компоненты, обусловленной колебаниями в контуре источник-сеть, которая при коммутации присоединения со значительной емкостью приводит к прерыванию тока в выключателе. В связи с этим сделан вывод, что основное назначение защитной цепочки - снижение частоты собственных НЧ колебаний в системе ЭД-кабель. Благодаря этому предотвращается сам факт повторного

пробоя МП ВДК и последующая эскалация перенапряжений.

Во второй главе приводятся результаты исследований, задача которых - повышение надежности эксплуатации распределительных сетей 6-35 кВ. Показывается, что эта цель достигается благодаря минимизации электрической нагрузки на изоляцию и ее поздней диагностике при *однофазных замыканиях на землю*.

Структурно задача диагностики

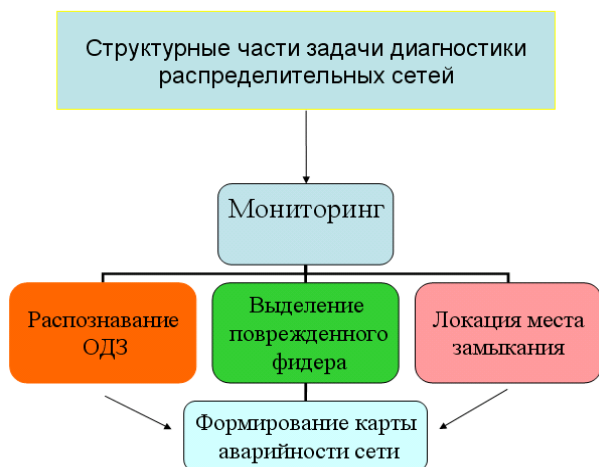


Рис. 13. Структура задачи диагностики состоя- ния распределительных сетей

состоит из блоков, которые представлены на рис. 13. Для реализации первой подзадачи – мониторинга разработан и внедрен в распределительные сети аппаратно-программный измерительный комплекс (рис. 14). Обработка результатов мониторинга за многолетний период его работы позволила получить основные характеристики естественных переходных процессов ОДЗ, в частности, для протяженных кабельных сетей установлено, что перенапряжения с вероятностью более, чем 0,95 не превышают $2,4...2,5U_{\text{фм}}$ (рис. 15), не ограничиваются защитными аппаратами и, следовательно, не определяют их энергетических характеристик.

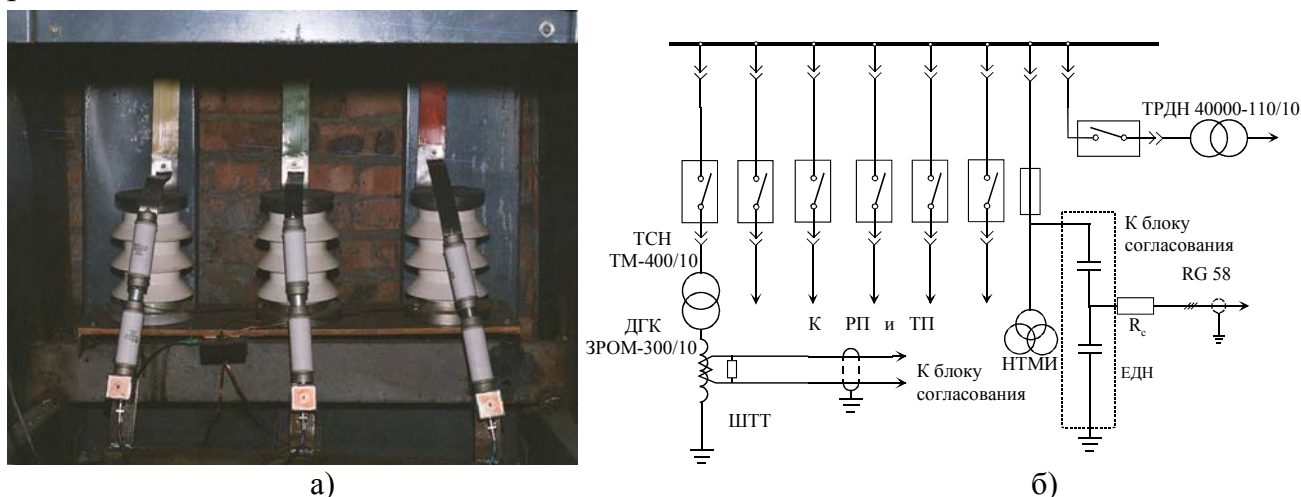


Рис. 14. Монтаж высоковольтных делителей напряжения в ячейке ОПН распределительной сети 10 кВ (а); пример схемы подключения системы мониторинга (б)

Для оценки кратности перенапряжений, инициируемых ОДЗ в сетях с изолированной нейтралью, разработан способ, основанный на экспериментальном определении затухания на частоте свободных колебаний, отвечающей перезарядным процессам на неповрежденных фазах. На основе информации о затухании

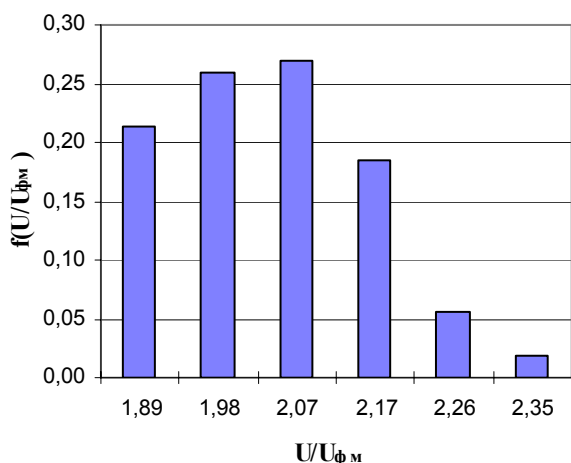


Рис. 15. Гистограмма плотности распределения фазо-перенапряжений при ОДЗ в первые 100 мс после первичного пробоя фазной изоляции

свободных колебаний в конкретной сети и предельном напряжении на нейтрали рассчитывается ожидаемая кратность перенапряжений, которая используется для определения необходимости применения защитных средств, в том числе, высокоомного заземления нейтрали.

Решение второй подзадачи диагностики – автоматическое распознавание ОДЗ из потока переходных (в том числе, аварийных) процессов, выполняется с использованием разработанных методов, основанных на свойствах переходного процесса замыкания на землю (ЗЗ). Метод распознавания ЗЗ, предна-

значенный для сетей с компенсацией емкостных токов замыкания на землю (ЕТЗЗ), использует свойство медленного восстановления напряжения на поврежденной фазе после самогашения заземляющей дуги.

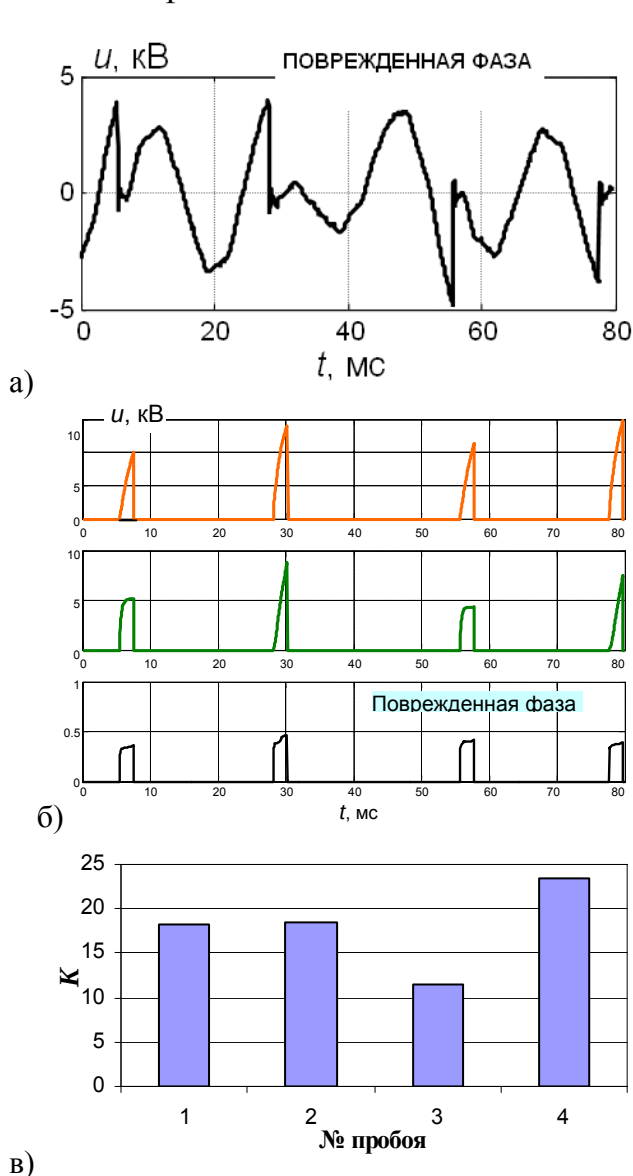


Рис. 16. Напряжение на поврежденной фазе (а), действующие напряжения после пробоя изоляции (б), признак ОДЗ K (в)

