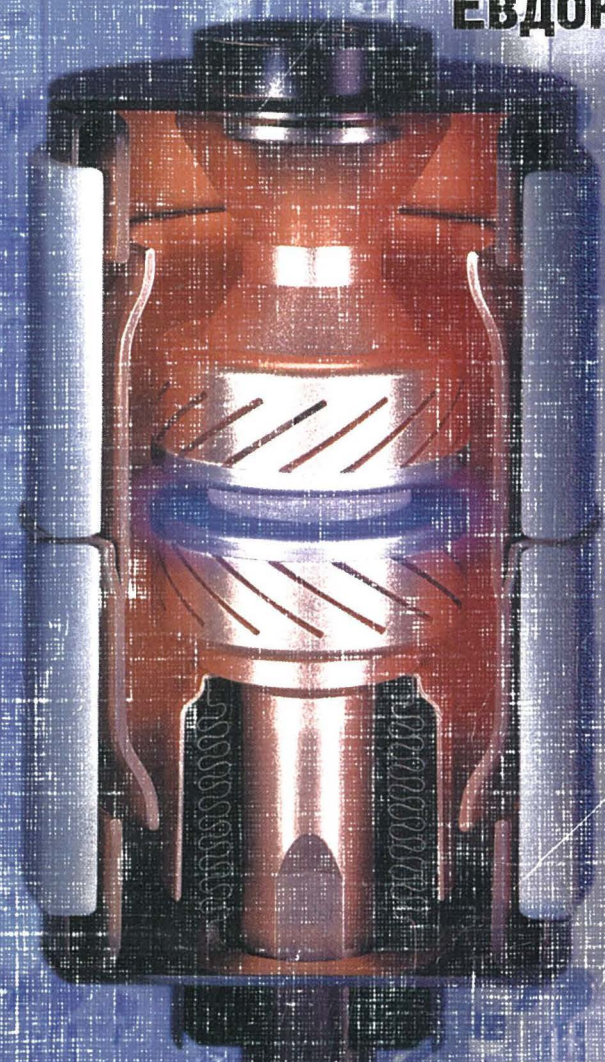


**Евдокунин Г.А.
Тилер Г.**



**Современная вакуумная
коммутационная техника
для сетей
среднего напряжения**

Г.А. Евдокунин, Г. Тилер

**СОВРЕМЕННАЯ ВАКУУМНАЯ
КОММУТАЦИОННАЯ ТЕХНИКА
ДЛЯ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**
(технические преимущества и эксплуатационные
характеристики)

Санкт-Петербург
2000

Евдокунин Г.А., Тилер Г.

Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000.-114с., с илл.

ISBN 5-93076-049-7

Рассмотрены эксплуатационные преимущества вакуумной коммутационной техники для сетей средних классов напряжений. Дан анализ коммутационных перенапряжений, создаваемых выключателями различных типов, в т.ч. вакуумных. Рассмотрены меры защиты от перенапряжений.

Книга предназначена для специалистов в области электроэнергетики, занимающихся эксплуатацией и проектированием электрических сетей средних классов напряжений, а также она может быть полезна научным сотрудникам, аспирантам и студентам электроэнергетических специальностей.

ISBN 5-93076-049-7

© Евдокунин Г.А., 2000

© Тилер Г., 2000

Оригинал-макет ООО «Терция»
Дизайн и верстка: Ю.В. Костицин

Изд. лиц. ЛР № 065940 от 11.06.98. Подписано в печать 17.10.2000
Формат 70x100_{1/16}. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная. Тираж 900 экз.

Цена договорная. Заказ № 17/10

Отпечатано с готовых диапозитивов в типографии ООО «Терция»

195112, Санкт-петербург, Малоохтинский пр., 68

Лиц. ПЛД № 69-263 от 20.07.98

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ЧАСТЬ 1.СОВРЕМЕННАЯ ВАКУУМНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ (технические преимущества и эксплуатационные характеристики)	
ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ВОСТОЧНОЙ И ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ.....	11
ВВЕДЕНИЕ	11
1.1 ОПАСЕНИЯ РОССИЙСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ОТНОШЕНИИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ....	11
1.2 РАЗВИТИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ	12
1.3 СОВРЕМЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ФИРМЫ SIEMENS ДЛЯ СРЕДНИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЙ.	19
1.3.1 ПЯТЬ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С ТРЕМЯ БОЛЬШИМИ ПРЕИМУЩЕСТВАМИ.	22
1.3.2 ВАКУУМНЫЙ КОММУТАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ СО СВОЙСТВАМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ, РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ И ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ NХАСТ.	23
1.3.3 ПРИВОД СОВРЕМЕННЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ	24
1.3.4 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД МОТОРНО-ПРУЖИННОГО ТИПА СОВРЕМЕННЫХ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ТИПА ЗАН И NХАСТ	25
1.3.5 КОНСТРУКЦИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ЗАН	31
1.3.6 ПРИВОД ВАКУУМНОГО КОММУТАЦИОННОГО МОДУЛЯ NХАСТ.	34
ВЫВОДЫ	35
ГЛАВА 2. СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ВАКУУМНЫХ И ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ	36
ВВЕДЕНИЕ	36

2.1 ФИЛОСОФИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ СРЕДНИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ИЛИ ЭЛЕГАЗОВОЙ СРЕДЫ	36
2.2 НАДЕЖНОСТЬ	39
2.2.1 КОМПРЕССИОННЫЕ ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ	39
2.2.2 ЭЛЕГАЗОВЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ С ГАШЕНИЕМ ДУГИ ВРАЩЕНИЕМ.	42
2.2.3 ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ	44
2.2.4 ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕГАЗОВЫХ И ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ	47
2.3 ВЫПОЛНЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ЗАДАЧ.....	51
2.3.1 КОММУТАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ	52
2.3.2 КОММУТАЦИЯ МАЛЫХ ИНДУКТИВНЫХ ТОКОВ	52
2.3.3 КОММУТАЦИЯ ИНДУКТИВНЫХ ТОКОВ	52
ВЫВОДЫ	58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ПЕРВОЙ ЧАСТИ	59

ЧАСТЬ 2. ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ

ГЛАВА 1. ДУГОВЫЕ И ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ РОССИИ.....

ВВЕДЕНИЕ	63
1.1. ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ	64
1.2. ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНОГО ТОКА	67
1.3. ОГРАНИЧЕНИЕ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОПН	71
1.4. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ	74

ГЛАВА 2. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И ОТКЛЮЧЕНИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	77
----------------	----

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СЕТИ	77
2.1.1. ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ	77
2.1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕТИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	79
2.2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИЯХ И ОТКЛЮЧЕНИЯХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИДЕАЛЬНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ.....	81
2.3. ОСОБЕННОСТИ КОММУТАЦИЙ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ	87
2.4. ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ОПН	95

ГЛАВА 3. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИЯХ НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	99
3.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ И ТРАНСФОРМАТОРА	99
3.2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ	100

ГЛАВА 4. КОММУТАЦИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

ВЫВОДЫ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ КО ВТОРОЙ ЧАСТИ	112

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга написана на основе тесного сотрудничества авторов на протяжении с 1996-2000 гг. в области исследований координации изоляции и надежности сетей среднего напряжения при использовании современной вакуумной коммутационной техники.

Мы, авторы, выражаем особую благодарность:

- Руководителю отдела маркетинга среднего напряжения фирмы Siemens доктору Михаэлю Фестеру за помощь в процессе работы, за критику и ценные предложения.
- Руководителю технического отдела среднего напряжения фирмы Siemens доктору Дитеру Зейману за тщательный просмотр рукописи и ценные замечания и предложения.
- Руководителям отдела маркетинга среднего напряжения фирмы Siemens по Восточным и Западным Европейским странам господину Ханс-Йоахим фон Кремлингу и господину Валтеру Шпису за их ценные советы и проявленный интерес к работе, а также всем сотрудникам отдела среднего напряжения за помощь в подборе материала для отдельных глав.
- Руководителю проекта отдела ZTEN 3 фирмы Siemens доктору Шернеру Чартману за его поддержку и помощь в подборе литературы.
- Всем сотрудникам из департамента передачи и распределения электроэнергии, принявшим участие, и особенно доктору Юргену Моеллеру за инициативу и разрешение работы над книгой.
- К. т. н. Корепанову А. А. и к. т. н. Титенкову С. С. за активное участие в подготовке материала книги.
- Нашим семьям и друзьям за искреннее понимание и поддержку на протяжении всего периода работы над книгой.

Работа над книгой была распределена следующим образом: часть 1 написана Г. Тилером, часть 2 – Г.А.Евдокуниным.

Авторы

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1996 bis 2000 während unserer gemeinsamen Untersuchungen über Isolationskoordination und Zuverlässigkeit der Mittelspannungsnetze bei Nutzung der Vakuumschalttechnik.

Unser besonderer Dank gilt:

- Dem Vertriebsleiter Mittelspannungskomponenten des Bereiches Energieverteilung der Firma SIEMENS AG, Herrn Dr.-Ing. Michael Vester, für die ständige Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Arbeit und kritische Diskussion der Ergebnisse.
- Dem Leiter des Produktmanagements Mittelspannungskomponenten des Bereiches EV bei der SIEMENS AG, Herrn Dr.-Ing. Dieter Sämann, für seine intensiven, ermutigenden und lenkenden Anregungen.
- Herrn Hans-Joachim von Kremling und Herrn Walter Spies, zuständig für den Vertrieb von Mittelspannungskomponenten in Ost- und Westeuropa bei der SIEMENS AG in Erlangen für ihre Unterstützung, Anregungen und Interesse am Fortgang der Arbeit, sowie allen Angehörigen des Geschäftszweiges Mittelspannung bei der Firma SIEMENS für die Unterstützung bei der Materialsammlung und Durchführung der Arbeit.
- Dem Projektleiter der Abteilung ZT EN 3 der Firma SIEMENS, Herrn Dr.-Ing. Werner Hartmann für die stete Unterstützung.
- Allen Beteiligten des Bereiches Energieverteilung der Firma SIEMENS, besonders Herrn Dr. – Ing. Jürgen Moeller für die Anregungen und Genehmigung zur Durchführung der Arbeit.
- Herrn Dr. Aleksander Korepanov und Herrn Dr. Sergej Titenkov für Unterstützung bei der Materialsammlung der Arbeit.
- Unseren Familien und Freunden für das Verständnis und die liebevolle Unterstützung während der Durchführung.

Der erste Teil der beigefügten Arbeit wurde von Herrn Dr. G. Tiler und der zweite Teil von Herrn Professor G. Ewdokunin verfasst.

Autoren

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время часто идут дискуссии о преимуществах применения вакуумной или элегазовой коммутационной техники в сетях среднего напряжения в Восточно-европейских странах. Особенно сильно этот вопрос волнует специалистов стран СНГ, более того, в настоящее время в отдельных странах СНГ существуют запреты по применению вакуумной коммутационной техники для определенных коммутационных задач, которые обусловлены плохим опытом эксплуатации первых вакуумных выключателей локальных производителей. Применение того или иного вида коммутационного оборудования в Западной Европе, в отличие от Восточной, уже давно определило свои направления и преимущественные стороны коммутационного оборудования для применения в сетях среднего класса напряжения. По параметрам: высокой надежности, экологичности, обслуживанию и эксплуатации, диапазонам номинальных параметров и экономичности для всех коммутационных задач наиболее целесообразными являются: в сетях среднего напряжения - вакуумные, а в сетях высокого напряжения - элегазовые выключатели. Как показывает анализ рынка, спрос на вакуумные выключатели на мировом рынке достиг 64-65%. Ожидаемый спрос рынка на вакуумную коммутационную технику к 2010 году составит 80% всего рынка коммутационной техники среднего напряжения. В связи с этим, целью этой книги является показать эксплуатационным службам электроэнергетических предприятий преимущества того или иного коммутационного оборудования и оградить от ошибок при эксплуатации, что особенно важно для надежности работы сетей на устаревшем электрооборудовании.

Авторы этой книги первую главу (часть I) полностью посвятили развитию вакуумной коммутационной техники в Восточной и Западной Европе. В этой главе показаны наиболее выдающиеся достижения по разработкам и производству вакуумной коммутационной техники современных фирм. Здесь сказано, что для производства вакуумной коммутационной техники основой является высокий технологический уровень производителя и накопленный опыт по производству вакуумных ламп разного электротехнического назначения. Это определяет правильный подбор чистых контактных материалов для вакуумных коммутационных камер. Даны технические и эксплуатационные характеристики современных вакуумных выключателей фирмы Siemens. Описаны современные приводы вакуумных выключателей, в частности, моторно-пружинный привод.

Во второй главе определена философия использования в коммутационных аппаратах среднего класса напряжения вакуумной или элегазовой среды. Описан принцип действия компрессионных и с вращающим гашением дуги элегазовых выключателей среднего напряжения разных конструкций. Даны сравнительные параметры элегазовых и вакуумных выключателей по: техническим характеристикам, эксплуатационной надежности, техобслуживанию, токсичности и взрывоопасности, герметичности, выполнению коммутационных задач. Даны определения и выводы о целесообразности применения в сетях среднего напряжения - вакуумных, а в сетях высокого напряжения - элегазовых выключателей.

Глава I второй части книги посвящена анализу внутренних перенапряжений в сетях средних классов напряжений с изолированной нейтралью, общепринятых в России и в

странах СНГ. Показана целесообразность использования режима резистивного заземления нейтрали.

В главе 2 дан теоретический анализ условий возникновения предельных кратностей коммутационных перенапряжений, создаваемых «идеальным» выключателем при включении и отключении высоковольтных электродвигателей. Проанализированы особенности коммутаций электродвигателей вакуумными выключателями. Показано, что вне зависимости от типа применяемого выключателя требуется защита изоляции электродвигателей от коммутационных перенапряжений.

В главе 3 приведен анализ перенапряжений, создаваемых выключателями различных типов при отключении ими ненагруженных трансформаторов. Показана необходимость использования достаточно строгого компьютерного моделирования для получения реальных кратностей перенапряжений.

Условия отключения конденсаторных батарей проанализированы в главе 4, где показано, что вакуумные выключатели имеют несомненное преимущество по сравнению с любым газовым выключателем при коммутации отключения емкостных токов

ЧАСТЬ 1.
СОВРЕМЕННАЯ ВАКУУМНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ
ТЕХНИКА ДЛЯ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
(технические преимущества и эксплуатационные
характеристики)

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ
ТЕХНИКИ В ВОСТОЧНОЙ И ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ.

ВВЕДЕНИЕ

История применения вакуумной коммутационной техники в странах Восточной Европы не так продолжительна как в западноевропейских странах. Началом эры вакуумной коммутационной техники можно считать середину шестидесятых годов, когда была использована аксиально-магнитная контактная система (AMF- axial magnetic field electrode) для отключения токов в вакууме [1,2,3,4]. Отдельные фирмы, например Siemens, имея большой опыт по производству вакуумных генераторных ламп, используя новые изобретения в области вакуумной коммутационной техники быстро организовали производство вакуумных выключателей. Первое серийное производство вакуумных выключателей относится к началу семидесятых годов [5,6,7]. После этого AMF-контактная система стала все больше и больше применяться в вакуумной коммутационной технике для отключения аварийных токов не только среднего напряжения, но и высокого напряжения. Кроме того, AMF- контактная система нашла широкое применение для отключения постоянных токов в вакууме.

1.1 ОПАСЕНИЯ РОССИЙСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ОТНОШЕНИИ
ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В России первые вакуумные выключатели были приняты в эксплуатацию в восьмидесятые годы. Опыт эксплуатации первых вакуумных выключателей показал, что кратность перенапряжений составила $3,2 \leq K \leq 8,5$. В то время координация изоляции при такой кратности перенапряжений и в условиях низкого качества изоляции российских сетей среднего напряжения была практически невозможна. Исследования показали, что диапазон токов, срезаемых российскими вакуумными выключателями перед естественным переходом тока через нуль, составлял от 5 до 35 А [8]. Плохое качество материала контактов отдельных российских вакуумных выключателей в то время приводило к высокой вероятности повторного зажигания дуги, даже при выполнении относительно простых коммутационных задач. В основном, использование этих первых вакуумных выключателей давало большой эксплуатационный ущерб при коммутации электрооборудования с низким уровнем изоляции, к примеру электродвигателей. При этом нанесенный ущерб был существенным, особенно для нефтепромысловых предприятий, где коммутации электродвигателей промысловых скважин, например погружных, осуществлялись вакуумными выключателями. К примеру, первые вакуумные контакторы типа КВТ-10-400-4 У2 с использованием вакуумных дугогасительных камер КДВ10-5-400 УХЛ2 были внедрены в эксплуатацию для коммутации электродвигателей нефтепромысловых предприятия Западной Сибири в середине восьмидесятых годов без каких-либо средств ограничения перенапряжений. Проведенные исследования в сетях среднего класса напряжения на нефтепромыслах Западной Сибири показали, что в схемах электроснабжения, в частности электродвигателей, где использовались вакуумные выключатели, возникают коммутационные перенапряжения, которые могут достигь 6-7

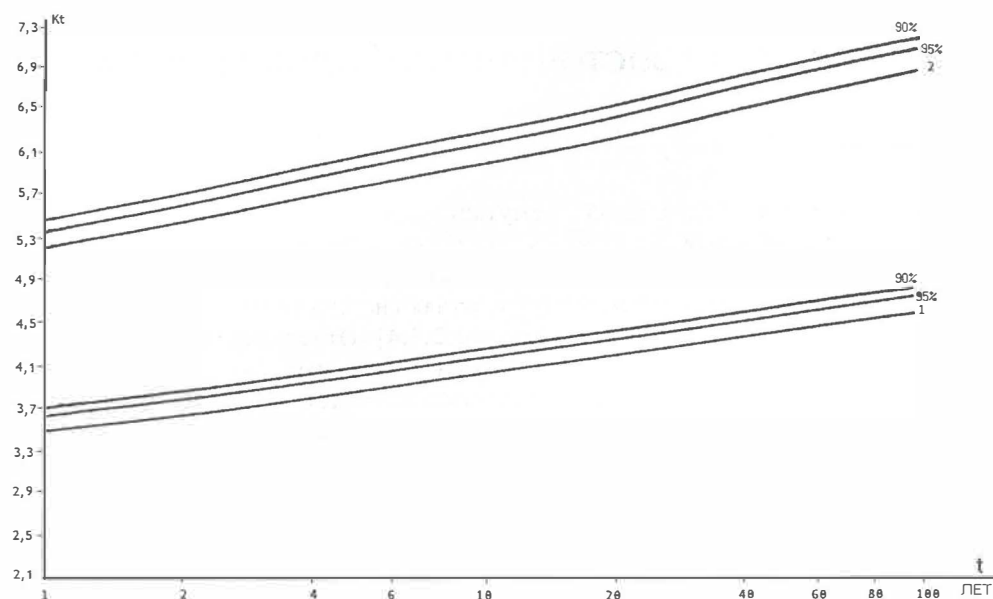


Рис. 1.1 Кратность перенапряжения K_t , превышающих хотя бы на одной фазе за t лет при коммутациях мощных электродвигателей 6 кВ (до 2,5 МВт) маломасляными выключателями и погружных электродвигателей (до 200 кВт) вакуумными контакторами типа КВТ-10-400-4 V2: 1 и 2 - усредненная линия соответственно и верхняя граница 90% и 95% - го доверительного интервала.

кратного фазного напряжения. Период колебательного процесса при этом составляет 100-200 нс. Результаты этих исследований представлены на рисунке 1.1 [8].

По результатам этих и последующих исследований был сделан следующий вывод:

- Кратность коммутационных перенапряжений при использовании вакуумных выключателей больше, чем при других видах внутренних перенапряжений, и они представляют гораздо большую опасность для сетей среднего напряжения. При этом каждая коммутация электродвигателей малой и средней мощности потенциально может приводить к повреждению изоляции при отсутствии необходимых мер защиты.

Это явление вызвало недоверие российских заказчиков к вакуумным выключателям в целом.

Имея первый отрицательный опыт эксплуатации российских вакуумных выключателей из-за низкого уровня изоляции (особенно электродвигателей) российские заказчики отказываются от использования вакуумных выключателей в сетях среднего напряжения и склонны к применению элегазовой коммутационной техники.

1.2 РАЗВИТИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В странах Западной Европы, равно как и во всём мире, о вакуумной коммутационной технике сложилось совершенно противоположное мнение и проблемы, связанные с перенапряжениями, уже давно решены.

На основании многолетних исследований коммутационных задач вакуумной и элегазовой коммутационной техники далее в этой книге:

- Проведен анализ коммутационных перенапряжений в сетях среднего напряжения, вызываемых вакуумными и элегазовыми выключателями.
- Определены задачи координации изоляции и оценена надежность сетей среднего напряжения при эксплуатации вакуумной коммутационной техники

В настоящее время из всех существующих типов выключателей: масляных, маломасляных, воздушных, электромагнитных, элегазовых, вакуумных и т. д. по параметрам: высокой надежности, экологичности, обслуживанию и эксплуатации, диапазонам номинальных параметров и экономичности наиболее целесообразными являются элегазовые и вакуумные выключатели. Из этих двух типов выключателей наибольшее применение нашли: на средние напряжения - вакуумные [4], а на высокие напряжения - элегазовые выключатели [9]. Как показывает анализ рынка, спрос на вакуумные выключатели на мировом рынке достиг 64% (рис.1.2). Ожидаемый спрос рынка на вакуумную коммутационную технику к 2010 году составит 80% всего рынка коммутационной техники среднего напряжения [10].

В течение истории развития вакуумной коммутационной техники производители добились внедрения в производство вакуумных выключателей в широком диапазоне номинальных параметров. В настоящее время в производство внедрены вакуумные выключатели до номинального напряжения 84 кВ и тока отключения до 100 кА. Например, в настоящее время производятся вакуумные выключатели на номинальное напряжения 84 кВ и ток отключения к.з. 25 кА [6]. Выключатели с отключающей способностью 100 кА производятся на номинальное напряжение до 13,8 кВ [11].