Параметр K для коммутации включения и при удержании в напряжении помимо вынужденной одной (основной) свободной составляющей переходного процесса ($U_{св}$), определяемый как

$$K \cong \left(\int_0^{t_{и}} [U_{фм} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) + U_{св} \sin(\beta t) e^{-\delta t}]^2 dt \right)^{0,5} \cdot \left(\int_0^{t_{и}} [U_{фм} \sin(\omega t + \pi \frac{5}{6}) + U_{св} \sin(\beta t) e^{-\delta t}]^2 dt \right)^{-0,5},$$

находится в диапазоне от 2,2 до 2,8 ($t_{и} \approx 3$ мс) при затухании свободной компоненты, характеризуемым отношением δ/β , от 0,1 до 0,2.

Рекомендовано значение признака ОДЗ $K > 3$. Эффективность этого метода распознавания ОДЗ подтверждена опытом его применения в системе on-line диагностики.

Действующее значение напряжения на поврежденной фазе, восстанавливающееся после самогашения дуги и получаемое интегрированием на малом временном интервале ($t_{и}$), существенно меньше напряжений на неповрежденных фазах. Для отсортированных по возрастанию фазных напряжений $U_{мин} < U_{ср} < U_{макс}$ выполняется условие $\frac{U_{ср}}{U_{мин}} > K$, где K – признак

замыкания, зависящий от коэффициента компенсации ЕТЗЗ (рис. 16).

Величина параметра (признака замыкания) K является определяющей при формировании вывода о факте возникновения ОДЗ. В силу различия реальных условий горения дуги, которые в немалой степени случайны, параметр K принимает разные значения. В связи с широкой вариацией этого параметра выполнены исследования, позволившие определить его минимальное значение, при котором факт замыкания на землю еще можно считать достаточно надежным. Сопоставление значений этого параметра выполнено для другого частого возмущения в сети – включения линий (цепочки линий).

Метод распознавания ОДЗ, разработанный для сетей с изолированной нейтралью, использует свойство малой скорости изменения напряжения нулевой последовательности (НП) на нейтрали (u_0) после гашения дуги. Напряжение на нейтрали после самогашения дуги и затухания свободных колебаний в контуре прямой последовательности фаз снижается, в основном, лишь в силу насыщения измерительных трансформаторов напряжения.

Скорость изменения напряжения НП (du_0/dt) вычисляется посредством его аппроксимации квадратичным полиномом на ограниченном временном интервале t_n с последующей простейшей обработкой. Выполненные исследования позволили определить длительность измерительного интервала, которая составила $t_n \approx 3$ мс, значения уставок по производной напряжения, а также по мгновенному значению напряжения u_0 в начале участка аппроксимации.

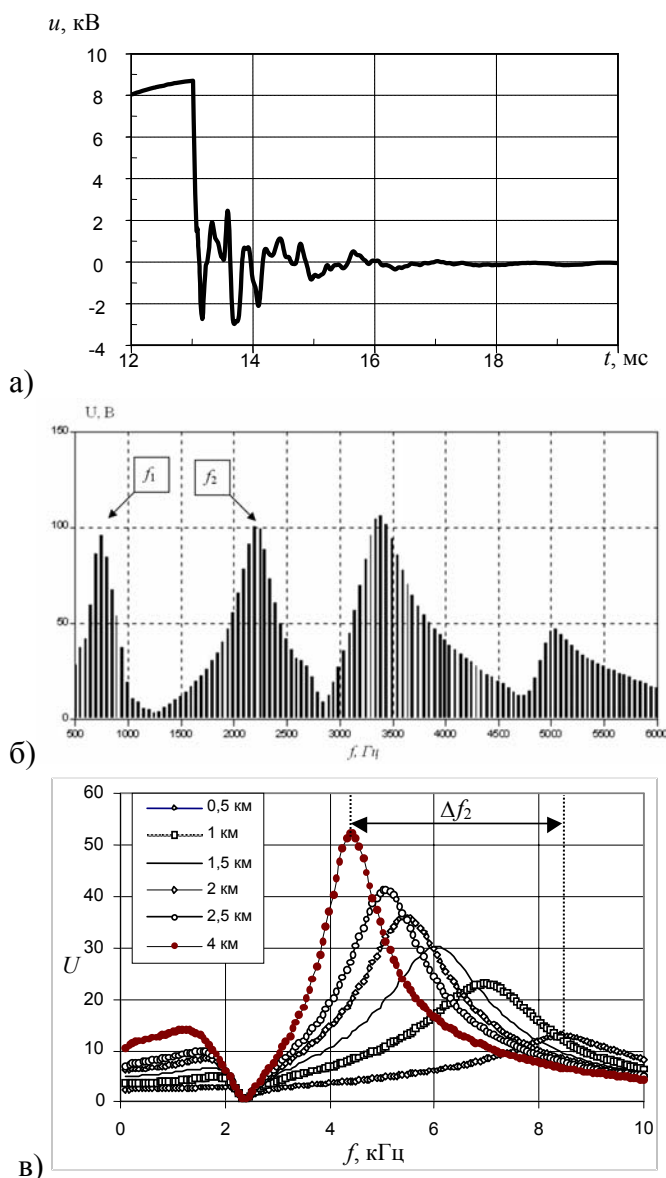


Рис. 17. Напряжение на фазе при замыкании на землю (а); частотный спектр напряжения (б); пример частотных характеристик (в)

Для выделения фидера с ОДЗ разработан метод, основанный на принципе противоположности полярностей первой полуволны переходного тока нулевой последовательности (i_0) в поврежденном и неповрежденном фидерах. Выделение фидера осуществляется только *при наличии факта распознавания ОДЗ* одним из выше указанных методов, что существенно повышает достоверность селекции. Показано, что вместо тока нулевой последовательности присоединения может использоваться ток в проводнике, заземляющем оболочку кабеля на подстанции. Разработанное на основе микроконтроллера устройство выделения фидера (УВФ) с ОДЗ, ориентированное на применение в распределительных кабельных сетях, внедрено в опытную эксплуатацию (см. рис. 20,а).

Надежное распознавание и выделение фидера с ОДЗ позволяют решать задачу определения места (локации) замыкания. Для этого разработано несколько методов: частотно-параметрический (ЧПМ), дифференциально-параметрический (ДПМ), дифференциально-волновой (ДВМ), метод разброса (МР). Частотно-параметрический метод (рис.17) основан на выделении частоты свободных колебаний (f_2) сети в переходном процессе за-

мыкания на землю, обусловленной разрядом фазной емкости. Расстояние до места замыкания определяется по выделенной с помощью прямого преобразования Фурье частоте f_2 и расчетным частотным откликам расстояния для поврежденной цепочки фидеров. Метод эффективен, когда горение заземляющей дуги достаточно продолжительно, и выделение частоты свободных колебаний не встречает трудностей.