В настоящее время существуют лабораторные экземпляры вакуумных выключателей на напряжение 145 кВ с номинальной отключающей способностью 31,5 кА и на номинальное

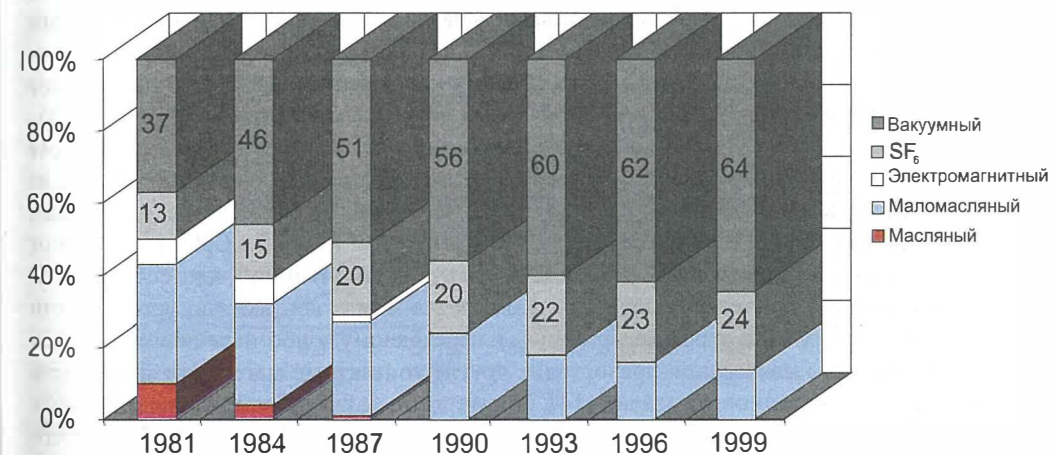


Рис. 1.2 Конъюнктура мирового рынка для выключателей среднего класса напряжения $I_{откл.ном} \geq 12,5$ кА
*Актуальная конъюнктура рынка Германии по вакуумной технике 95%

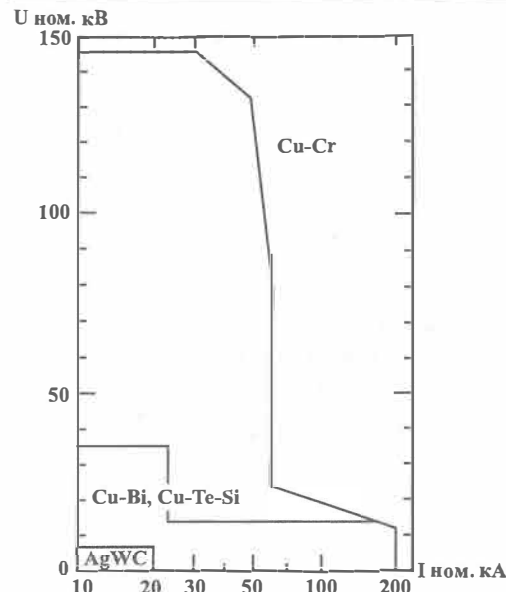


Рис.1.3. Контактный материал для вакуумной коммутационной техники [18].

напряжение 12 кВ с номинальной отключающей способностью до 200 кА. Производятся также вакуумные выключатели для коммутации сетей постоянного тока [12,13].

Для разных коммутационных задач и разных номинальных параметров используются разные сплавы металлов для изготовления контактной системы вакуумных выключателей. На рис.1.3. представлены контактные материалы, используемые в современных выключателях. Каждый контактный материал имеет свои

положительные стороны и подходит для определенных коммутационных задач и номинальных параметров [14]. Кроме контактных материалов для разных номинальных параметров очень важную роль играет сама структура контактной системы вакуумного выключателя [15,16,17]. Например, для коммутации токов до 40 кА рекомендуется использование так называемой радиально-магнитной контактной системы (RMF- radial magnetic field electrode). Как показано на рис.1.3. для изготовления контактов используются в основном три разных композиции материалов каждую из которых рекомендуется использовать для определенных коммутационных задач и номинальных параметров. Из этого следует, что контактные материалы можно разделить на следующие группы по номинальным параметрам коммутационного аппарата: CuCr - для коммутации на более высоких напряжениях (до 145 кВ), CuTeSi и CuBi на средних напряжениях (до 24 кВ) и для более высоких отключаемых токов (до 200 кА), AgWC - для более низких напряжений (до 7,2 кВ).

В настоящее время 98% рынка коммутационной техники среднего напряжения составляют коммутационные аппараты с номинальными токами отключения до 63 кА, из них около 90% рынка - до 25 кА. В связи с этим наибольшее практическое применение нашел контактный материал CuCr. Следует отметить, что контактный материал CuCr в отличие от других контактных материалов по параметрам: отключающей способности и восстановлению диэлектрической прочности промежутка между контактами; устойчивости к эрозии; току среза при его переходе через нуль и переходному сопротивлению контактов в течение срока службы на порядок превосходит другие контактные материалы и пригоден почти для всех коммутационных задач [14]. Кроме этого можно достичь превосходных коммутационных характеристик для разных коммутационных задач путем добавки всего лишь доли процентов примесей. К примеру, добавка Te 0,1-4% уменьшает эрозию [19,20], добавка Bi от 2,5 до 15 % уменьшает токи среза [21], а при добавке С от 0,18 до 1,8 % снижается содержание кислорода в металле [22]. Для улучшения других коммутационных характеристик необходимы добавки W, Si, Ti, Zr или Sb и др. [23,24,25,26].

С начала семидесятых годов - до 1980 года только фирмы Siemens и Mitsubishi, а далее Westinghouse и English Elektrik использовали CuCr как контактный материал для серийного производства [27]. После 1980 года производители вакуумной коммутационной техники все шире и шире стали использовать CuCr как контактный материал и уже с 1992 года CuCr стал основным материалом в производстве контактов вакуумных выключателей среднего напряжения.

В настоящее время известно, что при использовании CuCr для изготовления контактов при коммутации малых индуктивных токов, в очень редких случаях, могут возникать опасные перенапряжения из-за повторных зажигания при отключении [28,29,30,31] (рис.1.4). В основном, опасные перенапряжения возникают при отключении пусковых токов менее, чем 600 А небольших двигателей при моменте начала расхождения контактов за 0,5-1,0 мс до перехода тока через нуль (0,2 % случаев из всех случаев коммутации двигателей) [31]. Для этих случаев фирмой Siemens разработано руководство по координации изоляции при эксплуатации вакуумных выключателей, где приводятся надежные схемы защиты от перенапряжений, в основном с использованием ограничителей перенапряжений.

Проблему опасных перенапряжений при коммутации малых индуктивных токов с успехом решают применяемые для этой коммутационной задачи AgW - или AgWC - сплавы контактного материала [32,33]. На рис.1.5. представлена частота появления перенапряжений при коммутации малых двигателей вакуумными выключателями с разным контактным материалом. В настоящее время различные фирмы производят вакуумные выключатели с контактным материалом на основе AgW. К примеру фирма Toshiba в настоящее время производит вакуумные выключатели специально для коммутации малых электродвигателей на основе контактных материалов AgWC [32]. Эти вакуумные выключатели имеют номинальные параметры до 7,2 кВ-1200А-40кА.

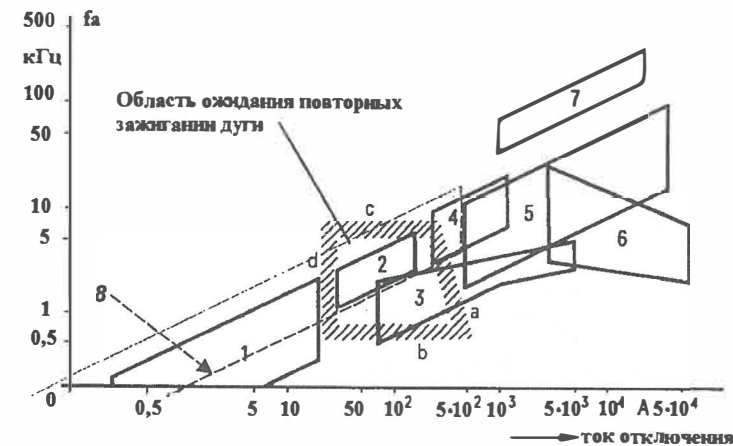


Рис.1.4 Область ожидания многократных повторных зажигания дуги в выключателе при отключении индуктивных токов сети 12 кВ [30].

1 - отключение ненагруженных трансформаторов; 2 - отключение дугогасящих катушек; 3 - отключение двигателей в пусковом режиме; 4 - отключение индуктивных компенсаторов; 5 - отключение трансформаторов тока; 6 - отключение к.з. в сети; 7 - отключение к.з. за индуктивным реактором; 8 - коммутация дуговых печей

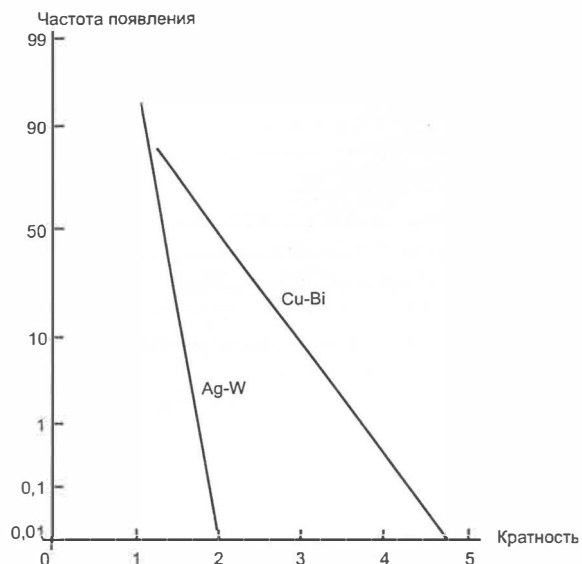


Рис.1.5 Частота появления перенапряжений при коммутации малых двигателей вакуумными выключателями с разным контактным материалом [33].

Как было уже указано выше на развитие вакуумной коммутационной техники оказало влияние не только изобретение новых контактных материалов, но и изобретение AMF - контактной системы, особенно для коммутации больших токов. На рис.1.6. приводятся диапазоны номинальных напряжений и токов современных вакуумных выключателей, которые производятся и испытаны в лабораториях для дальнейшего серийного производства.

Для коммутации мощных генераторов, конденсаторных батарей, шунтирующих реакторов и др. современные производители производят мощные вакуумные силовые выключатели. Например на фирме Toshiba в настоящее время производятся выключатели с

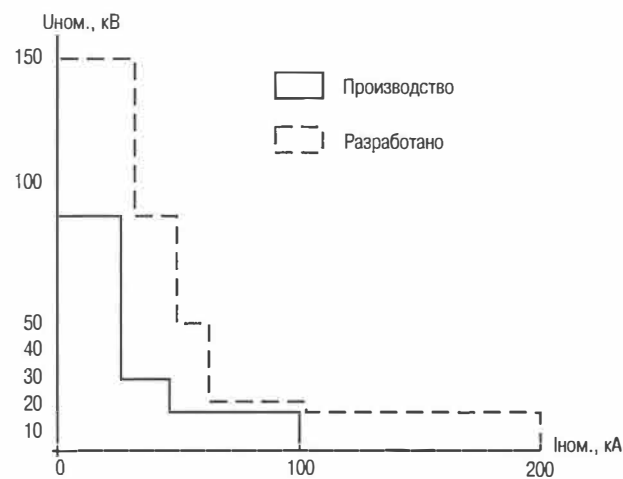


Рис.1.6 Диапазоны номинальных напряжений и токов современных вакуумных выключателей.

номинальной отключающей способностью 100 кА на номинальное напряжение 13,8 кВ и с номинальным током 3000 А [33]. Номинальное число коммутационных циклов этого выключателя составляет 20000. На фирме Siemens с 1996 года в производство запущены вакуумные генераторные выключатели с номинальной отключающей способностью 80 кА, на номинальное напряжение 17,5 кВ и с номинальным током 12000 А рис.1.7.

Для повышения надежности сетей напряжением до 77 кВ используется вакуумная коммутационная техника в элегазовых комплектных распределительных устройствах [32]. Например фирма Siemens на средние напряжения в распределительных устройствах с элегазовой изоляцией использует только вакуумные выключатели. Такие конструктивные решения на порядок повышают эксплуатационную надежность распределительного устройства.

На рис.1.8. представлено распределительное устройство среднего напряжения типа 8DB10 фирмы Siemens, в котором объединены все положительные технические свойства элегазовой и вакуумной коммутационной техники. В этом распределительном устройстве все компоненты оборудования имеют элегазовую изоляцию, а коммутация номинальных и аварийных токов производится в вакуумной дугогасительной камере. Такое решение обусловлено тем фактом, что вакуумная дугогасительная камера имеет надежность на порядок выше, чем элегазовая

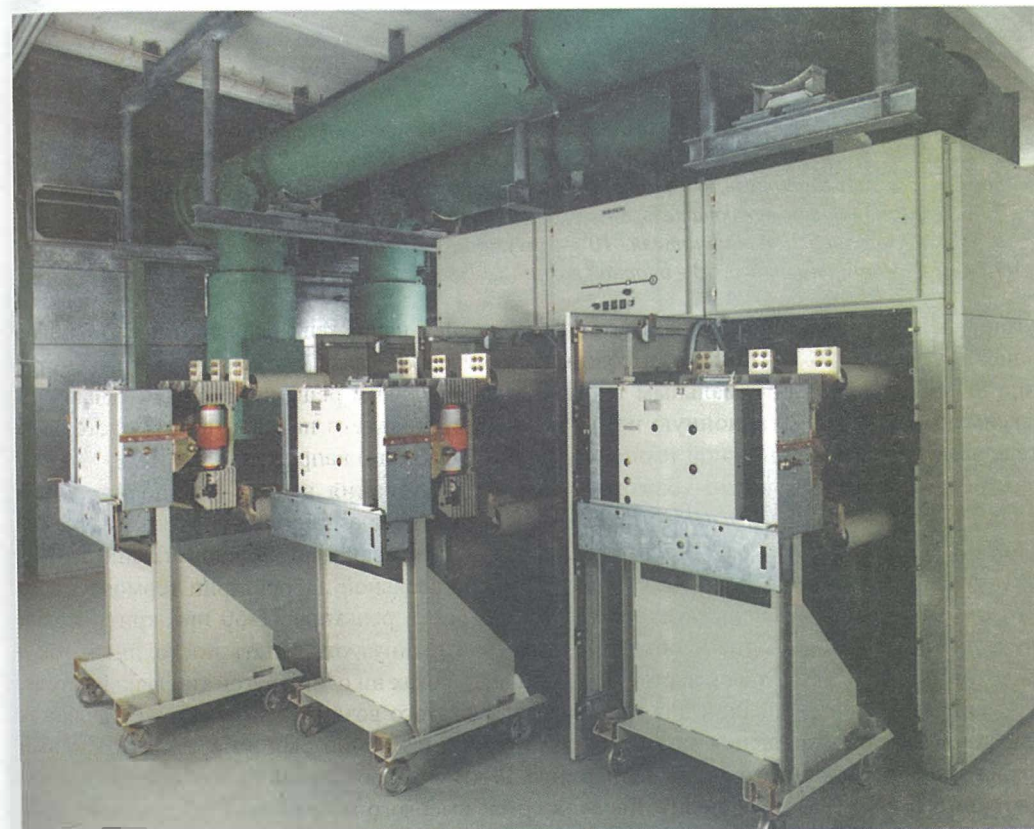


Рис.1.7. Закрытое распределительное устройство генераторного напряжения 8BK41 для отключения номинальных токов до 12000 А

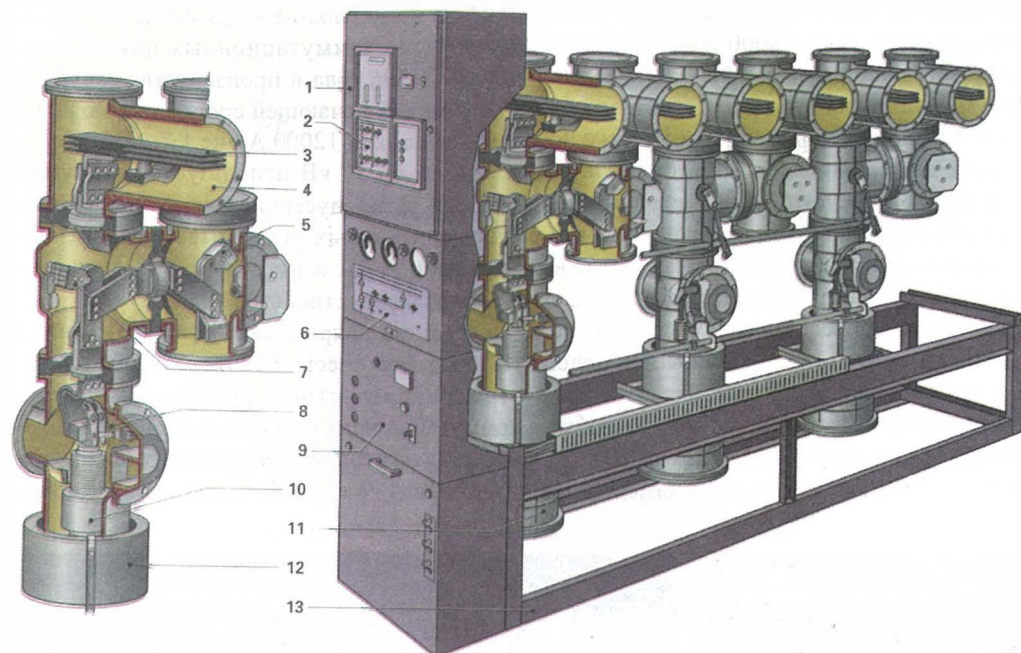


Рис.1.8. Вакуумная коммутационная техника фирмы Siemens с элегазовой изоляцией.
1 - отсек вторичных цепей, 2 - вторичные цепи, 3 - сборные шины, 4 - литой алюминиевый корпус, 5 - разъединитель, 6 - привод и блокировка для трехпозиционного выключателя, 7 - трехпозиционный выключатель, 8 - коммутационный отсек с верхним и нижним вводом. 9 - привод силового выключателя. 10 - вакуумная дугогасительная камера, 11 - ввод, 12 - трансформатор тока, 13 - опорная рама.

дугогасительная камера и число коммутаций на среднем напряжении на несколько порядков выше, чем число коммутаций на высоком напряжении. В связи с этим распределительного типа 8DB10 является оптимальным технико-экономическим решением, обеспечивающим максимальную эксплуатационную надежность сетей среднего напряжения на настоящем этапе развития коммутационной техники среднего и высокого напряжения.

Кроме указанных выше возможностей использования в высоковольтных сетях переменного тока вакуумная коммутационная техника нашла применение для коммутаций цепей постоянного тока. Это стало возможным только благодаря использованию АМФ - контактной системы. В частности в Японии в испытательной лаборатории термоядерного синтеза "Токамак" для испытательного термоядерного реактора JT-60 при критических плазменных испытаниях где необходимо каждые 10 минут отключать постоянный ток в пределах 92 кА [12]. При такой частоте коммутаций и токах ни один другой тип выключателя, основанный на использовании для гашения дуги сжатого воздуха или элегаза не является надежным способом решения задачи. В связи с этим в Японии был изобретен вакуумный выключатель постоянного тока на напряжении 44 кВ с отключающей способностью 130 кА постоянного тока [32]. Для энергетических сетей высокого напряжения постоянного тока реализован вакуумный выключатель на 250 кВ [13]. Такие решения возможны только при использовании АМФ- контактной системы.

1.3 СОВРЕМЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ФИРМЫ SIEMENS ДЛЯ СРЕДНИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЙ.

Фирма Siemens постоянно расширяет область применения своих вакуумных выключателей.

К вакуумным выключателям сегодня предъявляются различные требования: от коммутации трансформаторов и электродвигателей, воздушных и кабельных линий, реакторов и конденсаторных батарей, до применения в цепях электрофильтров и питания электродуговых печей. Силовые выключатели должны иметь длительный срок эксплуатации и достаточно высокий коммутационный ресурс. Они должны отключать как небольшие токи короткого замыкания в распределительных сетях, так и большие значения токов в сетях промышленных предприятий. Представленной серией выключателей типа ЗАН и NXACT фирма Siemens покрывает весь диапазон требований, предъявляемых к силовым выключателям в классах напряжений от 6 до 35 кВ.

Действие выключателей серии ЗАН и NXACT основано на вакуумном принципе гашения дуги, превосходящем все остальные и наиболее экономичном принципе дугогашения, который сегодня существует и реализуется в технике коммутационных

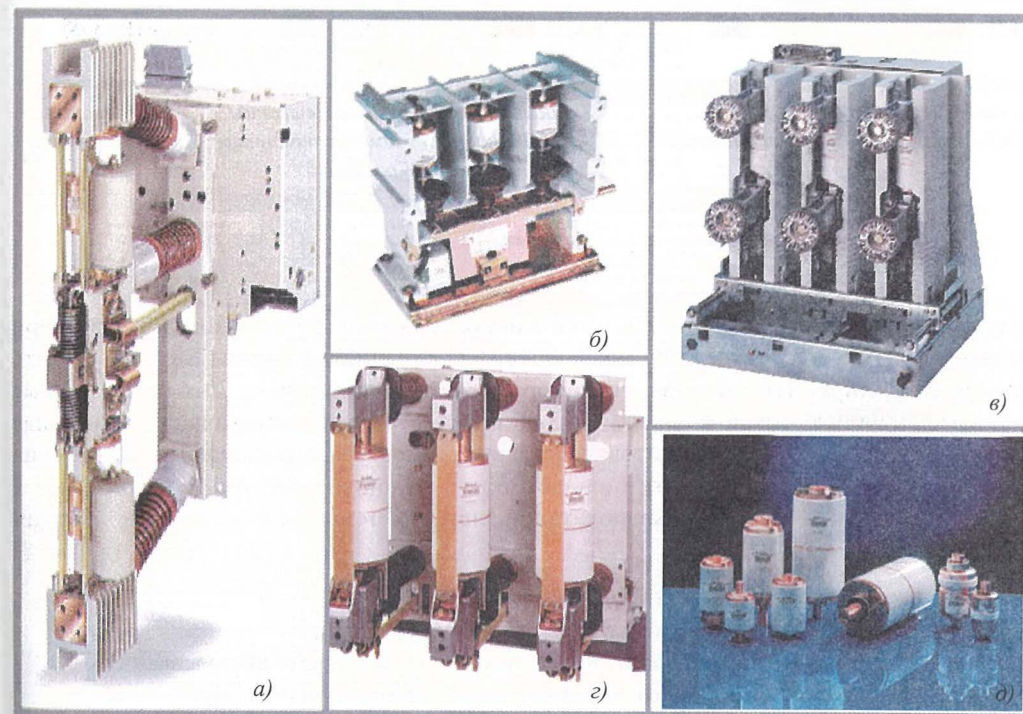


Рис.1.9. Вакуумная коммутационная техника фирмы Siemens
а) Однополюсный вакуумный выключатель тягового электрооборудования (железная дорога); б) Вакуумный контактор 3TL; в) Вакуумный коммутационный модуль NXACT; г) Вакуумный выключатель ЗАН; д) Вакуумные коммутационные камеры фирмы Siemens.