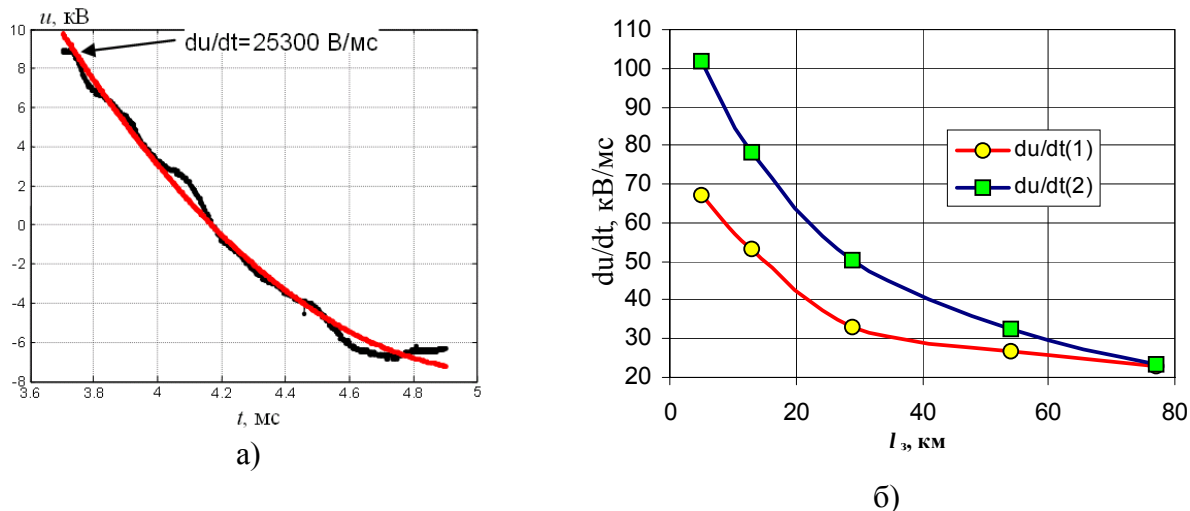


Рис. 18. Напряжение на поврежденной фазе в натурном эксперименте и его аппроксимация параболой (а); зависимость производной напряжения от расстояния (l_3) для двух состояний схемы электропитания (б)

При быстром погасании дуги используется ДПМ, использующий в качестве информативного параметра значение производной в начальный момент замыкания (рис.18,а). Напряжение на поврежденной фазе аппроксимируется квадратичным полиномом, вычисляется максимальное значение производной, которое нормируется по отношению к напряжению пробоя U_{Π} -

$$\left(\frac{d\hat{u}}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{d\hat{u}}{dt}\right)_{\max}^* \frac{1}{U_{\Pi}}.$$

На основе предварительно полученных расчетных зависимостей $l_3 = \varphi_k(\hat{d}\hat{u}^*/dt)$ (рис.18,б) определяется расстояние до места замыкания. Корректировка расчетных зависимостей в темпе процесса измерений (на основе оперативно поступающей информации) или заблаговременное расширение их количества и выбор в соответствии со схемой электропитания может потребоваться при значительном изменении последней, поскольку в этом случае происходит изменение частот собственных колебаний и, соответственно, производной. Экспериментальные исследования, проведенные в сетях 10 кВ, доказали работоспособность ЧПМ и ДПМ, которые ориентированы на локацию зоны замыкания в реальном времени. Не претендуя на высокую точность (относительная погрешность в зависимости от типа сети и места замыкания достигает 10-20%), они позволяют фиксировать самоустранившиеся замыкания, несущие информацию о состоянии изоляции, ее грубых дефектах.

ДВМ, использующий ДПМ и волновой методы, обладает заметно меньшей погрешностью локации и ориентирован на протяженные линии (например, элект-

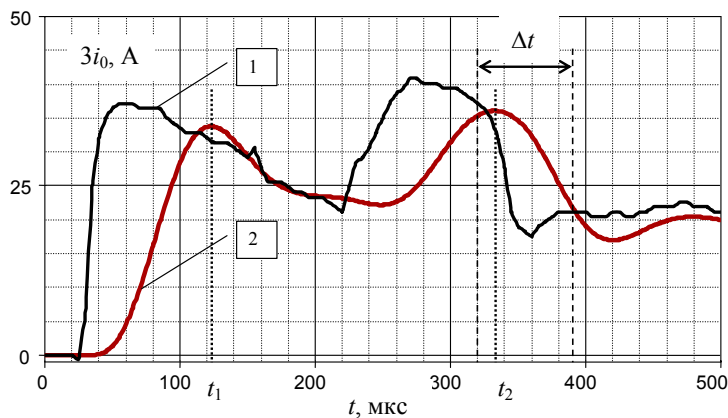
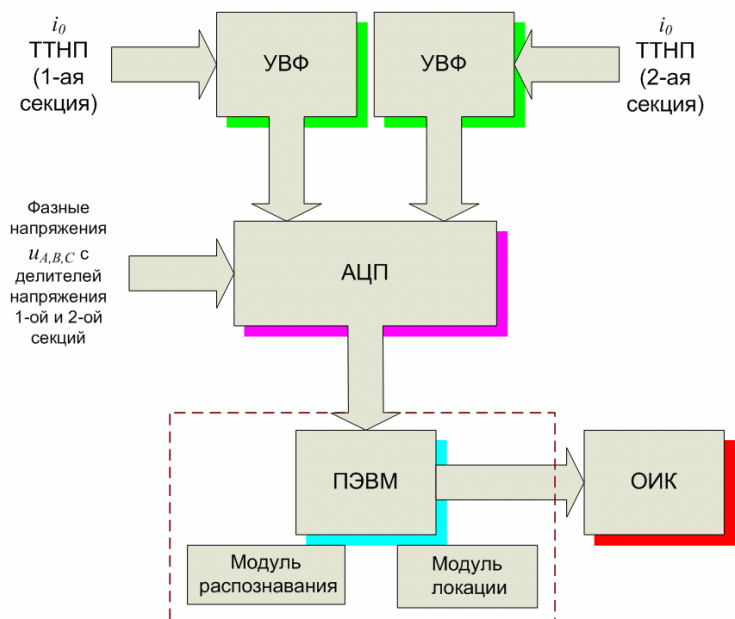


Рис. 19. Определение l_3 с использованием ДВМ: 1 - ток нулевой последовательности, 2 – ток после обработки ФНЧ; $l_3 \sim (t_2 - t_1)$



а)



б)

Рис. 20. Устройство выделения фидера (УВФ) с ОДЗ на 8 каналов (а) и структура системы мониторинга и диагностики (б) (ОИК – оперативно-измерительный комплекс)

трохимический защиты нефте- и газопроводов). В ДВМ первое приближение при определении расстояния до места замыкания ($l_{зп}$) выполняется с помощью ДПМ. На втором этапе уточненное расстояние l_3 рассчитывается после обработки осциллограммы (рефлектограммы) переходного тока (напряжения) НП адаптивным ФНЧ (рис.19), частота среза которого определяется значением $l_{зп}$.

На конкретном примере показано, что погрешность локации с помощью ДВМ уменьшается в 1,5-2 раза по сравнению с ДПМ и ДВМ.

Преимуществом метода разброса, основанного на сопоставлении расчетных и измерительной осциллограмм (т.е. на сопоставлении образов переходного процесса), является простота и формальный подход к локации места замыкания.

Совокупность выше описанных и решенных подзадач позволяет строить системы on-line диагностики изоляции распределительных сетей. Пример такой системы, реализованной в городской (преимущественно кабельной) сети 10 кВ, представлен на рис. 20,б.

В третьей главе рассматриваются вопросы осуществления надежного ОАПВ в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения, перспективные методы его реализации, излагаются подходы для получения интегральной оценки его эффективности.