- высокое быстродействие и возможность синхронизации
- автоматическое повторное включение на токи до 31,5 кА
- отключение токов короткого замыкания с очень высоким нарастанием крутизны тока
- коммутации воздушных и кабельных линий
- коммутации электродвигателей
- коммутации трансформаторов и реакторов
- коммутации конденсаторных батарей
- коммутации цепей электрофильтров и питания электродуговых печей (для этой задачи используется выключатель ЗАН5 с улучшенной экономичностью).

1.3.1 ПЯТЬ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С ТРЕМЯ БОЛЬШИМИ ПРЕИМУЩЕСТВАМИ.

Широкий диапазон коммутируемых мощностей.

В классах напряжений от 6 до 35 кВ серия выключателей ЗАН перекрывает весь диапазон отключаемых мощностей. При этом выключатели надежно работают, как при длительных перерывах между отключениями, так и в режиме частых коммутаций, что делает их незаменимыми для применения в сетях городского электроснабжения и промышленных предприятий. Основные электрические характеристики выключателей приведены в табл. 1.1.

Многообразие применений.

Трехполюсные силовые выключатели серии ЗАН благодаря универсальной конструкции могут применяться во всех типах распредустройств внутренней установки, выпускаемых АО SIEMENS для классов напряжений от 6 до 35 кВ. Возможность применения выключателей в распредустройствах российского производства также не вызывает сомнения и уже апробирована для ячеек типов К-59 и К-104. Надежно коммутируя в вакууме, выключатели серии ЗАН используются в распредустройствах, как с воздушной, так и с элегазовой изоляцией. Рекомендуемые области различных типов выключателей приведены в табл. 1.2.

Экономичность.

Выключатели серии имеют большой срок службы, отличаются повышенной надежностью, а многие даже не требуют технического обслуживания и ухода в течение всего срока службы. Это обеспечивается использованием подшипников с неизнашиваемыми трущимися поверхностями и применением специальных нестареющих смазочных материалов, а также высоким качеством изготовления. Минимальные допуски при производстве выключателей исключают ненадежное срабатывание.

Так, стандартные выключатели серии ЗАН1, ЗАН3 и наиболее экономичный - ЗАН5, даже при частых коммутациях не требуют никакой настройки их привода, сохраняя технические характеристики в пределах допустимых отклонений. Для выключателей с повышенным коммутационным ресурсом первая смазка привода нужна лишь после 10 тыс. выполненных коммутаций, а необходимость замены вакуумных камер - после 30 тыс. Выключатели серии ЗАН позволяют экономить время и затраты. Их самоокупаемость особенно высока при использовании в распредустройствах с частыми коммутациями.



Рис. 1.10 Вакуумный коммутационный модуль NXACT

1.3.2 ВАКУУМНЫЙ КОММУТАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ СО СВОЙСТВАМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ, РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ И ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ NXACT.

На рисунке 1.10 представлен вакуумный коммутационный модуль со свойствами выключателя, разъединителя и заземлителя NXACT. Этот коммутационный модуль объединяет все наивысшие достижения современной вакуумной коммутационной техники с расширенными возможностями разъединителя и заземлителя с соответствующей системой механических и электрических блокировок. Для производителей КРУ это обозначает минимум затрат в производстве.

Качество, как основа надежности.

Основой широкого применения вакуумных выключателей служит их высокое качество, обеспеченное не только высокоточной технологией изготовления, но и строгим пооперационным контролем. Системой управления качеством охвачен весь цикл изготовления от проектной разработки до приемо-сдаточных испытаний. Так, например, каждый выключатель в процессе приемо-сдаточных испытаний выполняет несколько сотен коммутационных циклов на полностью компьютеризированном стенде. И лишь в случае, когда значения контролируемых параметров находятся в пределах допусков, определенных по результатам типовых ресурсных испытаний, выключатель может быть отправлен заказчику.

Гарантии успешного применения.

Базой для создания серии послужил большой опыт производства и эксплуатации предшествующих типов выключателей. Для всех выключателей ЗАН характерен единый принцип конструктивной компоновки и минимальные габариты, обеспечиваемые компактностью конструкции. При создании выключателей использовано минимально возможное количество полимерных материалов, что облегчает их утилизацию по истечении срока службы. Выключатели имеют высокую стойкость к воздействиям окружающей среды и полностью безопасны в эксплуатации. Надежность технических решений и возможность удовлетворения даже специфических требований заказчика в сочетании с экономией затрат на техническое обслуживание обуславливают широкую область применения выключателей для всех видов коммутаций и гарантируют их успешную эксплуатацию.

1.3.3 ПРИВОД СОВРЕМЕННЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время для современных вакуумных выключателей широкое применения нашли, так называемые, моторно-пружинные и электромагнитные приводы. В практике из-за своей универсальности и многофункциональной возможности более широко используются моторно-пружинные приводы. Электромагнитные приводы используются только для специальных коммутационных задач, особенно для коммутации малых токов.

Общие положения

Эксплуатационные службы электроэнергетических сетей среднего напряжения предъявляют следующие требования к приводу коммутационного аппарата:

- В основном покупатель хочет иметь такой продукт, который с высокой надежностью и эффективностью справляется с поставленными эксплуатационными требованиями и задачами.
- При этом покупателя не интересует, какой тип привода будет выполнять основную задачу коммутации.
- Решающим фактором при покупке коммутационного аппарата является цена и исполнение предъявленных технических требований, которые обеспечивают необходимый уровень эксплуатационной надежности всей сети.

Как моторно-пружинный, так и электромагнитный привод должны выполнять эти вышеуказанные требования.

В настоящее время фирма Siemens имеет вакуумное коммутационное оборудование среднего класса напряжения с электромагнитным приводом для коммутации токов короткого замыкания до 13-16 кА. От 13-16 кА до 100 кА экономически и технически целесообразно применять моторно-пружинный привод. Мировые лидеры вакуумной коммутационной техники имеют электромагнитный привод максимум для коммутации токов к.з. до 20 кА. При возрастании токов к.з. надежность и экономичность электромагнитного привода снижается. При больших токах к.з. необходимы большие силы для включения, т.е. большая электромагнитная энергия соленоида привода. Это вызывает увеличение габаритов электромагнита и необходимость значительной энергии независимого источника питания (аккумуляторной батареи или конденсатора). Факт необходимости дополнительного источника электроэнергии для аварийного отключения выключателя является одним из существенных недостатков электромагнитных приводов. Для больших токов, уже начиная с

13 кА, экономично и надежно запастись энергией для включения и отключения механически, путем мощного пружинного механизма. Для вакуумных выключателей фирмы Siemens такой механизм может произвести коммутацию полного АПВ без какого-нибудь дополнительного источника электроэнергии. Чтобы накопить энергию для отключения 13кА применение электромагнитного привода уже технически и экономически нецелесообразно (уменьшается надежность, увеличиваются габариты и потребляемая мощность соленоида). Электромагнитный привод для отключения токов к.з. выше 20 кА используется очень редко, а именно, когда к надежности коммутации не предъявляются высокие требования или надежность обеспечена другим способом (вероятность исчезновения оперативного напряжения равна нулю). В любом случае, уже при коммутации тока к.з. в 20 кА, стоимость и габариты электромагнитного привода существенно выше, чем у моторно-пружинного привода. Поэтому, электромагнитный привод, как привод силовых вакуумных выключателей, не является в целом решающим критерием выбора коммутационного аппарата для эксплуатационных служб.

Основная ниша рынка, где находят широкое применение вакуумные выключатели с электромагнитным приводом, это те области электроэнергетики, где необходим высокий коммутационный ресурс привода или, где необходим отдельный привод для каждой отдельной фазы (к примеру, как у выключателей VM1 фирмы АВВ с гарантийным коммутационным ресурсом 100.000 механических коммутаций без техобслуживания привода при токах к.з. до 25 кА). Исходя из приведенных соображений, электромагнитный привод нашел широкое применение для вакуумных контакторов, которые коммутируют малые токи нагрузки с большим коммутационным ресурсом.

Современный моторно-пружинный привод, к примеру вакуумного выключателя ЗАН4 фирмы Siemens имеет гарантийный ресурс 120.000 механических коммутаций (токов к.з. до 40 кА) и обеспечивает малые габариты привода. Кроме этого необходимо отметить, что для силовых вакуумных выключателей основным определяющим фактором является не механический коммутационный ресурс привода, а электрический коммутационный ресурс вакуумной дугогасительной камеры, который в настоящее время не превышает 30.000 коммутаций номинальных и 150 аварийных (номинальных токов к.з.) токов.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: одним из основных видов привода современных вакуумных выключателей является моторно-пружинный привод, который рассмотрим ниже.

1.3.4 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД МОТОРНО-ПРУЖИННОГО ТИПА СОВРЕМЕННЫХ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ТИПА ЗАН И НХАСТ

Небольшой электродвигатель в течение нескольких секунд взводит мощный пружинный механизм с ресурсом полного АПВ. Команду включения и отключения осуществляет (при нормальном и аварийном режиме) электромагнитный расцепитель (имеет очень малую мощность) и в крайнем случае имеется возможность отключения в ручную (при полном отсутствии электроэнергии).

Так как расстояние между контактами в отключенном состоянии максимум 6мм, то могут возникнуть ситуации касания контактов (при больших вибрациях). Для таких случаев применяется, кроме магнитной защелки, механическая, которая точно

поддерживает расстояние между контактами в отключенном состоянии.

Вакуумный выключатель ЗАН состоит: из корпуса привода с электромеханическим приводом моторно-пружинного типа с запасенной энергией и элементами управления, трех полюсов выключателя с вакуумными дугогасительными камерами литых опорных изоляторов и переключающих изоляционных штанг.

При нормальных условиях эксплуатации вакуумный выключатель не требует технического обслуживания.

Определяющая коммутационная способность.

Привод силового выключателя ЗАН обеспечивает автоматическое повторное включение. Выключатель для номинального отключаемого тока короткого замыкания 40кА пригоден при номинальных параметрах для быстрого переключения, но может осуществлять автоматическое повторное включение лишь до 31,5 кА.

Оснащение привода

В стандартном исполнении вакуумные выключатели оснащены:

- электромеханическим приводом с механической и электрической системой блокировки от многократного включения выключателя на к.з. (M1)
- включающим электромагнитом (Y9)
- расцепителем рабочего тока (Y1)
- штеккерным соединением вторичных цепей (X0)
- вспомогательным выключателем (6 ЗАКР. + 6 ОТКР. контактов) (S1)
- позиционным выключателем для выдачи сообщения «Пружина натянута» (S41, S42)
- указателем положения выключателя (концевой выключатель) (S6 и S7)
- счётчиком коммутационных циклов
- механической блокировкой.

Каждый вакуумный выключатель может быть дополнительно оснащён следующим оборудованием:

- вспомогательным выключателем (12 ЗАКР. + 12 ОТКР. контактов) (S1)
- расцепителем рабочих токов ЗАХ 1101 (Y1)
- минимальным расцепителем напряжения ЗАХ 1103 (Y7)

Дополнительно к серийным расцепителям рабочих токов (Y1) вакуумный выключатель ЗАН может быть оснащён максимально 2 расцепителями типа ЗАХ 11.

Дополнительные комбинационные возможности по запросу.

Моторный привод (M1)

Максимальное потребление мощности при постоянном напряжении составляет приблизительно 500 Вт, а при переменном напряжении - 550 Вт. Двигатели привода из-за короткого времени натяжения пружин работают в диапазоне перегрузок. Номинальный ток, необходимый для защиты электродвигателя от короткого замыкания указан в таблице 1.3.

Допустимое отклонение напряжения питания для вторичных цепей составляет от -15% до +10% номинального значения.

Вспомогательный выключатель (S1)

Вспомогательный выключатель может иметь 2 конструкции. Стандартная конструкция

Таблица 1.3 Номинальные токи, потребляемые устройствами защиты электродвигателя

Номинальное питающее напряжение	24 В пост. тока	48 В пост. тока	60 В пост. тока	110 В пост./пер. тока 50/60 Гц	220 В пост. тока/230 В пер. тока 50/60 Гц
Рекомендуемый номинальный ток, потребляемый приборами защиты*	8/16 А	6/8 А	4/8 А	2/6 А	1,6/3 А

*) Комбинация устройств управления 8RL54 или токовый автомат с G-характеристикой. Каждое последующее более высокое значение следует выбирать в том случае, если этого требует согласование со старыми, уже существующими устройствами.

вспомогательного выключателя 6 замкнутых и 6 разомкнутых контактов. Удлиненная конструкция предусматривает наличие 12 замкнутых и 12 разомкнутых контактов.

- Номинальное изоляционное напряжение: 250 В пост./пер. тока
- Изоляционная группа: С согласно DIN 0110
- Продолжительный ток: 10 А
- Коммутационная способность: 50 А

Штеккерное соединение (0X) вторичных цепей

Расположенные в блоке привода элементы управления силовым выключателем ЗАН присоединены проводами для внешнего подключения к штеккерному соединению (0X) Стандартная конструкция имеет 64-полюсный штеккерный разъем.

Включающий вспомогательный расцепитель (Y9) 3AY1510

Включающий электромагнит служит для разблокирования натянутой включающей пружины, а следовательно для подачи электрической команды на включение силового выключателя. Он может быть рассчитан как на постоянное, так и на переменное напряжение. Включающий электромагнит после исполненной команды на включение самостоятельно отключается.

Потребляемая мощность 110 Вт/ВА.

Таблица 1.4 Коммутационная способность вспомогательного выключателя 3SV92

Коммутационная способность				
Пер. напряжение от 40 до 60 Гц		Постоянное напряжение		
Раб. напряжение U (В)	Раб. ток I (А)	Раб. напряжение U (В)	Раб. Ток I (А)	
			омическая нагрузка	индуктивная нагрузка (T=20 мсек.)
до 230	10	24	10	10
		48	10	9
		60	9	7
		110	5	4
		220	2,5	2

Расцепитель рабочих токов (вспомогательный отключающий расцепитель)

Расцепитель рабочих токов используется для отключения силового выключателя по команде соответствующего реле защиты или для принудительного отключения посредством подачи электрической команды. Он рассчитан на подключение к внешнему источнику питания (переменного или постоянного тока), но в особых случаях (для принудительного отключения) он может быть подключен и к трансформатору напряжения.

Используются два различных типа расцепителей рабочих токов:

1. Расцепитель рабочих токов (Y1) 3AY 1510

Расцепитель рабочих токов (Y1) 3AY 1510 используется в выключателях основного исполнения. В расцепителях этой конструкции электрически подаваемый расцепляющий импульс передаётся посредством якоря электромагнита, действующего напрямую. Благодаря этому осуществляется отключение выключателя.

Потребляемая мощность 100 Вт/ВА.

2. Расцепитель рабочих токов (Y2) 3AX 1101

Расцепитель рабочих токов 3AX 1101 встраивается в том случае, если используется более чем один расцепитель рабочих токов. В расцепителях этой конструкции электрически подаваемая команда на отключение передаётся посредством якоря электромагнита через разблокировку накопителя энергии на блокировку «ВЫКЛ». Благодаря этому осуществляется отключение выключателя.

Потребляемая мощность 100 Вт/ВА.

Расцепитель снижения напряжения (Y7) 3AX1103

Расцепитель снижения напряжения состоит из накопителя энергии, устройства разблокировки и системы электромагнитов, которая при включенном выключателе постоянно находится под напряжением. Если уровень напряжения снижается до определённого значения, то расцепитель разблокируется и благодаря этому осуществляется отключение выключателя.

Принудительное отключение минимального расцепителя напряжения обычно осуществляется через размыкающий контакт в цепи расцепителя, но может быть осуществлено посредством замыкания накоротко обмотки соленоида. При таком способе расцепления ток короткого замыкания ограничивается встроенными сопротивлениями.

Минимальный расцепитель напряжения может быть подключен к трансформатору напряжения. При недопустимом снижении уровня рабочего напряжения силовой выключатель самостоятельно отключится.

Потребляемая мощность - 45 Вт или 55 ВА.

Расцепитель тока измерительного трансформатора (Y4) 3AX1102

(заказывается по желанию, возможна также последующая установка)

Расцепитель тока измерительного трансформатора состоит из накопителя энергии, приспособления для освобождения защелки и пружинной системы. При превышении тока расцепителя (90% номинального тока расцепителя) освобождается защелка накопителя энергии и, тем самым, осуществляется отключение выключателя. Для подпитки расцепителя тока измерительного трансформатора помимо основного трансформатора тока для согласования необходим еще один вспомогательный трансформатор.

Потребляемая мощность для 0,5 А и 1 А = 20 ВА при 90% номинального тока и разомкнутом якоре.

Указатель положения выключателя, концевой выключатель (S6 и S7)

При отключении силового выключателя посредством расцепителя позиционный выключатель S6 даёт кратковременное замыкание контактов. Это кратковременное замыкание контактов можно использовать для сигнализации. При механическом отключении квитирующий выключатель S7 разрывает эту цепь.

Блок ограничителей перенапряжений (от V1 до V3) 3AX1526

При отключении индуктивных нагрузок в цепях постоянного тока могут возникнуть коммутационные перенапряжения, которые могут вывести из строя электронные приборы управления. Для предотвращения этого оборудование, размещённое в блоке привода и управления силовым выключателем (электродвигатель, включающий электромагнит, расцепитель рабочих токов и вспомогательный контактор), подключаются к ограничителям перенапряжений. Для номинальных рабочих напряжений от 60 до 220 В постоянного тока имеются в распоряжении ограничители перенапряжений 3AX1526, которые позволяют ограничить перенапряжения на уровне около 500 В. Блок ограничителей перенапряжений содержит 2 отдельных цепи ограничителей перенапряжений.

Блокировка**Механическая блокировка**

Приводы разъединителей оснащены механической защитой от ошибочной коммутации. Кроме этого разъединитель механически заблокирован с силовым выключателем.

Коммутационное положение силового выключателя определяется автоматически. Если будет установлено, что трёхпозиционный разъединитель находится в ошибочном коммутационном положении, силовой выключатель блокируется как против механического, так и против электрического включения. В то же время предотвращается включение трёхпозиционного разъединителя при включенном силовом выключателе.

Электрическая блокировка

Силовой выключатель может быть включен в систему электромагнитной блокировки ячейки КРУ. При электрической блокировке к разъединителю или его приводу подключается электромагнитное запирающее устройство, которое через вспомогательный контакт силового выключателя управляется таким образом, что разъединитель может приводиться в действие только при отключенном силовом выключателе.

Силовой выключатель, со своей стороны, управляется по отношению к разъединителю или его приводу таким образом, что он может быть включен только при замкнутом положении разъединителя.

Время коммутаций

Собственное время включения (время до замыкания контактов)
Время взвода

мсек. ≤75
сек. <15

Собственное время отключения (время до разрыва контактов)	Расцепитель рабочих токов	(Y1) мсек.	<65
	Дополнительный расцепитель ЗАХ 11	(Y2) мсек.	<50
		(Y4) мсек.	<50
		(Y7) мсек.	<50
Время горения дуги Время отключения	Расцепитель рабочих токов	(Y1) мсек.	<80
	Дополнительный расцепитель ЗАХ 11	(Y2) мсек.	<50
		(Y4) мсек.	<50
		(Y7) мсек.	<50
Продолжительность паузы Время размыкания или замыкания контакта	Расцепитель рабочих токов		мсек. 300
	Дополнительный расцепитель ЗАХ 11	(Y1) мсек.	<80
Минимальная продолжительность команды		(Y2) мсек.	<50
		(Y4) мсек.	<50
		(Y7) мсек.	<50
ВКЛ ВЫКЛ ВЫКЛ	Включающий электромагнит	(Y9) мсек.	45
	Расцепитель рабочих токов	(Y1) мсек.	40
	Дополнительный расцепитель ЗАХ 11	(Y2) мсек.	<50
		(Y4) мсек.	<50
Минимальная импульсная длительность сигнала для указателя положения выключателя		(Y7) мсек.	<50
			мсек. 10
Собственное время включения	= отрезок времени между подачей команды на включение и моментом касания контактов во всех полюсах.		
Собственное время отключения	= отрезок времени между подачей команды на отключение и разрывом контактов во всех полюсах.		
Время горения дуги	= отрезок времени с момента возникновения первой дуги до момента гашения дуги во всех полюсах.		
Время отключения	= отрезок времени между временем до замыкания контактов выключателя и истечением времени горения дуги.		
Время размыкания или замыкания контактов	= отрезок времени при коммутационном цикле «ВКЛ-ОТКЛ» между моментом касания контактов в первом полюсе при замыкании контактов и моментом времени, когда при последующем размыкании контактов замыкается дугогасительный контакт во всех полюсах.		

1.3.5 КОНСТРУКЦИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ЗАН

На рис.1.11 представлена конструкция вакуумного силового выключателя ЗАН. Вакуумный выключатель состоит из блока привода (60.), 3 полюсов (19.) с вакуумными коммутационными камерами (30.) и коммутационных штанг (48.), приводящих в движение контакты.

В блоке привода (60.) расположены все электрические и механические функциональные блоки, необходимые для включения и отключения выключателя. На рис. 1.12. представлено расположение отдельных блоков в приводе.

В вакуумных выключателях типа ЗАН с конструкцией полюса аналогичной приведенной на рис. 1.15., отключающие пружины (64.) не требуются, поскольку поджимающие контактные пружины (49.) выполняют функцию отключающих пружин.

Блок привода оснащён съёмной крышкой (60.1) (см. рис. 1.13). Для элементов управления и индикаторов в крышке (60.1) предусмотрены отверстия.

Силовой выключатель включается посредством кнопочного выключателя (53.). Электродвигатель (50.4) обеспечивает взведение включающей пружины (62.). При отсутствии оперативного напряжения включающую пружину можно взвести вручную посредством рукоятки (50.). Для этих целей в крышке предусмотрено отверстие для рукоятки (50.1), за которым находится муфта (50.5) натяжного механизма (50.2). Состояние пружины отражается на индикаторе (55.). На индикаторе (59.) отражается коммутационное положение выключателя (ВКЛ-ОТКЛ). Счётчик коммутационных циклов (58.) показывает количество выполненных коммутаций. Типовая табличка (51.) установлена на корпусе блока привода.

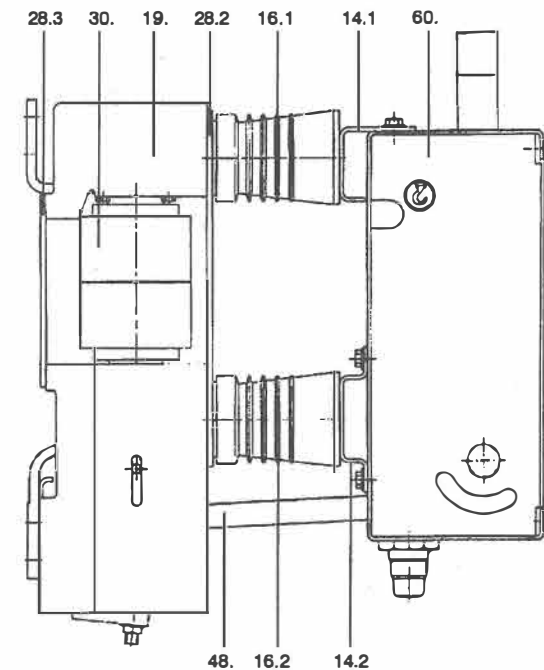


Рис.1.11. Вакуумный силовой выключатель ЗАН

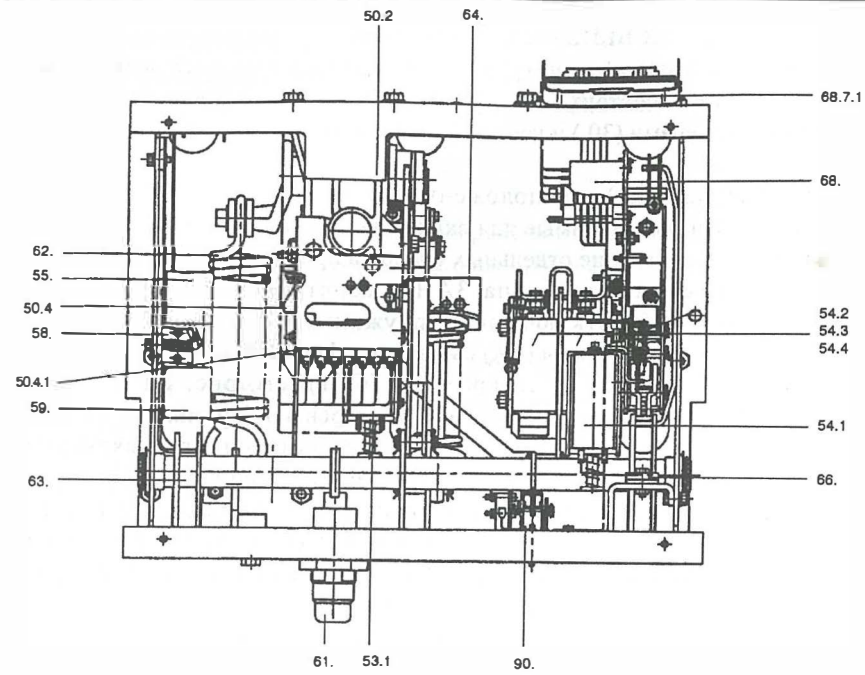


Рис. 1.12. Открытый корпус привода

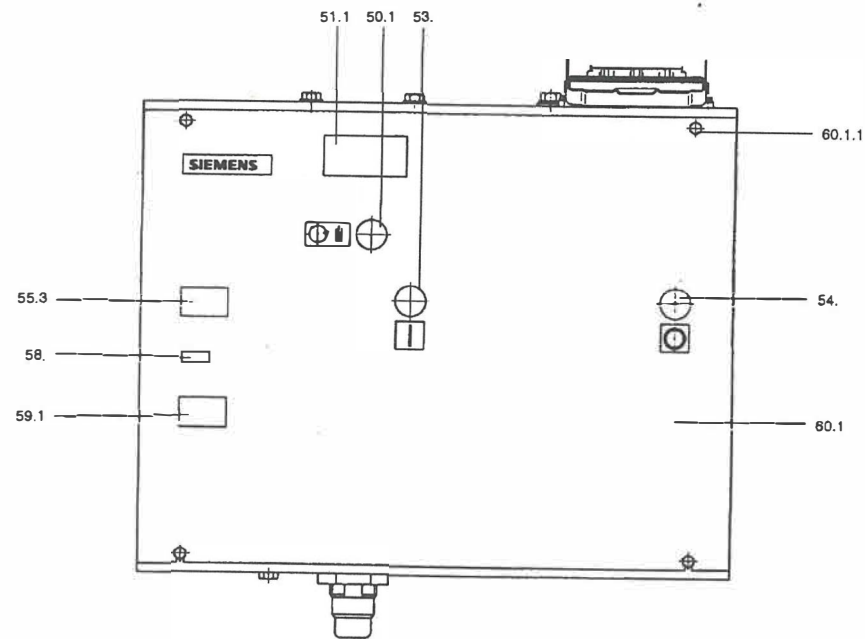


Рис. 1.13 Указатели и элементы обслуживания

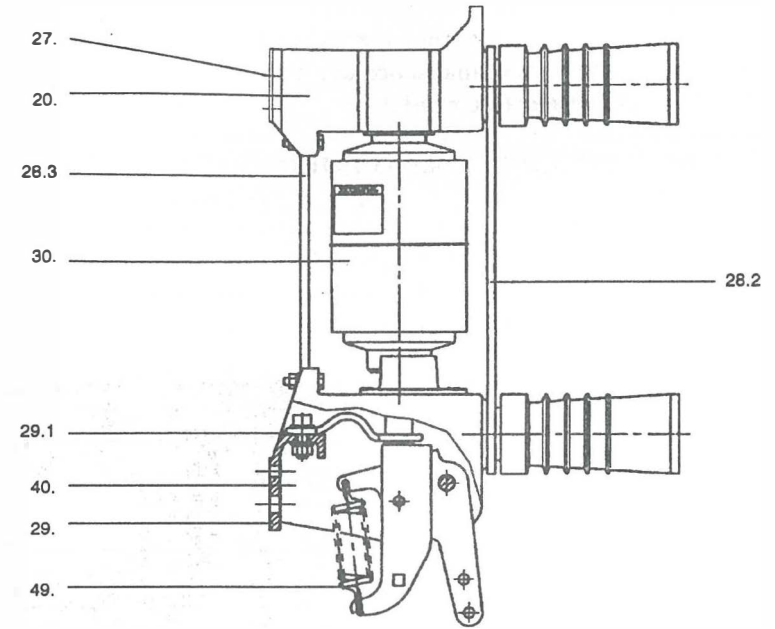


Рис. 1.14. Полос выключателя ЗАН

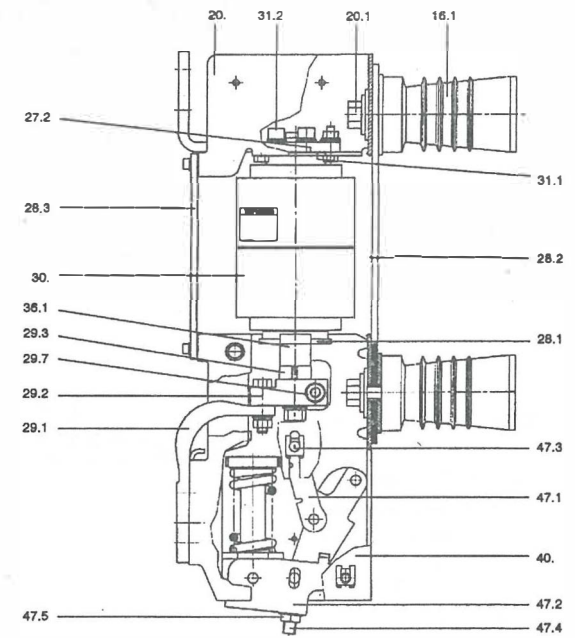


Рис. 1.15. Полос выключателя ЗАН

Передача перемещающих усилий от привода к полюсам выключателя осуществляется через изоляционные штанги выключателя (48). Полюс выключателя в зависимости от номинального рабочего тока и номинального отключаемого тока короткого замыкания может иметь два типа исполнения (см. рис.1.14 и 1.15).

1.3.6 ПРИВОД ВАКУУМНОГО КОММУТАЦИОННОГО МОДУЛЯ NXACT.

Привод вакуумного коммутационного модуля тот же что и привод вакуумного выключателя ЗАН5 (рис.1.16). Этот привод дополнительно оснащен, в зависимости от желания потребителя, моторным или ручным приводом для выполнения дополнительных расширенных функции разъединителя и заземлителя.

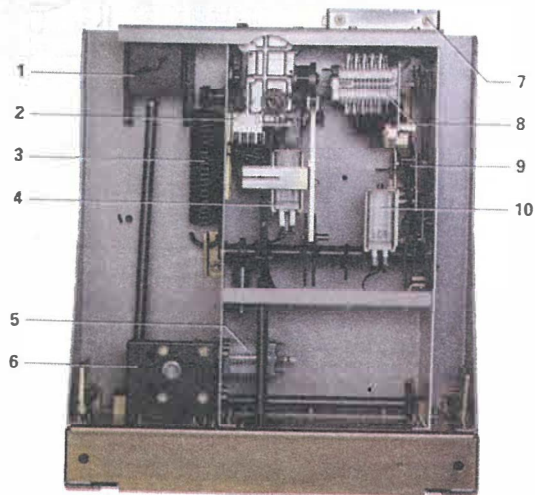


Рис.1.16 Привод вакуумного коммутационного модуля NXACT: 1 - привод для функции разъединителя, 2 - мотор с приводом, 3 - включающая пружина, 4 - включающий вспомогательный расцепитель (включающий электромагнит), 5 - вспомогательный выключатель для функции разъединителя, 6 - привод для отвлечения заземлителя, 7 - штеккерное соединение вторичных цепей, 8 - вспомогательный выключатель для функции выключателя, 9 - отключающий блок, 10 - первый расцепитель рабочих токов.

На рис.1.17. приводится кинематический чертеж вакуумного коммутационного модуля NXACT.

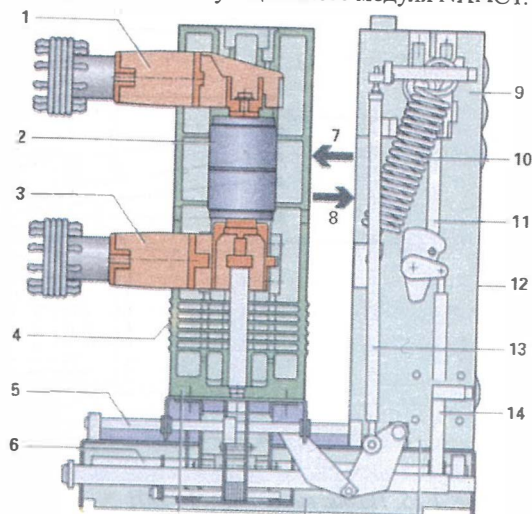


Рис.1.17 Кинематический чертеж вакуумного коммутационного модуля NXACT. 1 - верхний ввод, 2 - вакуумная камера, 3 - нижний ввод, 4 - корпус полюса, 5 - направляющая штанга для передвижения полюсов, 6 - полюсная кинематика, 7 - направление движения полюсов из положения разъединения в положение ввода в действие, 8 - направление движения полюсов из положения ввода в действие в положение разъединения, 9 - привод, 10 - включающая пружина, 11 - вал привода силового выключателя, 12 - панель управления, 13 - вал привода разъединения с механической блокировкой, 14 - вал привода заземлителя с механической блокировкой.

ВЫВОДЫ

На основании выполненного литературного анализа сформулированы следующие выводы:

1. Началом развития вакуумной коммутационной техники можно принять середину шестидесятых годов, когда была изобретена АМФ- контактная система, которая дала толчок серийному производству вакуумных выключателей в начале семидесятых годов.
2. Для производства вакуумной коммутационной техники основой является высокий технологический уровень производителя и накопленный опыт по производству вакуумных ламп разного электротехнического назначения. Это определяет правильный подбор контактных материалов для вакуумных коммутационных камер.
3. Контактные материалы вакуумных выключателей можно разделить на три основные группы по номинальным параметрам и задачам коммутационного аппарата: CuCr - для коммутации более высоких напряжений (до 145 кВ и до 63 кА), CuTeSi и CuBi - более низких напряжений (до 24 кВ) и для более высоких аварийных токов (до 200 кА), и AgWC - для низких напряжений (до 7,2 кВ), каждый из которых целесообразно применять для определенных коммутационных задач и номинальных параметров коммутации. Основным признанным коммутационным материалом является CuCr (более чем 98 % случаев).
4. Для коммутации малых индуктивных токов, особенно малых электродвигателей, рекомендуется применение контактных материалов на основе AgWC.
5. В настоящее время из всех существующих типов выключателей: масляных, маломасляных, воздушных, электромагнитных, элегазовых, вакуумных и т. д. по параметрам: высокой надежности, экологичности, обслуживанию и эксплуатации, диапазонам номинальных параметров и экономичности наиболее целесообразными являются элегазовые и вакуумные выключатели.
6. Для коммутационных задач в сетях высокого напряжения наибольшее применение нашли элегазовые выключатели, а в сетях среднего напряжения оптимальным является вакуумный выключатель.
7. По показателям эксплуатационной надежности, коммутационным и механическим ресурсам, затратам на эксплуатацию, экологичности, сравнительно малой массы и малых габаритов, вакуумные выключатели на порядок превосходят как элегазовые, так и любые другие выключатели.
8. По показателям уровня опасных перенапряжений, при прочих равных условиях параметров сети, вакуумные выключатели современных фирм, при правильном подборе контактных материалов, находятся на одном уровне с элегазовыми выключателями.
9. В настоящее время в вакуумной коммутационной технике достигнуты следующие номинальные параметры коммутации:
 - а) для сетей переменного тока - с напряжением до 145 кВ и с номинальной отключающей способностью до 200 кА.
 - б) для сетей постоянного тока - с напряжением до 250 кВ и с номинальной отключающей способностью до 140 кА.
10. Вакуумная коммутационная техника является основной коммутационной техникой среднего напряжения следующих десятилетий. Ожидаемый спрос рынка к 2010 году должен составить 80% всего рынка коммутационной техники среднего напряжения.
11. Одним из основных видов привода современных вакуумных выключателей является моторно-пружинный привод.

ГЛАВА 2. СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ВАКУУМНЫХ И ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в литературе и в научных кругах ведется дискуссия о целесообразности применения и надежности того или иного вида коммутационного оборудования в сетях среднего класса напряжения. В основном дискуссия идет о целесообразности применения вакуумных или элегазовых выключателей среднего напряжения. Задачей этой книги является сопоставление преимуществ и недостатков вакуумного и элегазового коммутационного оборудования среднего класса напряжения.

Для решения поставленной выше задачи определим общие требования к коммутационному аппарату среднего напряжения:

1. Наибольшее число коммутаций в электроэнергетических сетях приходится на коммутационное оборудование среднего класса напряжения.
2. Основная задача коммутационного аппарата - надежная селективная коммутация при аварийных ситуациях и, тем самым, защита силового электрооборудования от опасных перегревов при аварийных токах.
3. Высокая надёжность коммутационного аппарата является определяющим фактором надежности всей электроэнергетической сети.
4. При координации изоляции сети важным фактором является использование такого типа коммутационного аппарата, который дает низкие уровни перенапряжений при коммутации сети.

2.1 ФИЛОСОФИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ СРЕДНИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ИЛИ ЭЛЕГАЗОВОЙ СРЕДЫ

В передовых фирмах Запада философия использования в коммутационных аппаратах средних классов напряжения вакуумной или элегазовой среды для гашения дуги основывается на следующих ключевых моментах:

- Диэлектрическая прочность на уровне средних классов напряжений у вакуума гораздо выше, чем у элегаза.
- Эксплуатационная надежность у вакуумной дугогасящей камеры гораздо выше, чем у элегазовой дугогасящей камеры.
- При использовании современных технологий в производстве вакуумной коммутационной техники и качественно подобранных контактных материалах, задача координации изоляции решена с высокой степенью надежности.
- Экологическая чистота - важный фактор применения того или иного вида техники.

К примеру, фирма Siemens, в отличие от многих других фирм, уже в 30-х годах имела обширный опыт работы по исследованиям и разработкам высоковольтной коммутационной техники, а с 60-х годов начала серийное производство элегазовой коммутационной техники. К 2000 году фирма Siemens уже произвела более 100.000 элегазовых

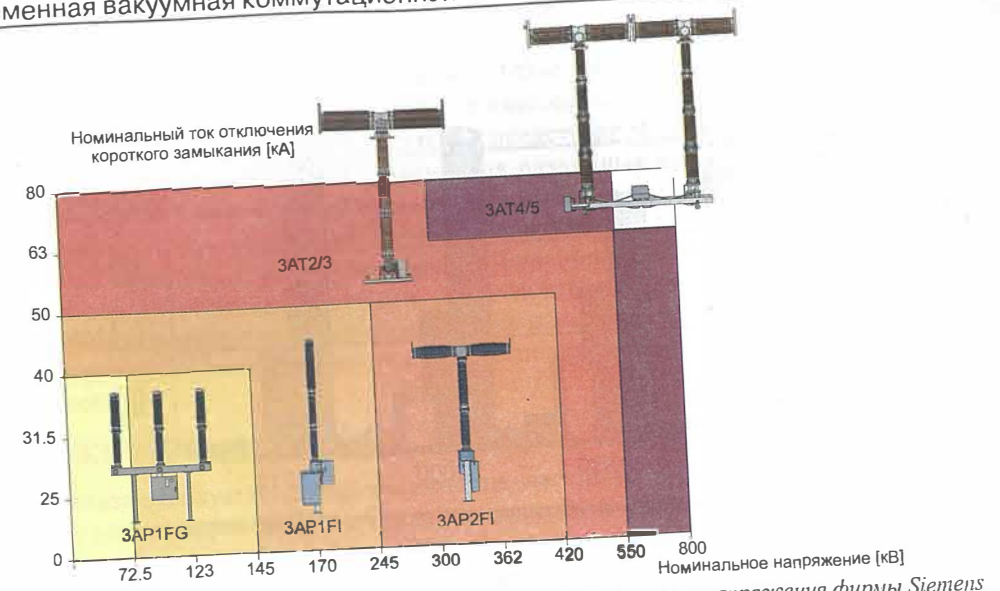


Рис. 2.1 Спектр продукции: силовые элегазовые выключатели высокого напряжения фирмы Siemens

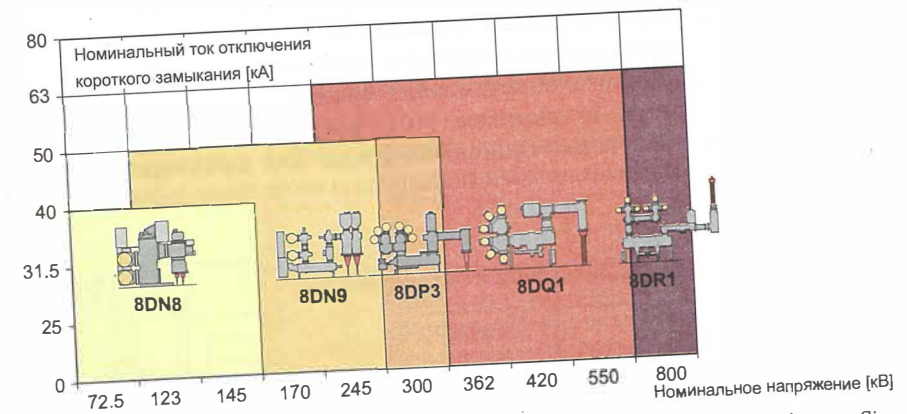


Рис. 2.2. Элегазовые распределительные устройства высокого напряжения фирмы Siemens

дугогасительных камер с номинальными напряжениями до 800 кВ и с номинальными токами короткого замыкания до 80 кА, как для выключателей наружной установки, так и для элегазовых КРУ (рис. 2.1 и рис. 2.2.) Несмотря на это, через десятилетие, в семидесятых годах, фирма Siemens внедрила в производство вакуумные выключатели среднего напряжения. На это решение повлиял тот факт, что рядом с заводом элегазового высоковольтного коммутационного оборудования находился завод по производству мощных вакуумных генераторных ламп, имевший более чем столетний опыт по исследованиям и разработке контактных материалов для различных вакуумных камер разного электротехнического назначения. В 1999 году на этом заводе Siemens произвел

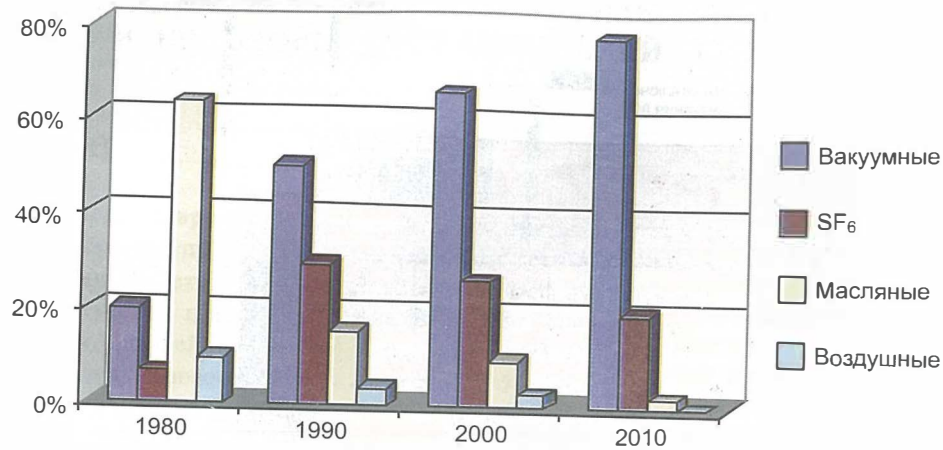


Рис.2.3. Развитие современной коммутационной техники среднего напряжения.

больше одного миллиона вакуумных дугогасящих камер с разными электротехническими характеристиками. Отдельные современные электротехнические фирмы, не имея такого обширного опыта по производству вакуумных камер разного назначения, внедрили в производство элегазовые выключатели для среднего напряжения. Эти фирмы в последнее время тоже переходят на производство вакуумных выключателей. Дальнейшее развитие современного коммутационного оборудования среднего напряжения, по разным независимым литературным источникам [10], предполагается только по пути использования вакуума как коммутационной среды для выключателей среднего напряжения (рис. 2.3).

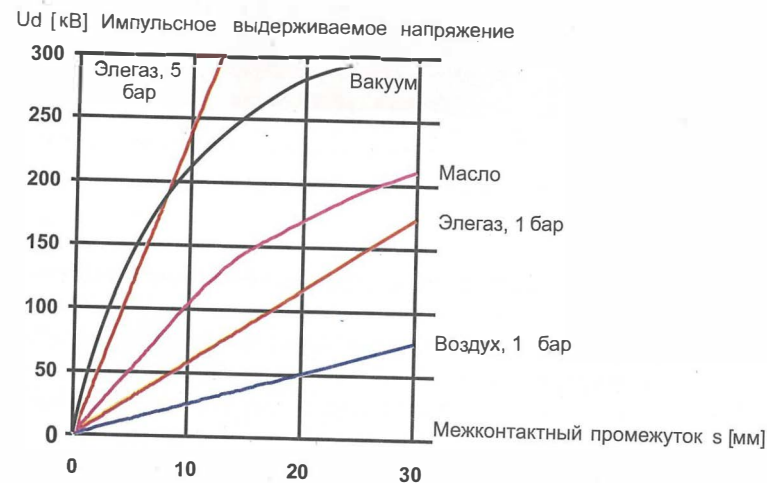


Рис.2.4. Разрядное импульсное напряжение в зависимости от величины межконтактного промежутка в различных дугогасящих средах.