Исследование всех стадий режима ОАПВ выполнено для широкого спектра ВЛ различного конструктивного исполнения, включающего рассмотрение как стационарных и переходных режимов бестоковой паузы ОАПВ, так и процесса восстановления нормального эксплуатационного режима – т.е. повторного включения фазы в цикле ОАПВ. Разработаны комплексы технических мероприятий, обеспечивающих безаварийное протекание этих режимов.

Проведен анализ первичных параметров ВЛ различного конструктивного исполнения с большой и малой несимметрией фазных параметров. Показано, что для практических расчетов неравномерность распределения зарядов по составляющим фазных проводов оказывает малое влияние на значения первичных параметров и ею можно пренебречь, в то время, как неучет грозозащитного троса недопустим: экранирующий эффект троса снижает ток подпитки дуги (вторичный ток дуги - I_d) на 10...20% (в зависимости от конструктивного исполнения ВЛ) и вносит существенную погрешность при расчете восстанавливающихся напряжений (U_v), особенно в неполнофазных резонансных схемах электропередачи.

Компактные линии электропередачи, характеризуемые малым эквивалентным радиусом (в силу незначительного количества фазных составляющих и шага расщепления), и, следовательно, малой междупазной емкостью и относительно малой натуральной мощностью, не требуют дополнительных сложных мероприятий для осуществления надежного ОАПВ.

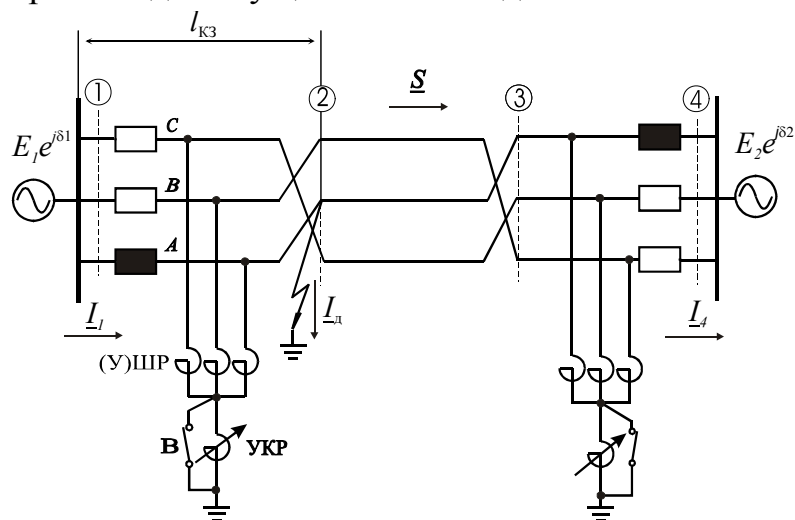


Рис. 21. Схема электропередачи для моделирования стационарных режимов ОАПВ

Анализ стационарных процессов при ОАПВ выполнен с использованием различных математических моделей электрической передачи. Для выявления основных закономерностей, связанных с влиянием степени асимметрии фазных параметров линии, схемы транспозиции и фазировки проводов и т.д. разработана упрощенная модель, основанная на разложении режимных параметров бесто-

ковой паузы ОАПВ (I_d и U_v) на электромагнитную и электростатическую составляющие. Такая модель позволяет получать расчетные значения факторов, определяющих надежность осуществления ОАПВ, с погрешностью 2-8%.

Достаточно полная и в то же время несложная модель электропередачи, которая может использоваться для сопоставления эффективности различных способов осуществления ОАПВ, реализована с помощью матричных многополюсников. Система уравнений, описывающая режим электрической системы с двумя источниками (рис. 21), соединенными ВЛ с поперечной компенсацией, в матричной форме имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= U_1 + Z_1 I_1, \\ \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} &= A_1 \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} &= A_2 \cdot \begin{bmatrix} U_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_3 \\ I_3 \end{bmatrix} &= A_3 \cdot \begin{bmatrix} U_4 \\ I_4 \end{bmatrix} \\ E_2 &= U_4 - Z_2 I_4, \end{aligned} \right\}, \quad \text{где } A_k - \text{эквивалентные матрицы } A - \text{параметров,}$$

$$N = [U_1 I_1 U_2 I_2 U_3 I_3 U_4 I_4]^T,$$

$$E = [\{E_1 \ 0 \ 0\} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \{E_2 \ 0 \ 0\}]^T,$$

$$E_i = \alpha E_i e^{j\delta_i}, \quad \alpha = [\underline{\alpha} \quad \underline{\alpha}^2 \quad 1], \quad \underline{\alpha} = e^{j2\frac{\pi}{3}}, \quad i=1,2.$$

Решение этой системы уравнений относительно вектора неизвестных N дает значения искомых токов и напряжений для четырех сечений вдоль ЛЭП.

Исследование влияния асимметрии фазных параметров ВЛ на режимные параметры бестоковой паузы ОАПВ выполнено при введении коэффициентов электростатической ($\gamma = C_{\text{ффII}}/C_{\text{ффI}}$) и магнитной ($\xi = M_{\text{II}}/M_{\text{I}}$) асимметрии и разложении режимных параметров на асимметричные и симметричные составляющие, обусловленные участками ВЛ, где «особая» фаза (применительно к однократному циклу транспозиции проводов) занимает геометрически крайнее или среднее положение.

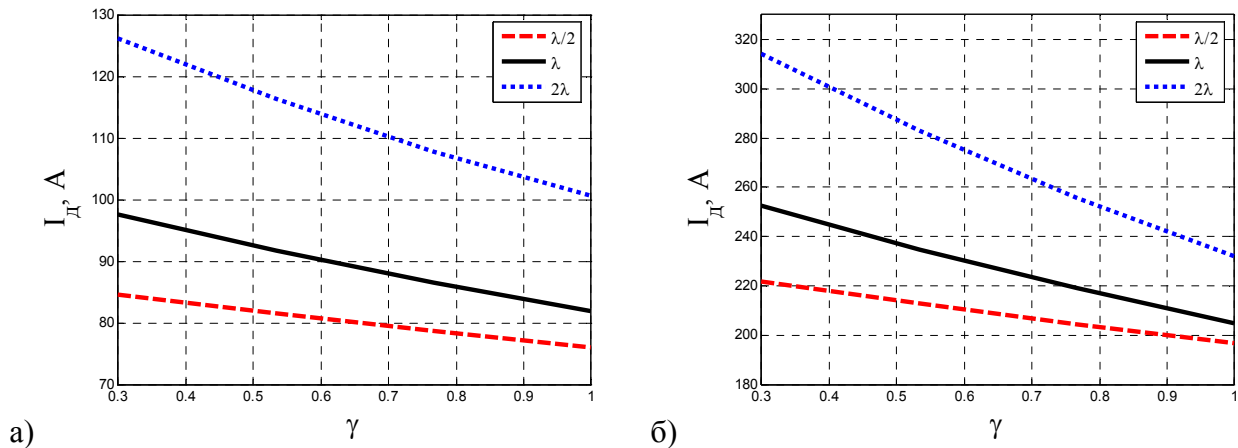


Рис. 22. Зависимость тока подпитки дуги от коэффициента асимметрии линии
(а – традиционная ВЛ 500 кВ, б – компактная ВЛ 500 кВ)

Показано, что асимметрия фазных параметров ВЛ приводит к существенному росту токов подпитки дуги (рис.22), которые увеличиваются с возрастанием угла передачи мощности на линии δ и степени компактности ВЛ. Большие значения режимных параметров бестоковой паузы ОАПВ в компактных ВЛ обусловлены более согласным направлением асимметричной электромагнитной составляющей с электростатической составляющей.

С ростом протяженности ВЛ СВН и тенденциями к компактизации канала передачи энергии традиционный симметричный четырехлучевой реактор (рис.23,а) уже не обеспечивает требуемой глубины компенсации тока подпитки дуги, что требует увеличения бестоковой паузы ОАПВ или применения более сложных схемно-технических решений – отключения по определенному алго-

ритму в цикле ОАПВ фазных шунтирующих реакторов (рис. 23,б), их переключения (рис. 23,в), или выбора оптимального сопротивления компенсационного реактора для каждой фазы и подключения требуемой отпайки в цикле ОАПВ (рис. 23,г).