Диэлектрическая прочность вакуума.

Проведенные исследования показали, что диэлектрическая прочность глубокого вакуума (вакуум 10^{-7} бар.) для уровней средних классов напряжений выше, чем у других диэлектрических материалов [34]. На рис.2.4 представлена электрическая прочность промежутка между плоскими электродами для различных сред дугогасящих камер. Крутизна кривой для малых расстояний у вакуума гораздо выше, чем у других материалов, т.е. при очень малых расстояниях между контактами достигается наибольшая электрическая прочность дугогасящей среды. После определенных расстояний между контактами диэлектрическая прочность вакуума стремится к постоянной величине. Вакуумные выключатели с номинальным напряжением от 7,2 кВ до 36 кВ номинального рабочего напряжения имеют расстояние между контактами от 5 до 25 мм.

2.2 НАДЕЖНОСТЬ

Для анализа эксплуатационной надежности элегазовых и вакуумных выключателей рассмотрим их конструктивные особенности и принципиальные различия. Ниже, более подробно, рассмотрим наиболее распространенные элегазовые и вакуумные выключатели среднего напряжения, их принцип работы и применение. В настоящее время надежность коммутационного аппарата определяется надежностью дугогасительной камеры. Это определяется тем, что современные выключатели среднего напряжения имеют почти одинаковую надежность привода и она гораздо выше надежности дугогасительной камеры.

2.2.1 КОМПРЕССИОННЫЕ ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Рассмотрим принцип действия автокомпрессионного элегазового выключателя. Основные составные части этого выключателя изображены на (рис.2.5.).

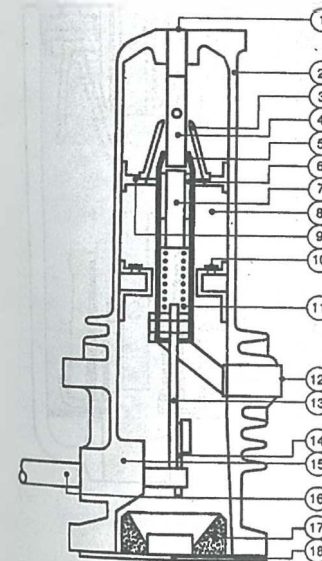


Рис.2.5. Автокомпрессионный элегазовый выключатель [35]

1. Верхний токовый ввод
2. Абсолютное давление элегаза 0,5 бар.
3. Герметизирующая насадка
4. Неподвижный дугогасительный контакт
5. Подвижный основной контакт
6. Соединения между подвижными и неподвижными частями
7. Подвижный дугогасительный контакт
8. Напорная камера
9. Поршень
10. Вентиль
11. Пружина
12. Нижний токовый ввод
13. Главный шток из изолирующего материала
14. Рычаг вала
15. Система уплотнений
16. Вал
17. Молекулярное сито
18. Место крепления

При включенном состоянии ток течёт через верхний токовый ввод (1), неподвижный дугогасительный контакт (4), подвижный основной контакт (5) и нижний токовый ввод (12) (рис.2.6,а). После команды отключения привод приводит в действие вал (16), который вращаясь, через систему уплотнения (15) передает механический момент главному штоку (13) через рычаг вала (14) и происходит сжатие элегаза в напорной камере (8) (рис.2.6,б). При этом неподвижный и подвижный дугогасительные контакты (4 и 7) остаются замкнутыми в силу поджатия пружины (11). После этого начинается расхождение неподвижного и подвижного дугогасительного контакта (4 и 7) в силу ослабления пружины (11) (рис.2.6,в). Главный шток из изолирующего материала (13) начинает отдалять их друг от друга. При расхождении неподвижного и подвижного дугогасительных контактов между ними начинает гореть дуга. Как видно на рис.2.5, к подвижному дугогасительному контакту прикреплен поршень (9) с герметизирующей насадкой (3), движущийся в напорной камере (8), обеспечивая при этом одновременно охлаждение и выдувание дуги элегазом под высоким давлением. Напорная камера с поршнем и герметизирующей насадкой при полном расхождении контактов обеспечивает полное гашение в дугогасящей камере (рис.2.6,г).

Более усовершенствованной и надежной моделью автокомпрессионного выключателя является автокомпрессионный выключатель с главными токоведущими контактами. Рассмотрим его принцип действия и определим его составные части:

При включенном состоянии ток течёт по главному токопроводу, состоящего из верхнего и нижнего токового ввода (22 и 19) и из неподвижного и подвижного контакта главного токопровода (20 и 21). После команды отключения привод приводит в действие вал (14), который вращаясь, через систему уплотнения (13) передает механически момент шатуну (17), закрепленный к главному штоку (10). Главный шток тянет за собой вниз подвижный контакт главного токопровода и происходит разрыв главного токопровода. При этом неподвижный и подвижный дугогасительные контакты (4 и 6) остаются замкнутыми в

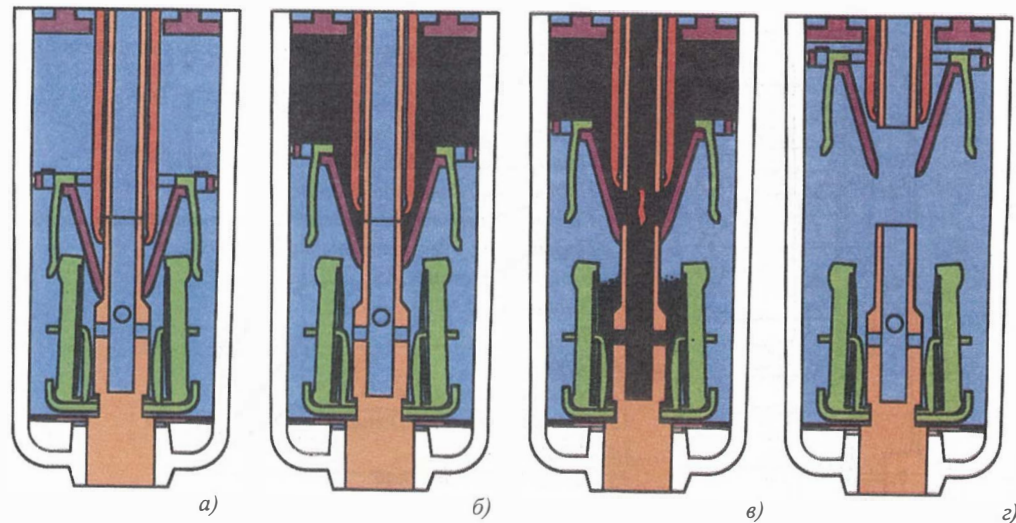


Рис. 2.6. Принцип работы автокомпрессионного выключателя

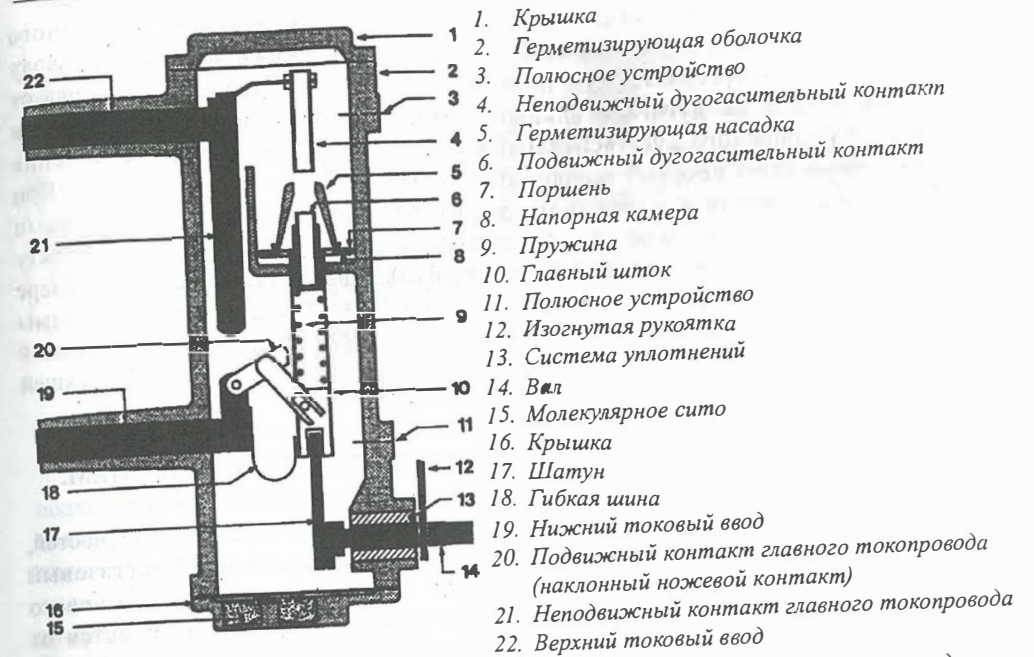


Рис.2.7. Автокомпрессионный элегазовый выключатель с главными токоведущими контактами

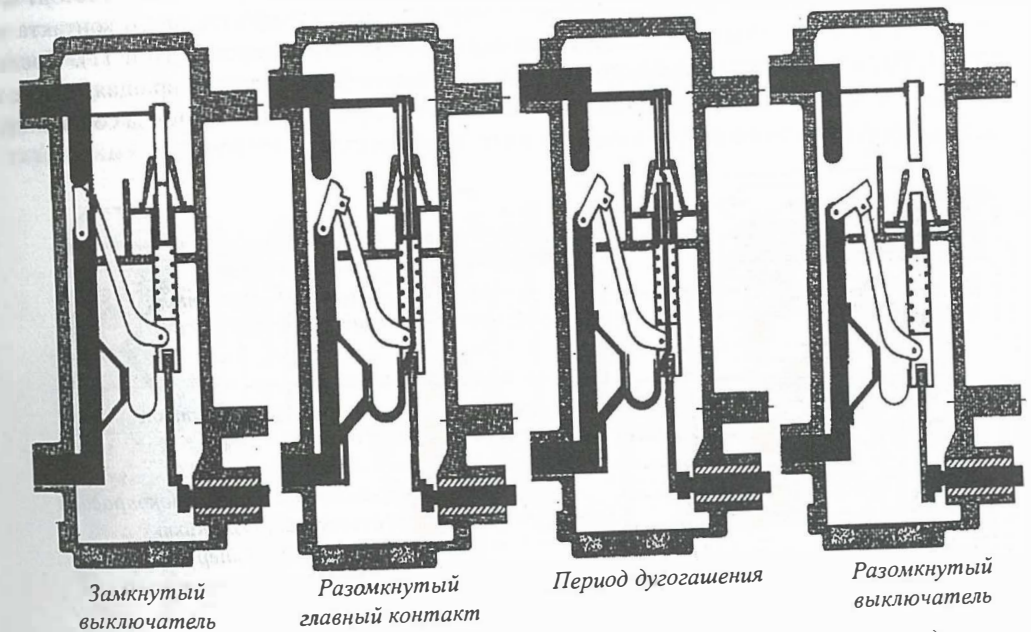


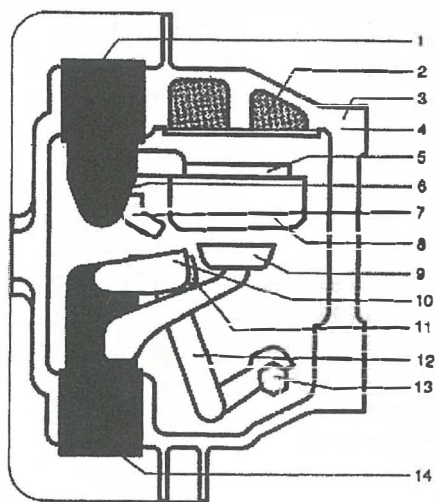
Рис.2.8. Принцип работы автокомпрессионного выключателя с главными токоведущими контактами

силу поджатия пружины (9) и отключаемый ток перераспределяется от главного токопровода на дугогасительный токопровод, подсоединяется к нижнему токовому вводу (19) через главный шток (10) и гибкую шину (18). После перераспределения тока от главного токопровода на дугогасительный токопровод начинается расхождение неподвижного и подвижного дугогасительных контактов (4 и 6), в силу ослабления пружины (9) главный шток начинает все больше и больше отдалять их друг от друга. При расхождении неподвижного и подвижного дугогасительных контактов между ними начинает гореть дуга. Как видно на рис. 2.7. к подвижному дугогасительному контакту прикреплен поршень (7) с герметизирующей насадкой (5), движущийся в напорной камере (8), обеспечивая при этом одновременно охлаждение и выдувание дуговой плазмы элегазом под высоким давлением. Напорная камера с поршнем и герметизирующей насадкой при полном расхождении контактов обеспечивает полное гашение в дугогасящей камере. Описанный процесс изображен на рис.2.8.

2.2.2 ЭЛЕГАЗОВЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ С ГАШЕНИЕМ ДУГИ ВРАЩЕНИЕМ.

Элегазовые выключатели среднего класса напряжения имеют больше разновидностей, чем вакуумные. Выше мы рассмотрели наиболее распространенный элегазовый компрессионный выключатель. Сейчас рассмотрим принцип действия более нового элегазового выключателя, принцип действия которого радикально отличается от описанного выше выключателя. На рис. 2.9. представлен элегазовый выключатель с гашением дуги вращением.

При включенном состоянии ток течёт по главному токопроводу, который состоит из верхнего и нижнего токового ввода (1 и 14) и из неподвижного дугогасящего контакта и подвижного контакта главного токопровода и дугогасящего контакта (7,10 и 11). После команды отключения привод приводит в действие вал (13), который вращаясь через систему уплотнения, передает механически момент рычагу (12). Рычаг тянет за собой вниз



- 1- верхний токовый ввод.
- 2- абсорбирующий материал.
- 3- корпус из изолирующего материала
- 4- точки крепления
- 5- катушка
- 6- главный токовый ввод
- 7- неподвижный дугогасящий контакт
- 8- верхнее кольцо дуги
- 9- нижнее кольцо дуги
- 10- подвижный контакт главного токопровода
- 11- подвижный дугогасящий контакт
- 12- рычаг из изолирующего материала
- 13- вал с герметизирующим уплотнением
- 14- нижний токовый ввод

Рис. 2.9. Элегазовый выключатель с гашением дуги вращением [36,37].

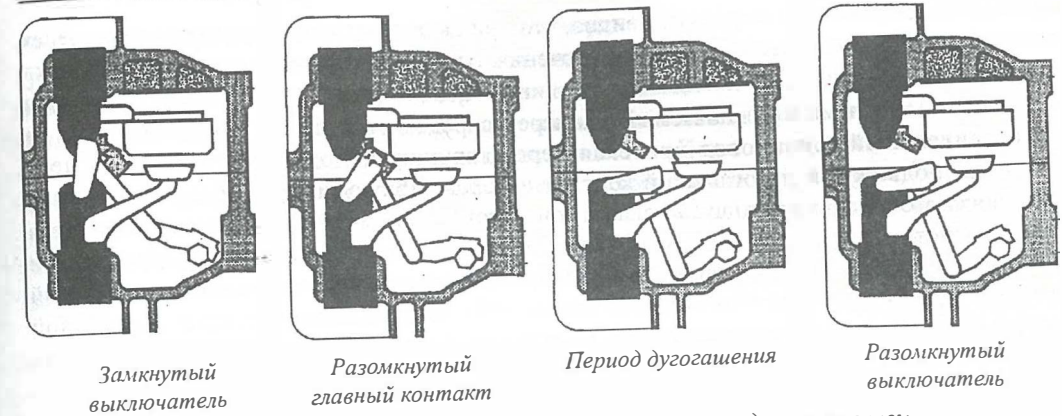


Рис.2.10. Принцип работы элегазового выключателя с гашением дуги вращением.

подвижный контакт главного токопровода, на котором закреплен подвижный дугогасящий контакт. После разрыва главного токопровода дуга начинает гореть между неподвижным и подвижным дугогасящими контактами и переходит между верхним и нижним кольцами дуги. При этом отключаемый ток перераспределяется от главного токопровода на дугогасительный токопровод, протекая через катушку (5) верхнего и нижнего колец дуги. После перераспределения тока от главного токопровода на дугогасительный, под воздействием магнитного поля катушки, дуга начинает вращаться на поверхности колец, выдуваясь и охлаждаясь элегазом. После гашения тока при переходе через нуль дуга полностью гаснет и элегаз восстанавливает изоляционную прочность между верхним и нижним кольцами. Описанный процесс изображен на рис.2.10.

Гибридной конструкцией вышеописанных, автокомпрессионного и с гашением дуги вращением, элегазовых выключателей является, так называемый, автокомпрессионный элегазовый выключатель с гашением дуги вращением, принцип действия которого

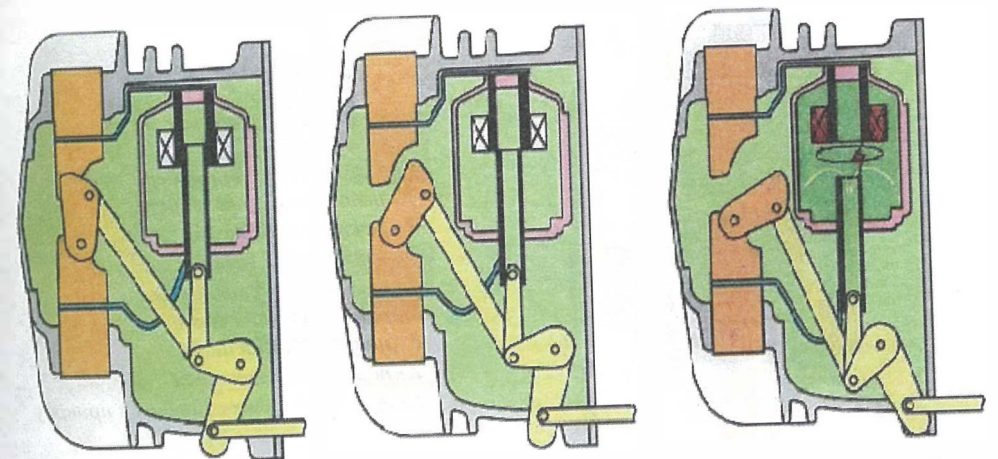


Рис.2.11. Принцип работы автокомпрессионного элегазового выключателя с гашением дуги вращением.

приводится на рис. 2.11. Из рисунка видно, что при включенном состоянии ток течет через главный токопровод. После команды отключения, в начальный момент, происходит разрыв главного токопровода. При этом неподвижный и подвижный дугогасящие контакты остаются замкнутыми и отключаемый ток перераспределяется от главного токопровода на дугогасительный токопровод протекая через катушку неподвижного дугогасящего контакта, подвижный дугогасящий контакт и через гибкую шину. После расхождения неподвижного и подвижного дугогасящих контактов, между ними загорается дуга, которая под воздействием магнитного поля катушки вращается по поверхности неподвижного и подвижного дугогасящих контактов, выдувается и охлаждается элегазом через подвижный дугогасительный контакт под воздействием избыточного давления дугогасительной камеры. При полном расхождении контактов дуга полностью гаснет и элегаз восстанавливает изоляционную прочность между контактами.

2.2.3 ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Что касается вакуумных выключателей, то здесь гашение дуги в дугогасящей камере имеет совсем другой принцип, чем гашение дуги в элегазовых выключателях. Гашение дуги происходит в вакуумной камере (рис.2.12.). Коммутационная камера (4) находится между двумя керамическими изоляторами (3). Неподвижный и подвижный контакты подключаются внешним токовым вводам. Неподвижный контакт жестко прикрепляется к корпусу выключателя, а подвижный контакт - к приводу выключателя, который может перемещаться в вакуумной камере без нарушения вакуума только на несколько миллиметров за счет наличия металлического сильфона («гармошка» из металла цельнотянутая или сварная). Внутреннее давление вакуумной камеры, как отмечалось выше, составляет меньше чем 10^{-7} бар. Характеристики контактного материала и сама геометрия контактов соответствует техническим требованиям выключателя.

Процесс отключения тока в вакуумной камере происходит следующим образом. После расхождения контактов дуга отключаемого тока, вызвавшая испарение материала

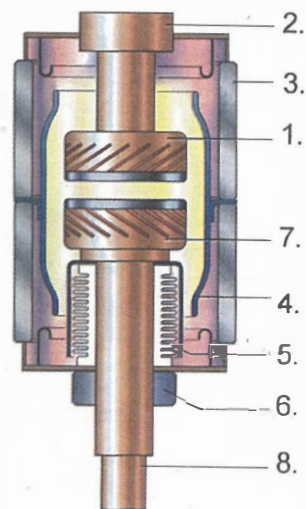


Рис.2.12. Вакуумная камера
1 - неподвижный контакт
2 - место подключения
3 - изолятор (керамический)
4 - коммутационная камера
5 - металлический сильфон
6 - направляющая шайба
7 - подвижный контакт
8 - резьба для присоединения к приводу

контактов, гасится при первом переходе тока через нуль. Пары металла, образованные дугой отключаемого тока, конденсируются на поверхности контактов в течение нескольких микросекунд после погасания дуги, теряя при этом свои токопроводящие свойства. После конденсации паров металла на поверхности контактов изоляционный промежуток между ними восстанавливает свои изоляционные свойства. Пары металлов в очень малом количестве конденсируются на поверхности коммутационной камеры (4), которая защищает керамические изоляторы (3) от напыления проводящим металлическим слоем и, тем самым, защищает от нарушения их изоляционных свойств, т.е. коммутационная камера выступает как защита от нарушения диэлектрической прочности изоляторов (3).