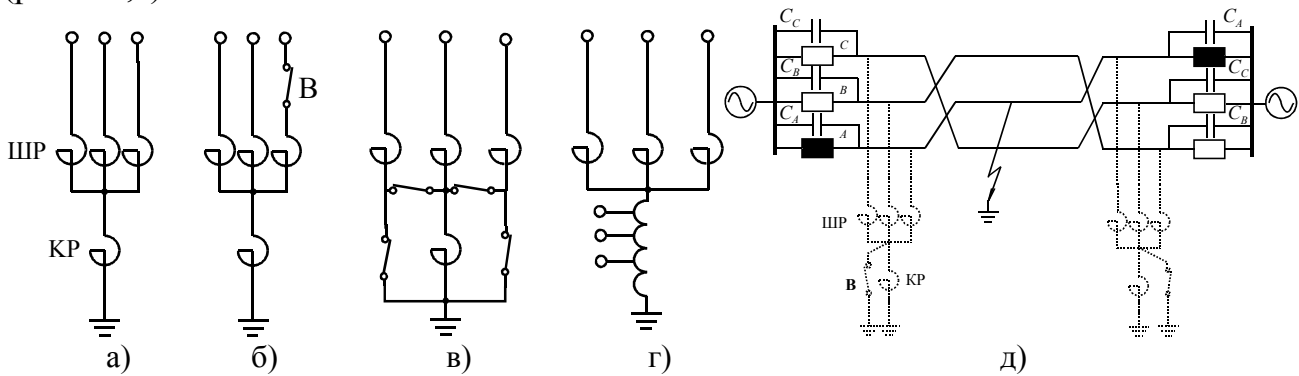


Рис. 23. Схемы компенсационных способов подавления тока подпитки дуги

Наряду с индуктивной компенсацией подавление тока подпитки дуги может осуществляться и *емкостным* током от источников ЭДС поврежденной фазы (со стороны отправной и/или приемной систем), поскольку емкостный ток от этих источников ЭДС имеет направленность, близкую к противоположной току от неповрежденных фаз, что позволяет путем выбора соответствующих емкостей более глубоко снизить токи подпитки дуги (рис. 23,д). Последний способ может сочетаться и со способами индуктивной компенсации.

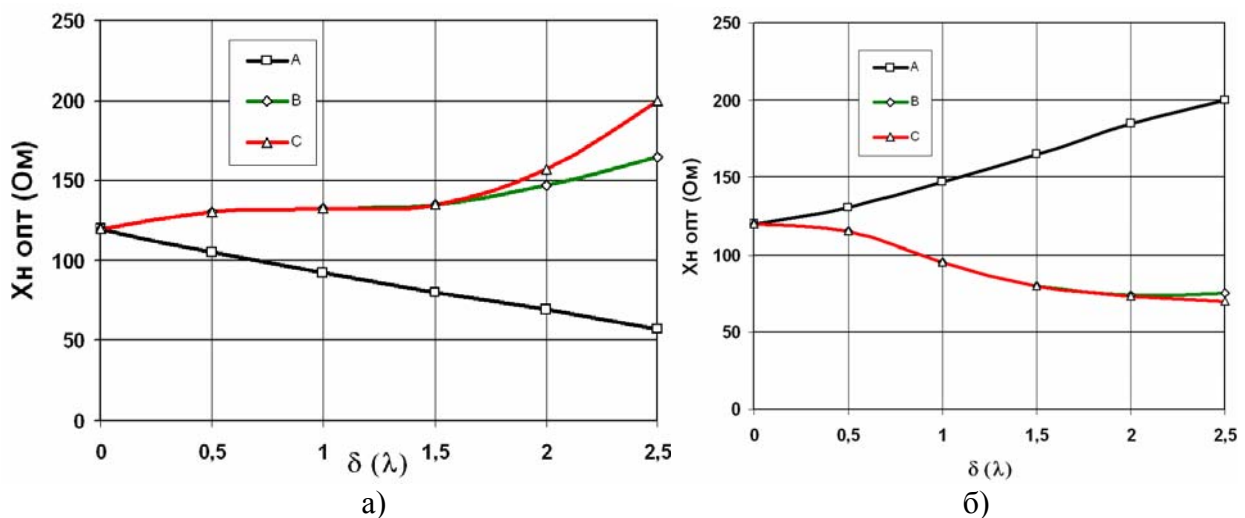


Рис. 24. Пример зависимости оптимального сопротивления X_n УКР от угла передачи мощности δ на линии: а - область положительных значений угла δ , б – отрицательных углов δ

Все варианты (способы) компенсации тока подпитки дуги, основанные на дискретном изменении параметров индуктивных или емкостных компенсирующих элементов электропередачи принципиально менее эффективны по сравнению с разработанным методом *управляемого ОАПВ*, в котором используется плавно регулируемый элемент (компенсационный (КР) или шунтирующий реактор (ШР)), позволяющий обеспечить оптимальную компенсацию тока подпитки дуги.

ции, и, тем самым, углублять подавление вторичного тока дуги. Такое управляемое ОАПВ можно назвать *пофазным*.

Для осуществления пофазного УОАПВ разработан алгоритм определения токов лучей ШР неповрежденных фаз, основанный на нахождении вектора небаланса тока подпитки дуги (т.е. тока, подлежащего компенсации) $\Delta I = I_d - I_{d, \text{доп}}$, вычитании этого вектора из суммарного компенсационного тока ШР и разложении нового компенсационного тока по базису, образованному исходными токами компенсации (рис. 26). Определение токов ШР неповрежденных фаз для известных токов компенсации осуществляется решением системы линейных уравнений.

Управляемое ОАПВ высокоэффективно на двухцепных, в том числе, комбинированных ВЛ. Фаза тока подпитки дуги в многоцепных ВЛ определяется влиянием всех цепей, что осложняет применение компенсационных способов. Однако благодаря пофазному УОАПВ фаза компенсационного тока приобретает дополнительную степень свободы, что позволяет глубоко подавлять ток подпитки дуги.

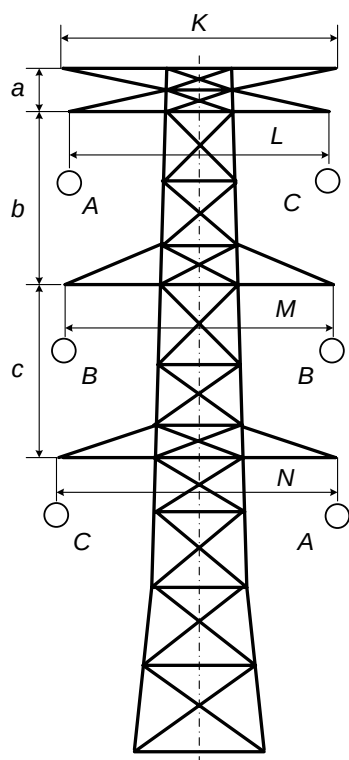


Рис. 27. Двухцепная ВЛ
765 кВ

В комбинированных ВЛ цепь низшего напряжения (НН) находится под сильным электромагнитным влиянием цепи высшего напряжения (ВН), что существенно осложняет осуществление ОАПВ. Использование компенсационного тока, формируемого четырехлучевым управляемым реактором цепи ВН, позволяет реализовать высокоэффективное ОАПВ. Ток компенсации может иметь широкий диапазон значений как величины, так и фазы благодаря его вводу непосредственно с нейтрали ШР (посредством выключателей), минуя сопротивление фазного луча. Эффективность пофазного УОАПВ как цепи ВН, так и цепи НН показана на примере комбинированной компактной ВЛ 1150/500 кВ длиной 450 км и межфазным расстоянием 15 м. Ток подпитки дуги при КЗ на любой из цепей напряжения ограничивается на уровне 40-50 $A_{\text{макс}}$.

Эффективность применения пофазного УОАПВ проверена также применительно к двухцепной (Корейской) ВЛ 765 кВ (рис. 27). Показано, что ток подпитки дуги на линии длиной 400 км может быть снижен с 260 (без компенсации) до 55-65 $A_{\text{макс}}$ (и ниже).

Снижение режимных параметров бестоковой паузы ОАПВ гарантирует более быстрое гашение дуги подпитки, но даже сам факт гашения дуги подпитки является случайным событием. Адаптивное ОАПВ (АОАПВ) позволяет повысить уровень надежности успешного повторного включения отключенной фазы, поскольку факт гашения дуги подтверждается на основе измерений, выполняемых в течение бестоковой паузы ОАПВ.

Исследования показали, что в протяженных, поперечно компенсированных ЛЭП зона нечувствительности АОАПВ, выполняемого при контроле за состоя-

нием дуги по модулю восстанавливающегося напряжения, и фиксированном значении уставки значительна, поэтому она должна быть динамической – изменяемой в соответствии с углом передачи мощности δ . В ЛЭП, где наблюдается резонанс напряжения в режиме ОАПВ, первоначально проверяется факт погасания дуги, после чего выполняется расстройка резонанса напряжений путем включения/отключения ШР (или изменением мощности УШР).

При реализации АОАПВ по модулю напряжения, измеряемому на одном из концов ВЛ, имеют место зоны нечувствительности. Контроль за состоянием дуги подпитки по фазе восстанавливающегося напряжения практически не имеет зон нечувствительности (она появляется только в области смены полярности угла передачи мощности δ и определяется только аппаратной погрешностью измерения фазы напряжения).

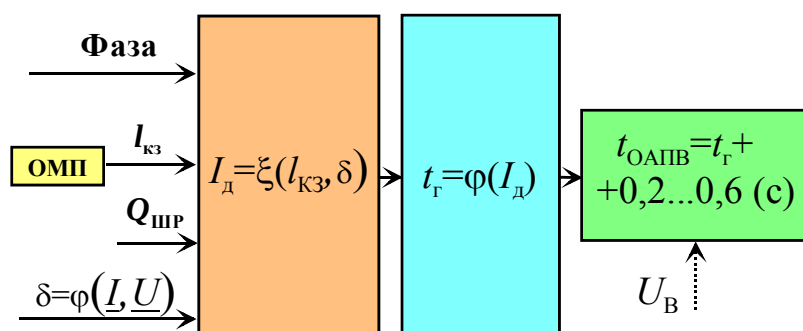


Рис. 28. Структурная схема псевдо-адаптивного ОАПВ

В работе разработан метод псевдо-адаптивного ОАПВ, который основан на вычислении в цикле бестоковой паузы ОАПВ тока подпитки дуги и, следовательно, времени бестоковой паузы (рис. 28). Метод принципиально не имеет зон нечувствительности и может

применяться как автономно, так и совместно с традиционным АОАПВ.

Функции АОАПВ полностью и высоконадежно реализуются в УОАПВ при условии перекомпенсации реактансом ШР емкостного сопротивления отключенной фазы. Перед выполнением управляемого (повторного) включения отключенной фазы неизбежно подтверждается факт погасания дуги подпитки, поскольку напряжение на фазе в режиме горения дуги многократно меньше фазного напряжения даже в режимах транзита по ЛЭП значительной мощности.

В общем случае (при отсутствии управляемого включения ЛЭП) защитные аппараты – ОПН подвергаются энергетическим нагрузкам. Исходя из одинаковых начальных условий коммутации повторного включения в цикле ОАПВ и принимая во внимание возможность последующего трехфазного АПВ после неуспешного ОАПВ, на основе многофакторного вычислительного эксперимента получены энергетические нагрузки на защитные аппараты, которые подтверждают прогнозируемый рост требуемой энергоемкости ОПН с увеличением длины и натуральной мощности (в том числе компактных) линий. Показано, что как для ВЛ 500 кВ традиционного ($Z_c \approx 280$ Ом), так и компактного исполнений ($Z_c \approx 140$ Ом) протяженностью до 600-650 км и установке на разомкнутом конце линии одного ШР удельная поглощаемая энергия защитного аппарата не превышает 10 кДж/кВ, т.е. достаточен аппарат 5-го класса пропускной способности (а при малых длинах линий – меньшего класса).

Интегральная оценка эффективности ОАПВ в ВЛ различного конструктивного исполнения и его осуществление различными способами может выполняться

с помощью разработанной методики, основанной на определении области допустимых геометрических параметров ВЛ, при которых происходит успешное самогашение дуги подпитки.

Построение области допустимых параметров и вычисление ее относительно-го объема ($V_{I_d < I_{d, \text{доп}}}$), характеризующих возможность самогашения дуги подпитки, выполняется на основе регрессионных зависимостей $I_d = \varphi(S, r_3, l)$, получаемых с помощью многофакторного вычислительного эксперимента, где факторами выступают: S – междуфазное расстояние, r_3 – эквивалентный радиус фазы, l – длина ВЛ. Конструкции ВЛ, в которых возникают недопустимые напряжения на нейтрали ШР (U_n), также исключаются из области допустимых значений параметров S, r_3, l . Учет последнего требования приводит к дополнительному ограничению области допустимых значений геометрических параметров ВЛ (рис. 29).

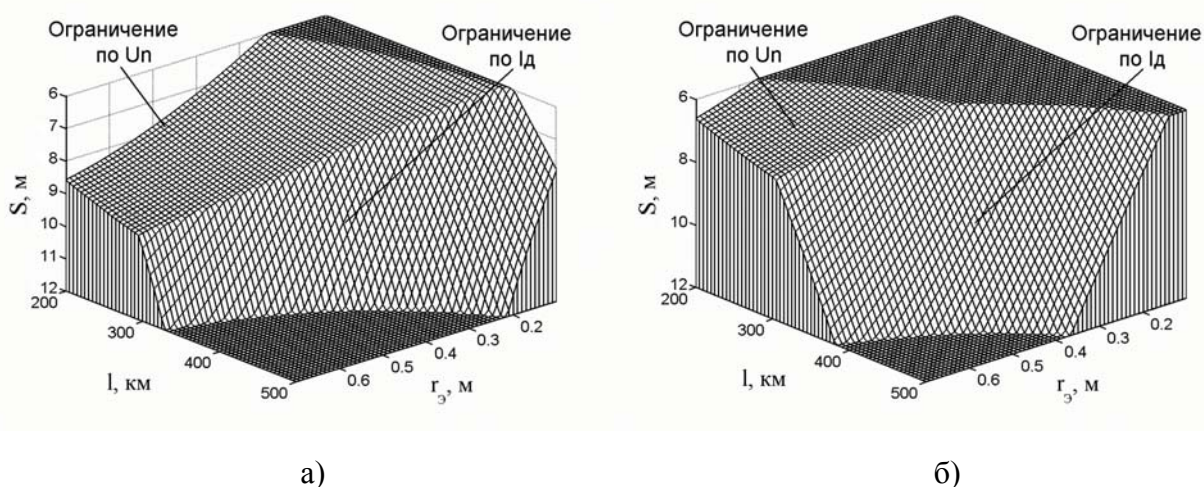


Рис.29. Области допустимых параметров ВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением проводов, ограниченные предельно допустимым током подпитки дуги и напряжением на нейтрали ШР (а - $K_p=60\%$, ЧЛР, $V_f=47\%$; б – $K_p=80\%$, ЧЛР, $V_f=72\%$)

Установлено, что в ЛЭП с треугольным расположением проводов и коэффициенте компенсации рабочей емкости $K_p \approx 80\%$, эффективность ОАПВ выше на 30%, чем в ЛЭП с горизонтальным расположением проводов ($I_{d, \text{доп}} = 70 \text{ А}_{\text{макс}}$). Показано, что коэффициент эффективности ОАПВ в ВЛ с треугольными фазами составляет (для рассмотренного диапазона геометрических параметров ВЛ) лишь 6% ($K_p=80\%$), в то время как в ВЛ, оснащенных четырехлучевыми реакторами (ЧЛР), – 72%.