При расхождении контактов в вакуумной камере возникает электрическая дуга, представляющая собой проводящую среду из паров металла контактов. Для токов отключения до 10 кА дуга равномерно распределена по поверхности контактов, т.е. имеется случай, так называемой, диффузной вакуумной дуги. При более высоких токах, из-за пинч-эффекта, дуга в вакуумной камере сосредоточена в одной точке [38]. С целью исключения термических перегрузок контактов при токах к.з. до 50 кА была изобретена, так называемая, контактная система с радиальным магнитным полем или RMF-система. RMF контактная система устроена таким образом, что магнитное поле отключаемого тока заставляет дугу вращаться по поверхности контактов. Эксплуатационные требования гашения дуги в вакуумной среде при токе к.з. более чем 50 кА дали толчок к изобретению

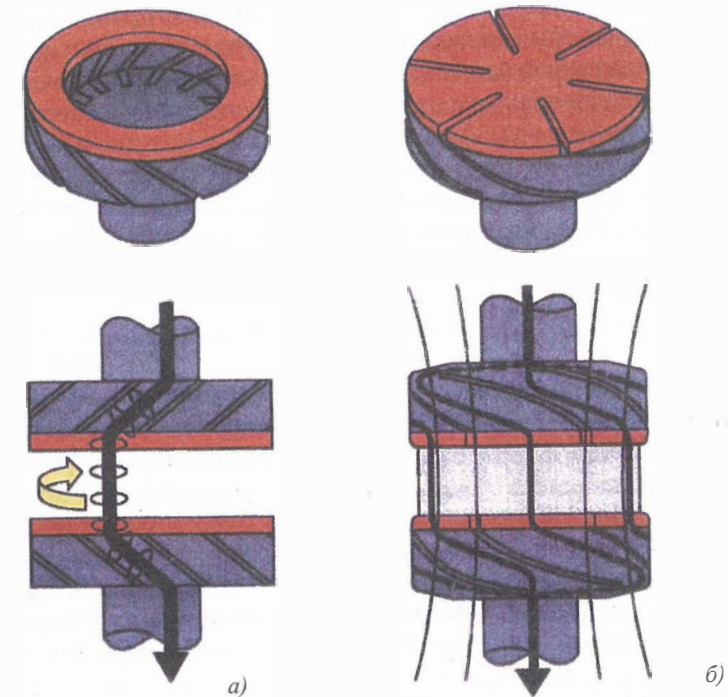


Рис.2.13 Контактные системы:
а) RMF(radial magnetic field) радиальная;
б) AMF(axial magnetic field) аксиальная

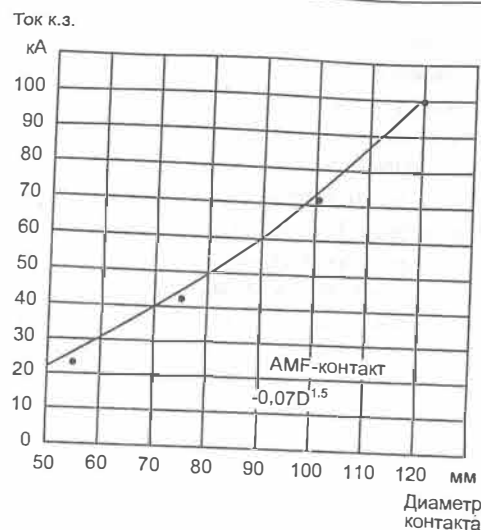


Рис. 2.14. Зависимость тока отключения от диаметра АМФ-контактов [38]

камеры с аксиальным магнитным полем или АМФ-системы, являющейся особым видом контактной системы. Идея АМФ состоит в наличии одного витка в структуре контакта выключателя [39], который создает аксиальное магнитное поле, удерживающее дугу равномерно распределенной по поверхности контакта при любой величине отключаемого тока, т.е. создает диффузионную дугу. Простая и экономичная в изготовлении контактная система АМФ приведена на рис. 2.13,б.

Для оптимального использования поверхности, контакт рассчитан методом приближения [40] и имеет такую конструкцию, что аксиальные компоненты магнитной индукции контакта B_z/l составляют от 3,5 мТ/А до 5 мТ/А.

Диапазон отключающих способностей АМФ-контакта зависит от диаметра контакта и определяется как (рис. 2.14.):

$$I_{sc} = 0,07\sqrt{D^3},$$

где I_{sc} - максимальный ток отключения в кА, D - диаметр контакта, в мм.

Например, при контакте диаметром 100 мм возможно отключение тока до 72 кА. При дальнейшем увеличении диаметра контактов можно достигнуть более высоких значений отключаемого тока.

Следует отметить, что метод гашения дуги в вакуумной среде с помощью АМФ-контактов можно использовать для гашения несинусоидальных токов.

Благодаря преимуществам принципа гашения дуги в вакууме, вакуумные выключатели превосходят по своему техническому уровню другие, а система АМФ-контактов представляет собой самый экономичный на сегодняшний день принцип гашения.

Энергия дуги

Горение дуги в элегазе при отключении основано на генерации дугой высоко-температурной проводящей плазмы. Для гашения дуги необходимо иметь дугогасящую

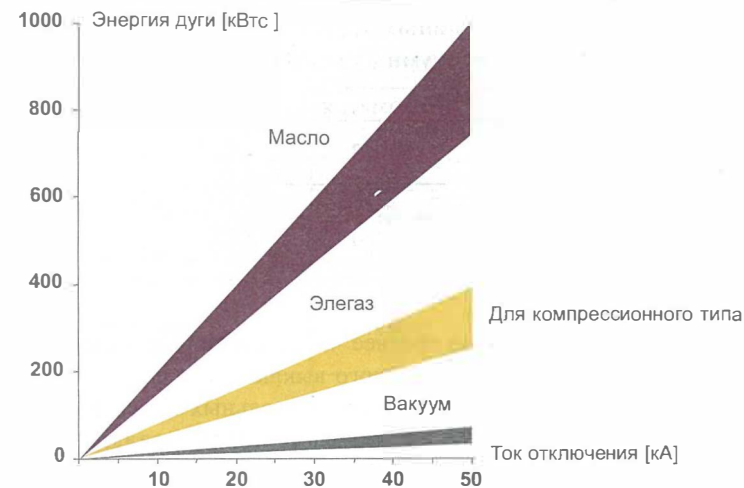


Рис. 2.15 Энергия дуги

камеру, обеспечивающую одновременно охлаждение и выдувание плазмы элегазом под высоким давлением. В связи с этим, современные элегазовые дугогасящие камеры представляют собой сложную конструкцию, состоящую более чем из 20 подвижных механических частей [41,42].

Горение дуги в вакуумной камере при отключении токов основано на проводящей среде паров металла контактов, которая еще до полного расхождения контактов конденсируется в течение нескольких микросекунд и диэлектрическая прочность вакуума восстанавливается полностью. Это явление в значительной мере обеспечивается тем, что энергия горения дуги паров металла из специально подобранных сплавов контактных материалов, в вакууме гораздо меньше, чем энергия горения дуги в плазме элегаза в дугогасительной камере элегазового выключателя (рис.2.15). При этом вакуумная дугогасительная камера имеет только две подвижные части (рис.2.12.).

2.2.4 ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕГАЗОВЫХ И ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Необходимо отметить, что основной задачей силовых выключателей является отключение токов короткого замыкания и, тем самым, защита электрооборудования от воздействий на него, вызываемых аварийными токами. Силовые выключатели должны справляться с этой задачей с высокой эффективностью и надежностью.

Одним из важных критериев оценки эффективности и надежности электрооборудования является показатель эксплуатационной надежности (MTBF - mean time between failures), который определяется как среднее ожидаемое число лет безаварийной работы. Обратной величиной MTBF является частота отказов. Как показал многолетний анализ эксплуатационной надежности маломасляных, элегазовых и вакуумных выключателей MTBF приблизительно обратно пропорционален числу составных частей коммутационной камеры выключателя [43]. Основываясь на этом, были проведены исследования современных маломасляных, элегазовых и вакуумных выключателей среднего класса

Табл. 2.1. Сравнение числа составных частей коммутационной камеры маломасляных, элегазовых и вакуумных выключателей.

	Маломасляный	Элегазовый	Вакуумный
Общее число составных частей коммутационной камеры	43	52	22
Число подвижных частей	18	24	9
Число подвижных частей дугогасящей камеры.	17	24	2

напряжения [41], где было определено среднее число составных частей коммутационных камер (табл. 2.1.). К примеру МТВФ вакуумного выключателя фирмы Siemens составляет около 1000 лет, а МТВФ самих вакуумных дугогасительных камер Siemens - 24.000 лет. Сравнение между вакуумными и элегазовыми выключателями показывает, что дугогасительная часть элегазовых выключателей содержит значительно большее количество деталей, чем вакуумный выключатель. Особо существенным при этом также является количество подвижных деталей коммутационной камеры. Частота отказов подвижных деталей естественно выше, чем у неподвижных деталей. Коммутационная камера элегазового выключателя имеет большее количество подвижных деталей.

При этом сравнении не были приняты во внимание приводы коммутационных систем, хотя и здесь вакуумный выключатель имеет преимущества по сравнению с элегазовым выключателем из-за своей низкой энергии привода. Сравнение показывает, что на основании выше приведенных соображений, от вакуумного выключателя можно ожидать значительно большей надежности, чем от выключателей, использующих другие принципы дугогашения.

Этот вывод можно сделать на основании опыта производства фирмой Siemens более 300.000 вакуумных выключателей, изготовленных заводом выключателей в Берлине и более чем 20 партнерами по производству и обладателями лицензии во всем мире.

Обобщая вышеприведенные результаты различных независимых исследований, можно сделать вывод, что в отношении надежности принцип вакуумного дугогашения превосходит все другие. Немецкие электроснабжающие предприятия приняли решение об использовании вакуумных силовых выключателей на АЭС, главным образом, благодаря их безотказности. В Германии вакуумный выключатель со своим удельным весом, составляющим 95% рынка, определенно занял главенствующее положение.

Из-за разного числа составных частей коммутационной камеры техобслуживание того или иного типа коммутационного аппарата имеет различный временной промежуток. Кроме того, число составных частей влияет на номинальное число коммутаций аппарата, величина которого является одним из важных факторов коммутационных аппаратов среднего напряжения. В вакуумном выключателе номинальное число коммутационных циклов рабочих токов и токов короткого замыкания значительно выше, чем в элегазовых выключателях.

Например, стандартный вакуумный выключатель фирмы Siemens на 12 кВ / 31,5 кА / 2500 А 3АН2 может отключать ток:

20 кА	250 раз
31,5 кА	85 раз
4,5 кА	10.000 раз
2500 А	30.000 раз

Табл.2.2. Техобслуживание

	Вакуум	SF ₆
Коммутации номинального тока к.з.	30-400	10-50
Коммутации номинального рабочего тока	до 30.000	до 10.000
Интервал техобслуживания (лет)	10-20 - без техобсл.	5-10
Техобслуживание привода	Просто (в большинстве случаев не нужно)	Просто
Техобслуживание полюсов	не нужно	Сложно (заводские специалисты, высокие требования к безопасности)

Механическая долговечность составляет 60.000 коммутационных циклов. Исходя из этого вакуумные выключатели хорошо подходят для частых кратковременных отключений в сетях воздушных линий электропередач.

Если, в исключительных случаях, этого количества коммутационных циклов недостаточно (например, для дуговых печей), то можно использовать вакуумные выключатели с механической долговечностью 120.000 коммутационных циклов.

Вакуумные выключатели типа 3АН (Siemens) не нуждаются в техническом обслуживании до истечения 10.000 коммутационных циклов. Это означает, что в нормальных условиях эксплуатации в течение всего, более чем 20-летнего, срока эксплуатации нет необходимости ни в смазке, ни в регулировке. В отдельных случаях, когда требуется большее число коммутационных циклов, или в сложных условиях окружающей среды, следует проводить простые работы по техническому обслуживанию, в основном смазку.

При всех других принципах дугогашения трудоемкость технического обслуживания выключателей значительно выше. Для элегазовых выключателей среднего напряжения необходимы, в зависимости от типа выключателей, ежегодные осмотры: каждые пять лет небольшие и, в любом случае, каждые десять лет большие проверки. И даже, если за 10 лет выключателем пользовались лишь изредка, предусмотрен ремонт всей дугогасящей камеры.

В табл. 2.2. приведены усредненные данные по номинальному числу коммутаций вакуумных и элегазовых выключателей среднего напряжения.

Токсичность и взрывоопасность

При отключении тока в элегазовой камере электрическая дуга вызывает разложение элегаза. При этом образуются газообразные низшие фториды серы SF₂, SF₄ и металлические фториды, частицы которых абсорбируются на поверхности контактной системы и других частях камеры [44]. Сам элегаз не является токсичным газом, но его газообразные продукты разложения при взаимодействии с парами воды могут вызвать токсические отравления у обслуживающего персонала при проведении технического осмотра, либо при повреждении выключателя. В связи с этим, элегазовые выключатели не являются экологически чистыми и их утилизация требует дополнительных средств.

Кроме того, элегазовая дугогасительная камера, в отличие от вакуумной, состоит из изолирующих синтетических частей и резиновых прокладок (рис.2.1б), в силу наличия которых вероятность взрывоопасности и пожароопасности при повреждении

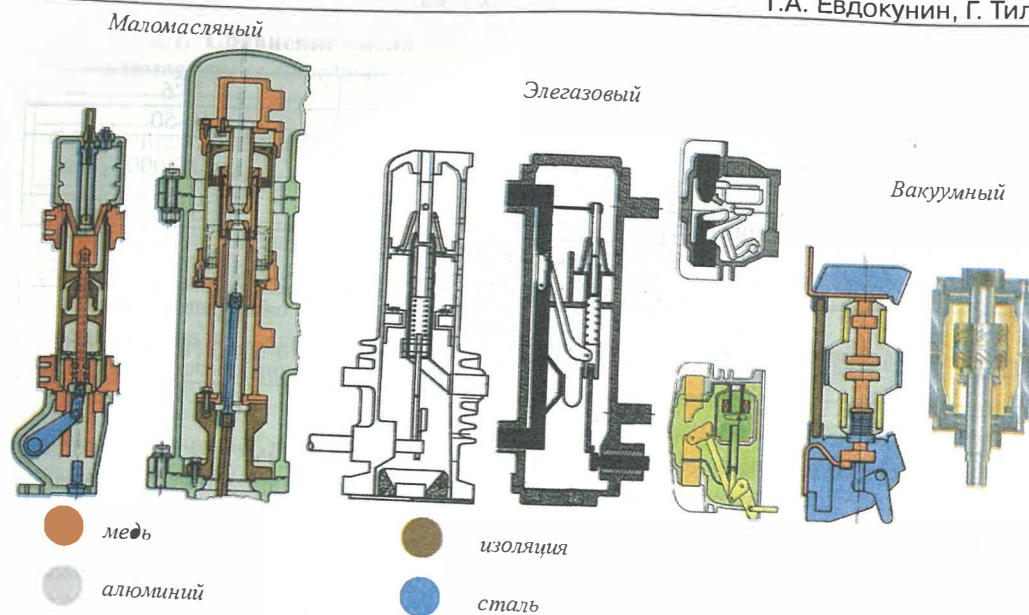


Рис. 2.16. Сравнение составных частей коммутационной камеры маломасляного, элегазового и вакуумного выключателей.

коммутационного аппарата очень велика.

Применение изолирующих синтетических материалов в вакуумном выключателе практически исключено (используется электроизоляционная керамика). Фазные полюсы выключателя изолированы относительно земли стандартным опорным изолятором и изолирующими штангами.

В производстве элегазовых выключателей используется значительное количество синтетических материалов, особенно тогда, когда все три полюса расположены в общем корпусе. Это приводит к необходимости поперечной изоляции между тремя полюсами с высокой электрической напряженностью поля, так как изолирующие промежутки малы и постоянно находятся под линейным напряжением. Высокое содержание синтетических материалов имеет следующие недостатки:

- повышенная опасность частичных разрядов при эксплуатации
- в случае аварийной ситуации электрическая дуга может вызвать возгорание синтетических материалов
- при потере дугогасящей среды (элегаза) всегда есть опасность взрыва вследствие негашения дуги, что ведет к аварийной электрической дуге между тремя полюсами (трехфазное к.з.) и мгновенному сгоранию синтетических материалов в изолирующем баке.

Некоторые производители элегазовых выключателей среднего напряжения имеют конструкции выключателя, где отдельные полюсы каждой фазы объединены в общую систему. При отказе гашения какой-либо из фаз выключателя, такие конструкции часто являются источниками двух- или трехфазных коротких замыканий.

Как было указано выше, гашение дуги в вакуумной камере имеет совсем другой принцип, основанный на образовании паров металлов и конденсации их на поверхности

Табл. 2.3 Срок службы

	Вакуум	SF ₆
Энергия привода	20 %	35 % (Автокомпрессионные)
Энергия дуги	10 %	100 % (Компрессионные)
Число частей полюса	невелико	значительно
Эксплуатационная надежность коммутационной камеры	≈ 24.000 лет	≈ 2.500...8.000 лет

контактов при гашении дуги. При этом нет никаких токсичных выделений и утилизация вакуумных камер является экологически чистой.

Герметичность

Контроль дугогасящей среды оказывает большое влияние на эксплуатационную надежность и срок службы коммутационного аппарата среднего напряжения. В частности, у элегазовых выключателей дугогасящая среда коммутационной камеры герметизируется от окружающей среды различными резиновыми прокладками или эпоксидными соединениями, подверженными старению и ухудшению диэлектрических и герметизирующих свойств в течение срока службы выключателя [44,45].

Диэлектрические свойства элегаза снижаются из-за накопления продуктов разложения в коммутационной камере при нарастании числа коммутаций также в течение всего срока службы. При этом возникает настолько сильное обгорание контактов, что необходимо их разделение на главные и дугогасящие контакты. В большинстве случаев контроль дугогасящей среды обеспечивается манометром без показания качества элегаза.

В отличие от элегазовых, вакуумные камеры не имеют резиновых прокладок. Герметизация дугогасящей среды в вакуумной камере от окружающей среды производится высококачественной аргоновой сваркой, которая не теряет своих уплотняющих свойств в течение всего эксплуатационного периода. Такие соединения не подвержены старению. При этом чистота вакуума сохраняется в течение всего срока эксплуатации. Вакуумные камеры, которые не были в эксплуатации, сохраняют свою работоспособность более 20 лет. Тем самым готовность к коммутациям не ограничена временем простоя.

Так как при коммутациях в вакуумной камере гашение дуги происходит без каких-либо продуктов разложения, вакуум не ухудшает свои диэлектрических свойств. Благодаря отсутствию в вакууме окисления, поверхности контактов остаются чистыми. При этом в течение всего срока эксплуатации сохраняется очень низкое переходное сопротивление контактов.

Подводя итоги вышесказанного и учитывая проведенный анализ эксплуатационной надежности элегазовых и вакуумных выключателей на фирме Siemens [30,46,47,48], можно составить табл. 2.3 по сроку службы.

2.3 ВЫПОЛНЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

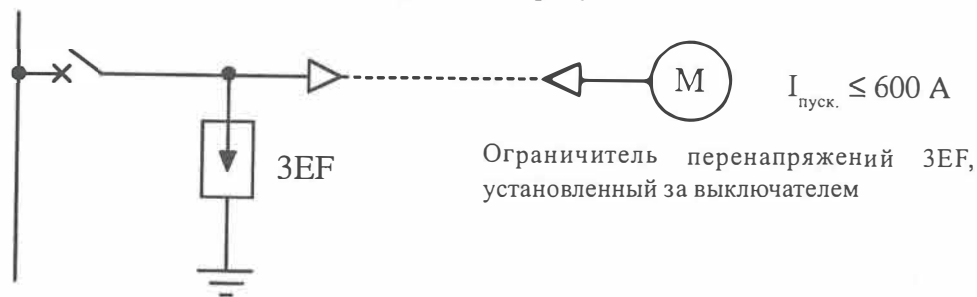
Помимо своей главной задачи, отключения токов короткого замыкания, силовые выключатели должны справляться и со всеми другими коммутационными задачами,

- конденсаторы постоянно связаны с электродвигателем
- компенсационная мощность Q_c составляет как минимум 1/5 полной мощности электродвигателя $S_{двиг.}$, обычно $Q_c = (1/3) * S_{двиг.}$

Ёмкость конденсатора снижает частотный спектр переходного процесса. В этом случае перенапряжения не возникают. Поэтому альтернативным вариантом является использование вместо ограничителей перенапряжений индивидуальной компенсации реактивной мощности.

На нижеприведенных схемах указаны точки подключения ограничителей.

Электродвигатель, коммутируемый напрямую

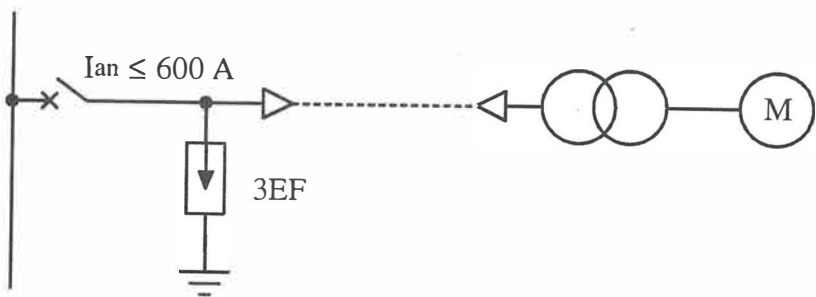


Ограничитель перенапряжений ЗЕФ, установленный за выключателем

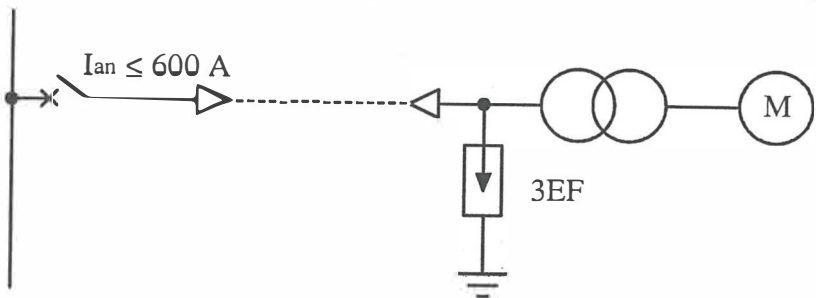
Электродвигатель с блочным трансформатором

Защитное действие в обоих вариантах одинаково.

Вариант 1 Ограничитель перенапряжений ЗЕФ, установленный за выключателем

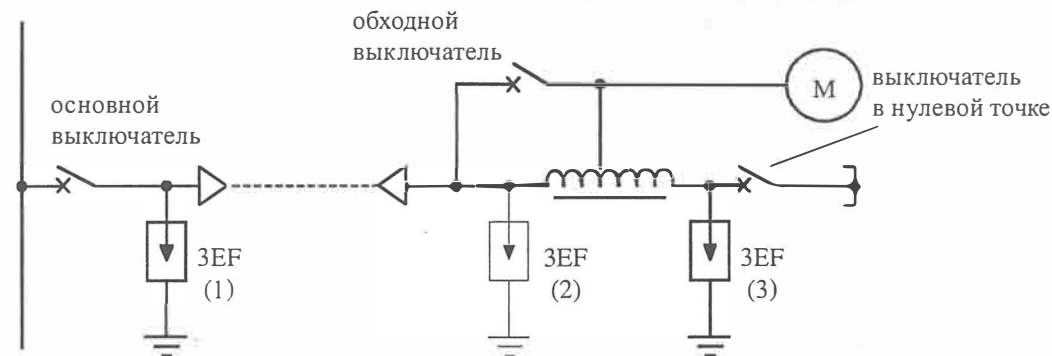


Вариант 2. Ограничитель перенапряжений ЗЕФ, установленный на трансформаторе



На трансформаторы вместо ограничителей перенапряжений ЗЕФ могут быть установлены разрядники в том случае, если изоляция трансформатора соответствует наивысшему значению уровня изоляции, нормированному согласно МЭК 71 / VDE 0111.

Электродвигатель с пусковым трансформатором



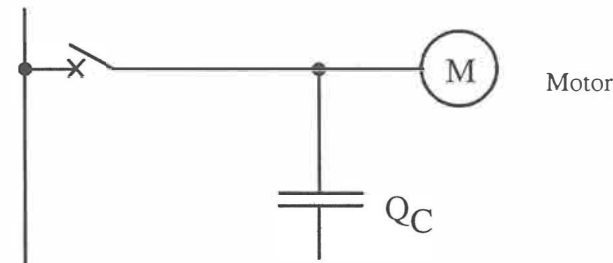
Пусковой ток	Подключение ограничителя перенапряжений ЗЕФ
$I_{пуск.} \leq 600 \text{ A}$	либо на основном выключателе (1), либо на трансформаторе (2); на нейтрали трансформатора (3)
$I_{пуск.} > 600 \text{ A}$	на нейтрали трансформатора (3)

Часто уровень изоляции пусковых трансформаторов не соответствует расчетному уровню изоляции, нормированному согласно МЭК 71 / VDE 0111. Поэтому на трансформаторах (2) необходимо использовать только ограничители перенапряжений, потому что они имеют низкие значения остающегося напряжения. В этих случаях разрядники практически не используются.

Электродвигатель с индивидуальной компенсацией

Не требуется никаких мер защиты. В качестве альтернативы применению ОПН может использоваться метод индивидуальной компенсации.

Требование: компенсационная мощность $Q_c \geq (1/5) * S_{двиг.}$, обычно $Q_c = (1/3) * S_{двиг.}$



В связи с вышеизложенным, и тем фактом, что вакуумные выключатели тысячекратно прошли проверку на практике и эксплуатируются на АЭС многих стран, современные фирмы - производители вакуумной коммутационной техники дают гарантию на безотказную работу электродвигателей при коммутациях их вакуумными выключателями.

Общая коммутационная система вакуумного выключателя (макс. 2 части) с ограничителем перенапряжений (макс. 6 частей) имеет гораздо меньше составных частей, чем отдельно взятый элегазовый выключатель (макс. 24 части, см. табл.2.1.). Это означает, что эксплуатационная надежность вакуумного выключателя с ограничителем перенапряжений гораздо выше, чем отдельно взятого элегазового выключателя.

Кроме того, как было отмечено выше, в настоящее время проблему опасных перенапряжений при коммутации малых индуктивных токов с большим успехом решают применяемые для этой коммутационной задачи вакуумные выключатели с использованием AgW - или AgWC - сплавов для контактного материала.

Элегазовые выключатели с дутьем, зависящим от величины отключаемого тока, не имеют тенденции к многократным повторным зажиганиям и виртуальным токовым срезам.

При отключении электродвигателей в их пусковом режиме элегазовыми выключателями с дугогасительной камерой с поршнем, из-за повторных зажиганий и больших токовых срезов, создаются опасные перенапряжения, которые представляют опасность для изоляции электрооборудования.

Что касается включения и отключения электродвигателей, можно в целом констатировать, что благодаря своему большому допустимому числу коммутационных циклов и надежности в эксплуатации вакуумный выключатель лучше всего приспособлен для этой коммутационной операции, в том числе в особых условиях (отключение небольших электродвигателей во время пуска).

При отключении компенсирующих реакторов как у вакуумного выключателя, так и у элегазового выключателя с дугогасительной камерой с поршнем наблюдаются перенапряжения, вызванные многократными повторными зажиганиями, а при номинальных токах до 600 А - также виртуальные токовые срезы (об использовании в этом случае элегазовых выключателей с гасящим действием, зависящим от силы тока, в целом не может быть и речи из-за их номинальных параметров: 36 кВ / 31,5 кА). Но, благодаря своему большому допустимому числу циклов включения-отключения, вакуумный выключатель имеет преимущества, при условии применения специальных схем защиты от перенапряжений.

В заключение приведем еще два специальных случая коммутации: тяговый выключатель и выключатель для трансформаторов дуговых электропечей.

Коммутация в однофазных сетях тягового электроснабжения означает для выключателя следующие отличия, по сравнению с выключателями трехфазного тока на 50 Гц или 60 Гц:

- при низких частотах (16 2/3 Гц или 25 Гц) среднее время горения электрической дуги становится больше из-за увеличения периода отключаемого тока.
- в выключателях трехфазного тока три полюса «помогают» друг другу, например, в выключателях трехфазного тока 50 Гц каждые 3,3 мсек на 3 полюсах по очереди наблюдается прохождение тока через нуль, что приводит к уменьшению среднего времени горения электрической дуги. В тяговых выключателях такого облегчения не существует.

Уже при гашении электрической дуги в сетях трехфазного тока у элегазовых выключателей энергия горения дуг гораздо больше, чем у вакуумного выключателя. Поэтому из-за продолжительного времени горения электрической дуги, описанного выше, они вряд ли могут быть пригодны в качестве тягового выключателя.

При коммутации дуговых электропечей токи в диапазоне между током холостого хода и двукратным номинальным током трансформатора должны коммутироваться до 100 раз в день. Это создает чрезвычайно высокую нагрузку на выключатель, как электрическую, так и механическую, с которой лучше всего может справиться вакуумный выключатель (с защитными устройствами от перенапряжений).

Ввиду своего ограниченного допустимого числа коммутационных циклов и своих номинальных параметров (часто 36 кВ / 31,5 кА) элегазовые выключатели могут лишь в исключительных случаях использоваться в качестве выключателей дуговых электропечей.

В итоге можно констатировать, что использование современных вакуумных выключателей в каждом из отдельных случаев применения имеет преимущества по сравнению с использованием других выключателей. Это касается также, так называемых, критических коммутационных операций [17,18].

В целом приведенный выше краткий анализ более глубоко проведен во второй части книги.

ВЫВОДЫ

Исходя из анализа имеющихся данных и выполненных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Для коммутационных задач в сетях среднего напряжения оптимальным является вакуумный выключатель.
2. Перенапряжения, которые возникают при коммутации современными вакуумными выключателями в сетях среднего напряжения, в очень редких случаях требуют применения ОПН.
3. По показателям уровня опасных перенапряжений, при прочих равных условиях параметров сети, современные вакуумные выключатели находятся на одном уровне с элегазовыми выключателями.
4. Современные вакуумные выключатели среднего напряжения превосходят элегазовые по следующим параметрам:
 - Стабильность диэлектрической среды дугогасящей камеры на протяжении всего срока службы выключателя
 - Постоянное, небольшое переходное сопротивление контактов
 - Отсутствие продуктов разложения при коммутациях.
 - Высокое число коммутаций номинальных токов
 - Отсутствие обслуживания в течение 20 лет
 - Высокая надежность.
 - Низкое содержание синтетических материалов.
 - Отсутствие опасности взрыва в случае неисправности вакуумной дугогасительной камеры
 - Возможность применения для всех коммутационных задач
5. По показателям эксплуатационной надежности, коммутационным и механическим ресурсам, затратам на эксплуатацию, по экологичности, а также сравнительно малой массы и малых габаритов, вакуумные выключатели на порядок превосходят как элегазовые, так и любые другие выключатели.
6. Благодаря этим признакам, в сочетании с экономической выгодой принцип вакуумного дугогашения приобретает все большее признание. Вакуумный силовой выключатель является наиболее покупаемым коммутационным устройством в мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ПЕРВОЙ ЧАСТИ

1. I. Ito and T. Okura. „High current interruption phenomena in vacuum interrupters“. Mitsubishi Denki Giho, 1967, 11, pp. 1409-1414.
2. C. W. Kimblin and R. F. Voshall, „Interruption ability of vacuum interrupters subjected to axial magnetic fields“, Proc. IEE, 1972, 119,(12), pp. 1754-1758.
3. O. Morimiya, S. Sohma, T. Sugawara and R. Mizutani, „High current vacuum arcs stabilized by axial magnetic fields“, IEEE Trans. 1973, PAS-92, pp. 1732-1743.
4. T. E. Browne, Ed., Circuit Interruption, Theory and Design. Marsel Dekker Pub., 1984.
5. M. Murano, S. Yanabu and T. Tamagawa, „Interruption ability of vacuum arc“, Proc. 3rd Int. Conf. on Gas Disch., 1974, 118, pp. 648-652.
6. S. Yanabu, E. Kaneko, H. Okumura and T. Aiyoshi, „Novel electrode structure of vacuum interrupter and its practical application“, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, No.4, 1981, pp. 1966-1974.
7. S. Yanabu, S. Souma, T. Tamagawa, S. Yamashita and T. Tsutsumi, „Vacuum arc under an axial magnetic field and its interrupting ability“, Proc. IEE, vol. 126, No. 4, 1979, pp. 313-320.
8. Тибилашвили Д.А. Исследование и разработка надежных схем защиты от перенапряжений в сетях средних классов напряжения нефтяной промышленности западной Сибири: Дис. ... канд.тех.наук. /Ленингр.Гос.Техн.Уни.. Санкт-Петербург, 1991.
9. B. J. Calvino. „Single-pressure SF6 circuit breaker“, in Circuit Interruption, Theory and Design, T. E. Browne, Ed., Marcel Dekker Pub.1984, Ch. 10.
10. Paul G. Slade, Cutler Hammer: Growth of Vacuum Interrupter Application in Distribution Switchgear Trends in Distribution Switchgear, 10-12 November 1998, Conference Publication No. 459 г IEEEE
11. Y. Sunada, N. Ito, S. Yanabu, H. Awaji, H. Okumura and Y. Kanai: Research and development on 13.8 kV 100kA vacuum circuit breaker with huge capacity and frequent operation“, CIGRE Report, 13-04, 1982.
12. S. Tamura, R. Shimada, Y. Kito, S. Kanai, H. Koike, H. Ikeda and S. Yanabu, „Parallel interruption of heavy direct current by vacuum circuit breakers“, IEEE PES Summer Meeting F79 706-3, 1979.
13. T. Senda, T. Tamagawa, K. Higuti, T.Horiuti and S. Yanabu, „Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme“, IEEE PES Summer Meeting 83 SM 501-4, 1983.
14. Paul G. Slade, „Advances in Material Development for High Power, Vacuum Interrupter Contacts“, IEEE, Fellow.
15. J. V. R. Heberlein and J. G. Gorman, „The high current metal vapor arc column between separating electrodes“, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. PS-8, pp. 283-288, Dec. 1980.
16. P. G. Slade, „The vacuum interrupter contact“, IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufakt. Technol., vol. CHMT-7, pp. 25-32, Mar.1984.
17. B. Paul and R. Benz, „Contact arrangement for vacuum switches“, U.S.Patent 4 620 074, Okt. 1986.
18. S. Yanabu, Y. Satoh, T. Tamagawa, E. Kaneko and S. Sohma, „Ten years experience in axial magnetic field-type vacuum interrupters“, IEEE Trans. Power Del., vol. PWRD-1, pp. 202-208, Oct. 1986.
19. K. Ozawa, K. Matsumoto, T. Nakanishi, K. Yoshigae, M. Yamazaki and H. Shinohara, „Sintered Cu-Cr-Te alloy for the vacuum circuit breaker contact“, in Proc. Int. Conf. on

- Electrical Contacts, Electromechanical Components and their applications, pp. 823-830, Nagoya, Japan, July, 1986.
20. T. Moser and J. Breme, „Verminderung der Schweißkraft von Lichtbogen geschmolzenen CuCr50 für Vakuumschaltegeräte“, Metall., vol. 44, no. 11, pp. 1042-1047, Nov. 1990.
 21. V. J. Santilli, „Electrical contacts for vacuum interrupter devices“, U.S. Patent 4 743 718, May 1988.
 22. B. Ding, H. Li, X. Wang and J. Wang, „Residual carbon in Cu-Cr contact materials“, IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufakt. Technol., vol. 14, pp. 386-391, June 1991.
 23. P. Frey, N. Klink, R. Michal and K. E. Saeger, „Metallurgical aspects of contact materials for vacuum switching devices“, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 17, pp. 734-740. Oct. 1989.
 24. E. Naya, Y. Nagata, T. Horinchi, M. Okumura, M. Demizu, M. Hiramata, S. Asakawa and M. Asakawa, „Contact material for vacuum interrupter“, U.S. Patent 4 853 184, Aug. 1989.
 25. E. Naya and M. Okumura, „Contact for vacuum interrupter“, U.S. Patent 4 879 231, Sep. 1989.
 26. L. Czarnacki and M. Lindmayer, „Influence of contact material properties on the behavior of vacuum arcs around current zero“, in Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Applications, July 1986, Nagoya, Japan, pp. 807-819.
 27. H. Hüssler, H. Kippenberg and H. Schreiner, „Demands on contact materials for HV vacuum circuit breakers“, in Proc. 10th Int. Conf. on Electric Contacts, Budapest, Hungary: OMKDK, pp. 219-230, Aug. 1980.
 28. M. Murano et al., „Voltage Escalation in Interrupting Inductive Current by Vacuum Switches“, IEEE Trans. PAS, vol. 93, 1974.
 29. M. Murano et al., „Three-phase Simultaneous Interruption in Interrupting Inductive Current Using Vacuum Switches“, IEEE Trans. PAS-93, 1974.
 30. F. Battiwala, H. Fink, M. Rimmrott, W. Schultz: Vakuumschaltleistungsschalter 3AF und Vakuumschutz 3TL im Netzbetrieb. Siemens-Energietechnik 3 (1981) beiheft „Vakuumschalttechnik für Mittelspannung“ s. 46-54.31.
 31. Luxa, A. „МеЯтехниче и реchnerische Untersuchung von multiplen Wiederzündungen beim Schalten von Motoren mit Vakuumschaltern“ Diss. TU Berlin 1987.
 32. Satoru Yanabu, Eiji Kaneko, „Research and development of axial magnetic field electrode and its applikation“, 18th int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Eindhoven- 1998 r IEEE.
 33. Satoru Yanabu, Tadahito Tsutsumi, Kunio Yokokura, and Eiji Kaneko, „Recent Technical Developments in High-Voltage and High-Power Vacuum Circuit Breakers“ IEEE Transactions on plasma science. Vol. 17. no. 5. October 1989.
 34. H. Bettge. Konstruktion und Herstellung von Vakuumschaltegeräten – Siemens-Energietechnik 3 (1981) s.4-9.
 35. Produktschrift: Mittelspannungs-SF6 Leistungsschalter 3 bis 36 kV 3F1/Sfset.s.8. Merlin Gerin, KA-D-05/92-SFset-D.
 36. Product Catalog: MV distribution - SF6 Circuit breakers- Flusrc FG1 3 to 15 kV pp.6. Merlin Gerin-05/94.
 37. Christophe Duplay. Politics breaks in on SF6-Vacuum war. Electrical Review vol.213 No 8. 9/1983 pp. 29-31.
 38. R. Renz, D. Sdmann. Entwicklungstendenzen bei Vakuumschaltern. ETZ Bd. 112(1991) Heft 15 s. 784-790.

39. Yanabu, S.; Kaneko, E.; Okumura, H.; Aiyosbi, T.: Novel electrode structure of vacuum interrupter and its practical application. IEEE Trans. Power Appar. a. Syst. PAS-100 (1981) s. 1966.
40. Gebel, R.; Hubse, P.; Paulus, I.; Welly, J.D.: Physikalische Untersuchungen zur Entwicklung von Vakuumschaltegeräten. Siemens Energietechnik 3 (1981) S. 9.
41. H. Fink, S. Jährig. Zielsetzung und Stand der Entwicklung bei Mittelspannungsschaltegeräten. Siemens Energie & Automation 7 (1985) sonderheft „Mittelspannungstechnik“ s. 10 bis 14.
42. H. Fink. Vakuumschalter zum Einsatz in mittelspannungsnetzen. Vakuum-Technik .36 jahrgang. Heft 4. 1987. s.118-124.
43. Bettge, H.; Sinnecker, G.: Neue anforderungen und Qualitätssicherungsmethoden beim Prüfen von Vakuum-Leistungsschaltern. Siemens Energie & Automation 7 (1985) sonderheft „Mittelspannungstechnik“ s.15 bis 18.
44. Slade, P.G.; Long, R.: Medium voltage vacuum and SF6- circuit-breaker technology: a comparison, Electrical Systems Engineer (1992) pp. 72-76.
45. Slade, P.G.: Vacuum Interrupters: The New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits. IEEE Trans. On Indu. Appl.33 (1997) no.6, pp. 15011-1511.
46. A. Luxa, A. Pries.: Schalten von Motoren im Anlauf -Siemens Energie und Automation- Sonderheft Mittelspannungstechnik April 1995. S. 29-23.
47. J. Hennebert, D. Gibbs.: Behaviour of the SF6 – MV circuit breakers Fluarc for switching motor starting currents –Cahiers techniques marlin Gerin Nr. 143/p.1.
48. Reininghaus, r.; Sdmann, D.: Schalten im Vakuum – das bewährte Schaltprinzip für die Mittelspannung. etz Elektrotech.+Autom. 118 (1997) H. 12,S. 14-17.
49. Sdmann, D.: Leistungsschalter in Industrieanlagen, etz Elektrotech.+Autom. 117 (1996) H. 12, S. 38-42.
50. D. Gibbs, D. Koch, Dr. P. Malkin, K.J. Cornick: Comparison of performance of switching technologies on a CIGRE motor simulation circuit- IEEE Transactions of Power Delivery. 1989, July, vol.:4, Nr. 3

ГЛАВА 1. ДУГОВЫЕ И ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ РОССИИ

ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятым в России нормам [1], сети 6-35 кВ относятся к сетям с малыми токами замыкания на землю и должны работать или с изолированной, или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью. Опыт эксплуатации показывает, что подавляющее большинство нарушений нормальной работы этих сетей связаны с повреждением изоляции относительно земли — с однофазным замыканием на землю. В принципе, имеется возможность обеспечить надежную работу всей системы электроснабжения и не отключать потребителей в условиях сохраняющегося однофазного замыкания в течение некоторого времени, необходимого для поиска и устранения повреждения или включения резервного питания. Однако, для этого прежде всего необходимо, чтобы ток в месте повреждения был настолько мал, чтобы по возможности было обеспечено его самогашение или переход в устойчивое состояние горения дуги с малой вероятностью перехода в междуфазные повреждения. Такими допустимыми токами считаются токи не более 5 А для сетей, содержащих высоковольтные электрические машины, и не более 30, 20, 10 А для остальных сетей 6, 10, 35 кВ, соответственно [2]. Заметим, что во многих странах безопасные значения токов значительно ниже. Так, например, многолетний опыт эксплуатации сетей напряжения 4–15 кВ в Соединенных Штатах привел к требованию ограничить во всех случаях величину тока значением не более $7 \dots 10$ А [3–4]. Применение дугогасящих реакторов (ДГР) в сетях также должно гарантировать достаточно малый ток в месте повреждения.

Однако не только ограничение величины тока в месте повреждения дает гарантию локализации и дальнейшего неразвития этого повреждения. Однофазным повреждениям в сети сопутствует большое разнообразие внутренних перенапряжений, делающих небезопасным длительное существование однофазного замыкания и приводящих к пробоям изоляции в других точках сети, т. е. — к возникновению многоместных повреждений. Наиболее типичными перенапряжениями являются: дуговые, связанные с перемежающимся характером дуги; перенапряжения, вызываемые обрывом заземляющих дуг, возникающие при отключениях двойных и междуфазных к. з., при обрыве тока в ДГР; коммутационные перенапряжения, связанные с технологическими и аварийными переключениями; резонансные перенапряжения в сетях с ДГР; резонансные перенапряжения на высших гармониках; феррорезонансные явления и перенапряжения [5]. Отсутствие каких-либо мер по ограничению многообразных внутренних перенапряжений в сетях 6–35 кВ приводит к тому, что повреждаемость оборудования остается весьма высокой и для сетей с токами замыкания меньше $5 \dots 10$ А.

И, наконец, третьей стороной проблемы, призванной повысить надежную работу системы электроснабжения в условиях однофазного замыкания, должно стать требование повсеместного использования устройств релейной защиты от замыканий на землю, обеспечивающих быстрое обнаружение, сигнализацию и (или) отключение поврежденного присоединения.

Опыт эксплуатации сетей 6–35 кВ в России как с изолированной нейтралью так и с

ЧАСТЬ 2

ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ

ДГР показывает, что отсутствие тщательного контроля за величиной результирующего тока замыкания на землю (желательно до величины не большей 5...10 А с учетом раскомпенсации ДГР и активных потерь в сети, а также высших гармоник тока), отсутствие каких-либо мер ограничения перенапряжений, отсутствие селективных защит от замыканий на землю приводит к высокой аварийности работы сети и часто делает бессмысленной длительную работу с однофазным замыканием, не только не позволяющей повысить надежность работы сети, но, наоборот, увеличивающей ее аварийность.

Способ заземления нейтрали — исключительно важная проблема сетей классов напряжения 6–35 кВ. Она должна решаться индивидуально для каждой характерной электрической системы питания и потребления. Получение максимума преимуществ от выбранного способа заземления нейтрали увязывается со специфическими требованиями производственного процесса, основными из которых, как правило, являются надежность системы электроснабжения и стоимость обеспечения заданной надежности. Большое число факторов, которые должны быть учтены, тем не менее, не всегда могут быть проанализированы только с позиции стоимости. Поэтому наилучшее решение при выборе способа заземления нейтрали — одна из самых трудных задач проектирования системы электроснабжения.

1.1. ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Подавляющее большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли, с однофазным замыканием на землю. Дуговые перенапряжения существенно зависят от поведения дуги в месте пробоя. Реальная картина горения заземляющих дуг определяется большим числом факторов, главными из которых являются: величина и характер квазиустановившегося тока замыкания (емкостный, индуктивный, активный) и пробивное напряжение поврежденного места после гашения дуги. На длительность горения и условия гашения оказывают существенное влияние: переходное сопротивление в месте горения дуги; вид диэлектрика, непосредственно контактирующего с дуговым каналом; интенсивность охлаждения; давление в зоне горения дуги; возможность ее растяжения и др. Большое разнообразие локальных мест однофазных повреждений в элементах электрооборудования и условий горения заземляющих дуг, а также трудно преодолимые проблемы теоретического анализа всех влияющих факторов в условиях их статистического разброса не позволяют в настоящее время и в обозримом будущем создать какую-то определенную детерминировано-статистическую математическую модель дугового промежутка. Однако варьирование в разумных пределах таких основных влияющих факторов как: время горения заземляющей дуги, пробивное напряжение поврежденного места и переходное сопротивление дают более или менее правдивую картину явления, в целом не противоречащую большому объему накопленных экспериментальных данных.