Определение коэффициента эффективности ОАПВ на конкретной ЛЭП строится на подходе, аналогичном выше приведенному, - на основе регрессионных зависимостей $I_d = \varphi(l_{K3}, \delta)$, рассчитываемых для всех фаз ВЛ и введении ограничения по току подпитки дуги. В случае, когда регрессионные модели $I_d = \varphi(l_{K3}, \delta)$ имеют низкий уровень адекватности истинным функциональным связям, расчет коэффициента эффективности для некоторого фиксированного (предельного) угла передачи мощности δ выполняется по выражению

$K_{\text{эфф.ОАПВ}} = \frac{6l_{\text{ВЛ}} - l_{\Sigma}(I_{\text{д}} > I_{\text{д.доп}})}{6l_{\text{ВЛ}}}$ на основе графического определения зоны расстояний до места КЗ на линии, где выполняется условие $I_{\text{д}} > I_{\text{д.доп}}$.

В заключении отражены основные методические и практические выводы и результаты диссертации.

В приложении представлены документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

Основные выводы по работе

Выводы методического характера.

1. Показано, что крутизна перенапряжений, воздействующих на обмотки электрических машин в типовых схемах электропитания СН электрических станций, определяется, в основном, эквивалентной индуктивностью ошиновки и волновым сопротивлением коммутируемого кабеля.

2. Выполнен анализ применимости различных математических моделей обмотки электрической машины при исследовании волновых процессов. Разработана распределено-сосредоточенная модель обмотки, учитывающая частотные зависимости всех первичных параметров. Для точного определения градиентных перенапряжений при фронтах импульсов перенапряжений длительностью менее 1 мкс предложено корректировать частотную зависимость эффективной индуктивности катушки на основе экспериментально полученной скорости распространения электромагнитной волны в зависимости от длительности фронта набегающего на обмотку импульса.

3. Разработана аналитическая модель процесса эскалации перенапряжений, учитывающая основные характеристики сети, выключателя, и двигательного присоединения, позволяющая оценить как кратности перенапряжений, так и необходимость применения средств защиты для конкретных двигательных присоединений.

4. Разработаны методики определения вероятности возникновения эскалации перенапряжений при отключении заторможенных электродвигателей на спадающем и возрастающем токе отключения, и вероятности возникновения виртуального среза тока в выключателе при отключении развернувшегося электродвигателя.

5. Разработаны упрощенные методики оценки эффективности защитных аппаратов, устанавливаемых на питающем конце двигательного присоединения, а также рекомендации по выбору параметров защитных активно-емкостных цепочек.

6. Исследованы основные характеристики процессов замыкания на землю, на основе которых разработаны способы распознавания ОДЗ для распределительных сетей с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов замыкания с помощью ДГР. На основе анализа полярностей переходных токов нулевой последовательности и одновременного распознавания ОДЗ разработан надежный метод выделения фидера с замыканием на землю, удовлетворяющий требованиям on-line диагностики распределительных сетей.

7. Предложена структура системы on-line диагностики распределительных сетей, состоящей из модулей мониторинга, распознавания повреждений, выделения фидера с ОДЗ, и локации зоны замыкания. Диагностические данные и карта аварийности сети предназначены для целенаправленной профилактики и ремонта изоляции.

8. Разработана методика оценки влияния асимметрии параметров ВЛ на режимные параметры бестоковой паузы ОАПВ, основанная на разложении электромагнитной и электростатической составляющих на симметричные и асимметричные компоненты. Показано, что ток подпитки дуги в ВЛ асимметричных конструкций в режимах передачи значительной мощности ($\delta=2\lambda$), превосходит на 30-40% ток в идеально транспонированных (хорошо симметрированных) ВЛ.

9. Предложена математическая модель компенсированной линии электропередачи, основанная на использовании матричных n -полюсников, позволяющая детально моделировать стационарные режимы электропередачи, в том числе и в режиме ОАПВ.

10. Введено понятие и разработан метод управляемого ОАПВ (УОАПВ), в котором наиболее эффективно подавляются все режимные параметры бестоковой паузы ОАПВ. Для реализации метода могут применяться современные управляемые реакторы как трансформаторного типа, так и с подмагничиванием магнитопровода. Для наиболее глубокого подавления режимных параметров бестоковой паузы ОАПВ предлагается использовать УОАПВ с пофазным управлением, которое высокоэффективно и для многоцепных ВЛ. Показано, что УОАПВ просто и надежно реализует функции адаптивного ОАПВ и управляемого повторного включения отключенной фазы.

11. Разработана методика определения коэффициента эффективности ОАПВ в ЛЭП различного исполнения, учитывающая ограничение как по току подпитки дуги, так и по величине напряжения на нейтрали ШР (и КР). Количественно показана более высокая эффективность ОАПВ в ВЛ с более симметричными первичными параметрами.

12. Для определения коэффициента эффективности ОАПВ на конкретной линии предложена простая методика его вычисления.

Выводы практического характера.

1. Необходимость защиты электродвигателей должна базироваться на оценке вероятности возникновения перенапряжений значительной кратности, методика определения которой приведена в диссертации.

2. Подход к защите электродвигателей должен основываться исходя из определения не только кратности перенапряжений, но и их крутизны. При значительной крутизне перенапряжений, воздействующих на обмотки машин, наиболее эффективно применение защитных RC -цепочек, которые позволяют не только уменьшить кратность перенапряжений, но максимально снизить вероятность повторных пробоев в выключателе, т.е. исключить сам источник перенапряжений. В схемах электропитания, содержащих электрические машины, где крутизна перенапряжений принципиально невелика, в качестве единственной аппаратной меры защиты могут применяться ОПН, эффективность которых максимальна при их установке на выводах ЭМ.

3. Разработаны несложные измерительные аппаратно-программные комплексы, которые могут применяться как для мониторинга быстропротекающих процессов (имеющих место, например, в сетях собственных нужд станций при коммутации присоединений с ЭД), так и в распределительных сетях.

4. Разработано устройство выделения фидера с ОДЗ, которое в составе информационно-измерительного комплекса, сопряженного с системой телеметрии, предназначено для решения задачи on-line диагностики распределительных сетей.

5. Линейная изоляция ВЛ 500 кВ традиционного исполнения (а также изоляции оборудования линейных ячеек подстанций), в которых предусмотрены мероприятия по предотвращению резонансного повышения напряжения в цикле ОАПВ, надежно защищается с помощью ОПН 4-го класса пропускной способности и ШР мощностью 180 МВАр, включенного на разомкнутом конце ВЛ. В компактных и протяженных ВЛ (500 кВ) может потребоваться применение ОПН 5-го класса, а при превышении длин линий повышенной натуральной мощности свыше 600-650 км выдвигается дополнительное требование к мощности (количеству) (У)ШР, подключенных в конце коммутируемой ВЛ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кадомская К.П. Способы гашения дуги подпитки в режиме паузы ОАПВ однопроводных воздушных линий повышенной пропускной способности / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Г.П. Шевцов // Изв. ВУЗов, сер. Энергетика, № 7, 1987. –С. 10-15.
2. Кадомская К.П. Вероятностные характеристики режимных параметров бестоковой паузы АПВ / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Г.П. Шевцов // Изв. ВУЗов, сер. Энергетика, №1, 1988. - С. 54-57.
3. Белых В.П. Требования к комплексу мер защиты от коммутационных перенапряжений в компактных ВЛ / В.П. Белых, К.П. Кадомская, В.Е. Качесов // Изв. ВУЗов, сер. Энергетика, № 1, 1989. – С. 47-51.
4. Голдобин Д.А. Мониторинг перенапряжений в распределительных кабельных сетях / Д.А. Голдобин, В.Е. Качесов, В.Н Ларионов, А.Г. Овсянников // Научный вестник НГТУ, №2(5), - Новосибирск, НГТУ, 1998. – С. 109-116.
5. Кадомская К.П. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Ю.А. Лавров, А.Г. Овсянников, В.А. Сахно // Электротехника, №11, 2000. –С. 48-51.
6. Качесов В.Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В.Е. Качесов, В.Н. Ларионов, А.Г. Овсянников // Электрические станции, №8, 2002. -С. 38-45.
7. Качесов В.Е. Параметрический способ определения мест повреждения в распределительных сетях / В.Е. Качесов, В.Ю. Лавров, А.Б. Черепанов // Электрические станции, №8, 2003. –С. 37-43.

8. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением / В.Е. Качесов // Электричество №6, 2005. – С. 9-19.
9. Качесов В.Е. О перспективах применения управляемых реакторов в цикле ОАПВ линий электропередачи сверхвысокого напряжения / В.Е. Качесов // Электричество, №12, 2005. – С. 2-13.
10. Качесов В.Е. Оценка вероятности возникновения эскалации перенапряжений при отключении заторможенных электродвигателей / В.Е. Качесов // Электротехника, №4, 2006. – С. 13-21.
11. Качесов В.Е. Аналитическая модель процесса эскалации перенапряжений при отключении заторможенных электродвигателей / В.Е. Качесов // Электричество, №8, 2006. – С. 10-22.
12. Борисов С.А. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки / С.А. Борисов, В.Е. Качесов, А.В. Кукавский, С.С. Шевченко // Электрические станции, №11, 2006. – С. 51-59.
13. Богдасева Л.В. О параметрических методах локализации однофазных замыканий в распределительных сетях / Л.В. Богдасева, В.Е. Качесов // Научный Вестник НГТУ, №3 (24), -Новосибирск, НГТУ, 2006. – С. 33-43.
14. Качесов В.Е. Исследование перенапряжений на высоковольтном электродвигателе и корректировка модели обмотки / В.Е. Качесов // Электротехника, №6, 2007. – С. 50-60.
15. Качесов В.Е. Перенапряжения и их ограничение при отключении заторможенных электродвигателей вакуумными выключателями / В.Е. Качесов // Электричество, №3, 2008. – С. 15-26.
16. Качесов В.Е. Эскалация перенапряжений, виртуальный срез тока в вакуумных выключателях при отключении электродвигателей и их предотвращение с помощью RC-цепочек / В.Е. Качесов // Электричество, №6, 2008. – С. 24-35.
17. А.с. 1277278 СССР (от 15.08.84), МКИ H02H. Способ однофазного автоматического повторного включения цепи высшего напряжения в комбинированных линиях переменного тока / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов // Открытия. Изобретения, № 46, 1986.
18. Патент РФ 2101825 (от 23.04.1996), МПК 6H02H3/06. Способ однофазного автоматического повторного включения в электропередачах переменного тока / В.Е. Качесов // БИ №1, 1998 г.
19. Патент РФ 2160951 (от 08.07.1998), МПК 7H02H3/06. Способ однофазного автоматического повторного включения в электропередачах переменного тока / В.Е. Качесов // БИ № 35, 2000 г.
20. Патент РФ № 2216749 (от 27.03.2001), МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях / В.Е. Качесов // БИ №32, 2003.
21. Патент РФ № 2222026 (от 11.01.2002), МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях / В.Е. Качесов // БИ №2, 2004.
22. Патент РФ № 2232456 (от 11.10.2002), МПК H02H3/16. Способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в рас-

- пределительных сетях с резонансно-заземленной нейтралью / *В.Е. Качесов* // БИ № 19, 2004.
23. Патент РФ № 2250472 (от 07.07.03), МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в радиальных распределительных сетях / *В.Е. Качесов* // БИ № 11, 2005.
24. Патент РФ № 2254586 (от 24.12.03), МПК G01R31/08. Способ определения фидера с однофазным дуговым замыканием на землю в радиальных распределительных кабельных сетях / *В.Е. Качесов* // БИ № 17, 2005.
25. Патент РФ № 2271546 (от 12.07.04), МПК G01R31/08. Способ определения максимальных перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью / *В.Е. Качесов* // БИ № 7, 2006.
26. Патент РФ № 2279687 (от 26.11.04), МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного дугового замыкания в радиальных распределительных сетях / *В.Е. Качесов* // БИ № 19, 2006.
27. Патент РФ № 2305887 (от 07.07.05), МПК H02H 9/04. Высоковольтная электрическая сеть с электродвигателями / *В.Е. Качесов* // БИ № 25, 2007.
28. *Качесов В.Е.* Мониторинг аварийных событий в городских кабельных сетях 10 кВ / *В.Е. Качесов, В.Н. Ларионов, А.Г. Овсянников* // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования: - Вып.11 –СПб.: ПИПК, 2000 г.
29. Cherepanov A.B. Parametric method of fault location in distribution underground networks / A.B. Cherepanov, *V.E. Kachesov*, V.Yu. Lavrov // First International Conference on Technical & Physical Problems in Power Engineering: proceedings, 23-25 April, 2002, Baku, Azerbaijan, pp. 92-97.
30. Dikoy V. Monitoring overvoltages in underground HV cable distribution networks / V. Dikoy, *V. Kachesov*, A.Ovsiyannikov, V. Larionov. // CIGRE: proceedings, Paris, Session 2002, 21-103.
31. *Kachesov V.* Outcomes of overvoltages monitoring and fault location in underground distribution networks / *V. Kachesov*, V. Lavrov, A. Ovsajnnikov / The 6th Korean-Russian International Symposium on Science and Technologies KORUS-2002: proceedings, Novosibirsk, NSTU, 2002, pp.233-238.
32. *Качесов В.Е.* О мониторинге распределительных сетей / *В.Е. Качесов, В.Н. Ларионов, Ю.А. Лавров, Д.Е. Павликов, А.Г. Овсянников* // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ: Труды Второй Всероссийской научн. техн. конф. - Новосибирск, 2002. – С. 136-142.
33. *Kachesov V.* On-line fault locating in distribution networks / *V. Kachesov*, A. Ovsyannikov // The 7th Korean-Russian Int. Symp. on Science and Technologies: proceedings.- Ulsan, University of Ulsan, June 28 – July 2, 2003, Vol. 2, pp. 484-488.
34. Борисов С.А. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки и их мониторинг / С.А. Борисов, *В.Е. Качесов*, С.С. Шевченко // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35: Труды Третьей Всероссийской научн.-техн. конф. - Новосибирск, 2004. – С. 90-96.
35. Богдашева Л.В. Локация однофазных дуговых замыканий в сетях 10 кВ/ Л.В. Богдашева, *В.Е. Качесов*, Н.Д. Кузнецов, В.С. Луферов, И.Л. Дегтярев // Ог-

раничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ: Труды третьей Всероссийской научн.-техн. конф. -Новосибирск, НГТУ, 2004. -С. 168-173.

36. Bogdasheva L.V. Parametric on-line fault location methods for distribution MV networks / L.V. Bogdasheva, V.E. Kachesov // IEEE PowerTech'2005: proceedings, St.-Petersburg, 2005, paper 159.
37. Bogdasheva L. Making allowance for varied load and network topology in parametric location of phase-to-ground faults / L. Bogdasheva, V. Kachesov // The 7th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE2006): proceedings, Brno, May 2006, paper 122.
38. Богдашева Л.В. ON-LINE диагностика распределительных сетей / Л.В. Богдашева, В.Е. Качесов, С.С. Шевченко, В.П. Михеев, А.В. Орлянский, О.Н. Остапенко, Е.Н. Дементьев // Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ: Труды Четвертой Всероссийской научн.-техн. конф. - Новосибирск, 2006. – С. 202-207.

Подписано в печать _____. Формат 60х84, 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,5.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии

Томского политехнического университета

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30