Анализ дуговых перенапряжений в сети с различным способом заземления нейтрали можно проводить в упрощенной схеме рис. 1.1. Здесь X_c — индуктивное сопротивление прямой последовательности питающей сети; C , C_m — емкости питающих нагрузку линий относительно земли и между фазами.

Расчеты переходных процессов для этой и последующих схем замещения выполнялись с помощью программного комплекса NRAFT [6]. Программа предназначена для расчета

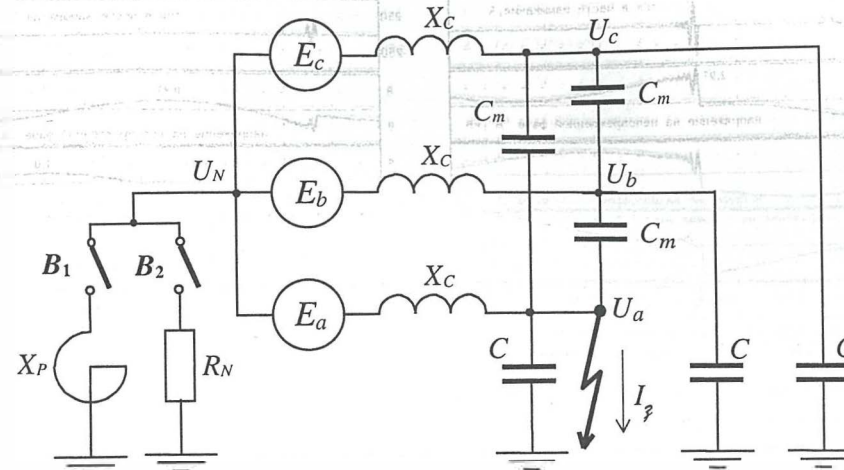


Рис. 1.1. Расчетная схема сети для анализа дуговых замыканий.

переходных процессов в произвольных схемах электрических цепей, содержащих активные сопротивления, индуктивности, емкости, источники э.д.с. и тока, выключатели, искровые промежутки, управляемые полупроводниковые вентили, нелинейные активные сопротивления, модели сложных ферромагнитных устройств. Схема магнитной цепи и электрических соединений обмоток может быть также произвольной. Исходные данные для ферромагнитных устройств (трансформатор напряжения, магнитно-вентильный управляемый реактор) задаются геометрическими размерами ферромагнитных стержней и ярм (длины и сечения) и схемой их соединения. Далее задается информация о расположении относительно магнитной цепи обмоток, их активном сопротивлении и числе витков. Любая обмотка может охватывать несколько стержней. Кроме ферромагнитных стержней обмотки могут охватывать изоляционные промежутки, которые моделируются условными “воздушными” стержнями. Их геометрические размеры определяются по размерам обмоток и магнитопровода, а магнитная проницаемость пространства, занимаемого обмотками или изоляцией, принимается равной проницаемости в воздухе. Наличие таких “воздушных” стержней позволяет довольно точно учитывать собственные и взаимные динамические индуктивности обмоток в условиях насыщения участков магнитопровода, так как в этом случае поток рассеяния изменяется в зависимости от магнитного состояния стержней. Такая методика учета нелинейных ферромагнитных элементов электрической сети имеет преимущество даже в том случае, когда кривая намагничивания (чаще — зависимость приложенного напряжения к ферромагнитной катушке от тока) получена экспериментально, так как в последнем случае она определяется при гармонической форме приложенного напряжения, а используется в расчетах, когда напряжение может иметь произвольную форму.

Пример расчета процесса возникновения перенапряжений при перемежающейся дуге, рассчитанный с помощью программного комплекса NRAFT, приведен на рис. 1.2,а (расчетная схема сети — рис. 1.1), где показаны: момент первого замыкания на землю на максимуме фазного напряжения, самогашение заземляющей дуги в месте повреждения и

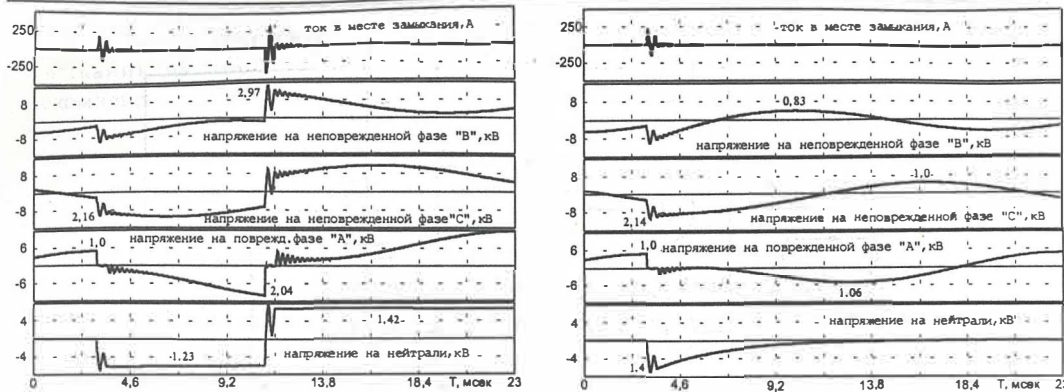


Рис. 1.2. Дуговое замыкание в сети 6 кВ с емкостным током замыкания 5 А:
 а) с изолированной нейтралью;
 б) с высокоомным заземлением нейтрали через резистор 700 Ом.

повторный пробой в поврежденной фазе, возникший уже при большем пробивном напряжении $U_{пр} = 2,04$ (в качестве базисного напряжения принята амплитуда фазного номинального напряжения сети $U_{фн} = U_{с} = 6 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$). Как видно из рисунка, максимальные перенапряжения на неповрежденных фазах после первого и второго пробоя составляют 2,16 и 2,97 соответственно.

Величина максимальных перенапряжений, которые могут возникать каждый полупериод промышленной частоты (при каждом очередном зажигании дуги), зависит от пробивного напряжения ослабленного места, которое, в свою очередь, зависит от прочности промежутка и длительности горения дуги. Замыкание и гашение дуги приводят к появлению напряжения смещения нейтрали, меняющего свою полярность при замыкании в каждый полупериод (в данном расчете напряжение на нейтрали равно -1,23 и +1,42).

Теоретические исследования и опыт эксплуатации показывают, что уменьшить величину дуговых перенапряжений и число замыканий на землю без значительного искусственного увеличения тока замыкания на землю, сохранив тем самым возможность работы сети без автоматического отключения однофазных повреждений, можно за счет включения в нейтраль сети высокоомного резистора (рис. 1.1, ключ B_2 замкнут).

Высокоомный резистор R_N в нейтрали системы (как правило, в нейтрали специального вспомогательного трансформатора мощностью не менее $S = U_{ном}^2 / (3 \cdot R_N)$) обеспечивает стекание заряда нулевой последовательности за время T между ближайшими замыканиями (при $U_{пр} > U_{ф. max}$), составляющее полупериод промышленной частоты ($T = 0,01$ сек). Таким образом, имея выражение для постоянной времени $T = R_N \cdot 3C$ и полагая практически полное стекание заряда за время $t = 3T = 0,03$ сек, получаем выражение для сопротивления

$$R_N = 0,01 / (9 \cdot C) \quad R_N = \frac{T}{3C} = \frac{0,01}{9C}$$

или

$$R_N = 1 / (900 \cdot C) \quad T = \frac{0,01}{3} \quad (1.1)$$

Резистор, выбранный из этого условия, создает в месте повреждения активную составляющую тока, равную емкостной. Действительно, емкостный ток замыкания равен: $I_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{ф}$, а ток резистора — $I_{R_N} = U_{ф} / R_N$. Из условия получаем:

$$R_N = U_{ф} / I_C = 1 / (3 \cdot \omega \cdot C) \approx 1 / (900 \cdot C)$$

что совпадает с (1.1).

При чисто емкостной цепи замыкания на землю резистор, выбранный таким образом, увеличивает ток замыкания в $\sqrt{2}$ раз.

На рис. 1.2,б показан процесс возникновения однофазного замыкания в сети с высокоомным резистором в нейтрали $R_N = 700$ Ом (на рис. 1.1 ключ B_2 замкнут). Из рис. 1.2,б видно, что первичное замыкание, сопровождающееся перенапряжением, примерно такой же кратности (2,14) было единственным (при $U_{пр} > 1$), так как при такой величине резистора обеспечивается практически полное стекание заряда нулевой последовательности (равенство нулю напряжения на нейтрали) за время от момента самогашения дуги до момента возникновения максимального напряжения на поврежденной фазе, которое становится близким к фазному (в данном расчете 1,06). Даже в том случае, если пробивное напряжение ослабленного места станет меньше амплитуды фазного напряжения ($U_{пр} < 1$), и может установиться процесс многократных зажиганий и гашений дуги, кратность дуговых перенапряжений не превысит таковую при первом зажигании, то есть 2,0...2,2.

Важной особенностью применения высокоомного резистивного заземления нейтрали является то, что при снижении емкости сети постоянная времени стекания заряда нулевой последовательности через выбранный резистор уменьшится, и, следовательно, стекание заряда будет происходить еще быстрее.

1.2. ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНОГО ТОКА

В сетях с большими емкостными токами замыкания на землю в случаях, регламентированных ПТЭ [2], должны устанавливаться дугогасящие реакторы. При резонансной настройке дугогасящего реактора мы получаем ряд благоприятных условий протекания процессов при однофазных замыканиях: минимальный ток промышленной частоты в месте повреждения, минимальная скорость восстановления напряжения после

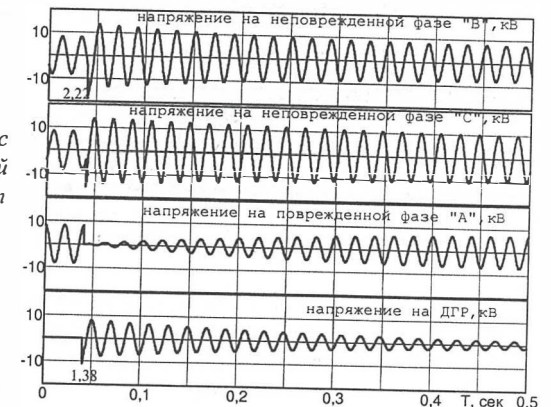


Рис. 1.3. Однофазное замыкание в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР. Емкостный ток замыкания на землю 75,6 А. Коэффициент компенсации емкостного тока равен:

$$K = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot L_D \cdot C} \cdot 100\% = 100\%$$

гашения дуги, минимальный уровень дуговых перенапряжений. Пример такого процесса, полученный с помощью программы NRAFT, показан на рис. 1.3. Видно, что в отличие от системы с изолированной нейтралью, однократное замыкание с самогашением дуги вызывает колебательный затухающий процесс изменения напряжения на нейтрали. Частота этого процесса тем ближе к промышленной, чем ближе коэффициент компенсации к единице.

В реальных условиях изменяющейся емкости сети, недостаточных мощностей дугогасящих реакторов и отсутствия систем автоматической настройки компенсации обеспечить режим благоприятной во многих отношениях резонансной настройки оказывается невозможным (тем более, что согласно ПТЭ, допускается работа с перекомпенсацией и временно — с недокомпенсацией).

Однако расстройка полной компенсации нежелательна не только из-за увеличения в месте замыкания составляющей тока промышленной частоты, но она также крайне ухудшает картину возникающих при этом перенапряжений. Так на рис. 1.4,а,б показан процесс однократного замыкания и последующего гашения заземляющей дуги в условиях недокомпенсации (рис. 1.4,а) и перекомпенсации (рис. 1.4,б). Здесь в отличие от случая полной компенсации ликвидация дугового замыкания сопровождается процессом биения (наложением на установившееся напряжение промышленной частоты свободной составляющей близкой частоты), при котором напряжение на поврежденных фазах достигает существенно больших значений (в примерах рис. 1.4,а,б — кратности перенапряжений на поврежденной фазе, достигаемые в процессе биений, составляют 1,67...1,85, на неповрежденной — 1,55...1,65). При этом становится возможным режим многократных пробоев ослабленного места при высоких значениях пробивного напряжения. Так на рис. 1.5 можно видеть такой процесс при $U_{пр} = 1,73$, когда на здоровых фазах возможны высокие кратности дуговых перенапряжений — 2,6...2,77. Напомним, что при резонансной настройке многократные пробои могут иметь место только при $U_{пр} < 1$.

Снижение перенапряжений в сети при относительно небольшой расстройке дугогасящего реактора (а также при несимметричных режимах, сопровождающихся

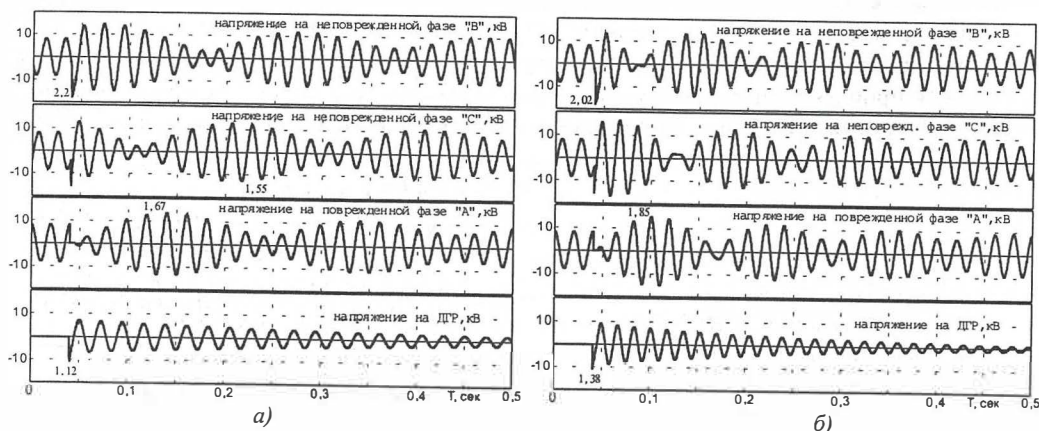


Рис. 1.4. Однофазное замыкание в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР.

Емкостный ток замыкания на землю 75,6 А:

а) коэффициент компенсации емкостного тока равен $K=75\%$ (недокомпенсация);

б) $K=125\%$ (перекомпенсация).

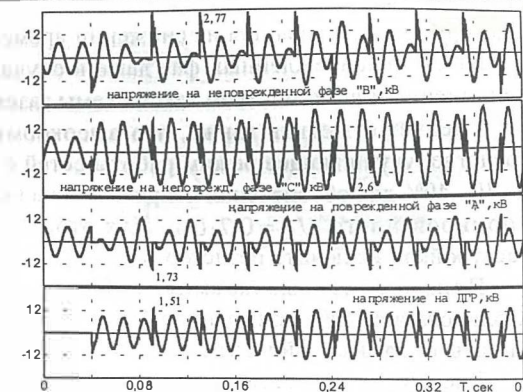


Рис. 1.5. Многократные замыкания в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР. Емкостный ток замыкания на землю 75,6 А. Коэффициент компенсации емкостного тока равен $K=125\%$ (перекомпенсация).

резонансными перенапряжениями) может быть достигнуто путем применения высокоомного резистора, включенного параллельно ДГР (рис. 1.1, выключатели V_1 и V_2 включены).

Выбор резистора с помощью соотношения

$$R_N = U_{\phi} / \Delta I_{\Sigma} \quad (1.2)$$

относительно тока расстройки $\Delta I_{\Sigma} = |I_P - I_C| < 5 \dots 10$ А приводит к прекращению биений напряжений на фазах после погасания дуги и, как следствие, к прекращению пробоев в поврежденной фазе при пробивном напряжении ослабленного места больше фазного ($U_{пр} > U_{\phi, \max}$). Максимальная кратность перенапряжений здесь определяется первым замыканием и не превышает $U_{\max} = (2,2 \dots 2,4) U_{\phi, \max}$ (рис. 1.6). Применение высокоомного резистора в случае резонансной настройки приводит к некоторому увеличению числа повторных зажигания, но только для $U_{пр} < U_{\phi, \max}$, а кратность перенапряжений здесь не превосходит таковую для идеальной настройки реактора. Высокоомный резистор весьма

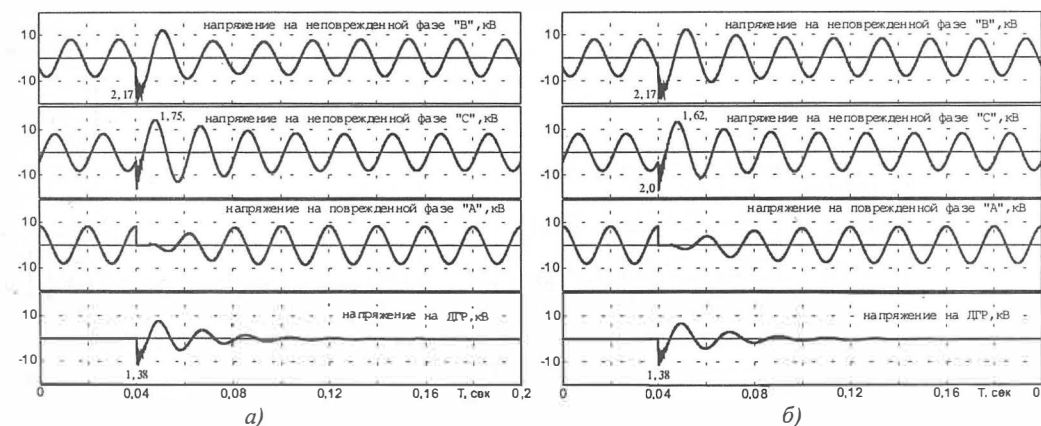


Рис. 1.6. Однофазное замыкание в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР и $R_N = 760$ Ом, выбранный по $\Delta I_{\Sigma} = 7,5$ А при $K=125\%$, когда емкостный ток замыкания на землю 30 А:

а) $K=125\%$; б) $K=100\%$.

благоприятно сказывается на снижении времени воздействия повышенных напряжений на изоляцию неповрежденных фаз даже в случае резонансной настройки ДГР, что является несомненным достоинством такой схемы заземления нейтрали (срав. рис. 1.3 и 1.6,б).

Следует отметить также, что высокоомный резистор может быть применен и как средство, улучшающее режим работы сетей с трудно устранимой несимметрией емкостей до 30...40% для обеспечения напряжения на нейтрали в несимметричных режимах не выше нормированного $U_N = 0,7 \cdot U_{\phi}$. Для этого достаточно параллельно реактору с любой расстройкой включить резистор $(6...8)R_N$, выбранный по условию (1.1).

Применение высокоомного резистора упрощает (по сравнению с сетями с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью) выполнение селективной релейной защиты от замыканий на землю.

Эксплуатация сетей без плавной автоматической компенсации тока замыкания на землю выявляет целый ряд проблем, многие из которых приводят к отсутствию самогашения дуги в месте повреждения, к значительным перенапряжениям в сети и к серьезным авариям в энергосистемах.

В качестве современного эффективного средства компенсации емкостного тока замыкания на землю можно предложить магнитно-вентильный дугогасящий реактор типа РУОМ с плавным регулированием тока компенсации реактора и его автоматической настройкой [7].

Этот дугогасящий реактор представляет собой статическое электромагнитное устройство трансформаторного типа, плавное регулирование рабочего тока которого осуществляется за счет подмагничивания участков магнитопровода постоянным током. В РУОМ применена совмещенная обмотка постоянно-переменного тока, имеющая выводы, к которым подключен тиристорный преобразователь, предназначенный для преобразования переменного напряжения в регулируемое постоянное, которое используется для подмагничивания (рис. 1.7). Глубина плавного регулирования реактора от холостого хода до номинального режима — не менее 30...40. Автоматически управляемый РУОМ имеет

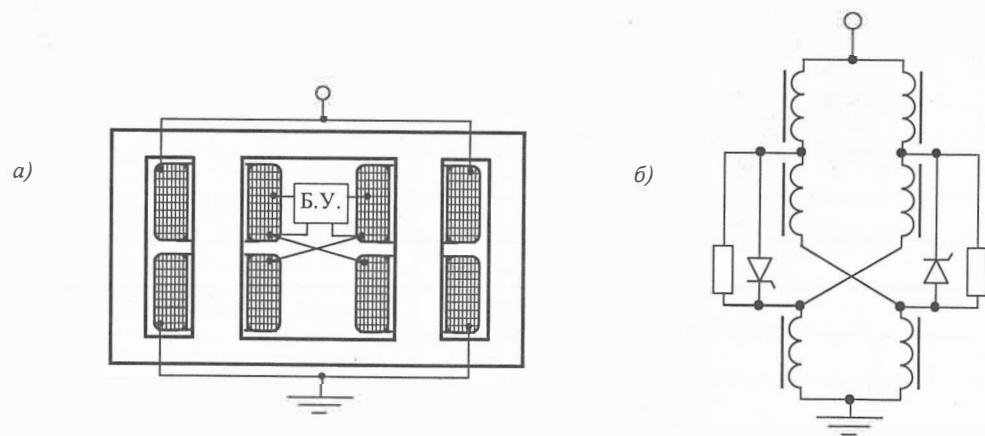


Рис. 1.7. а) Схематическое изображение обмоток и магнитопровода магнитно-вентильного дугогасящего реактора.
б) Электрическая схема замещения РУОМ.

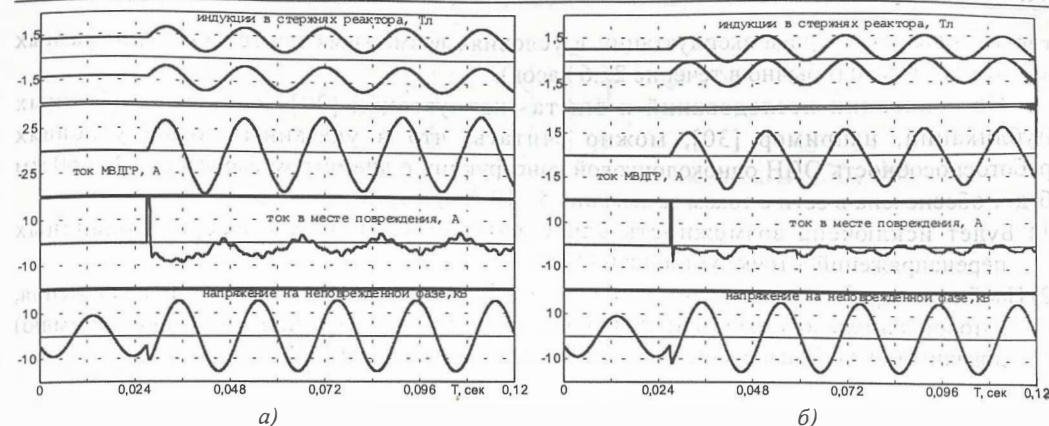


Рис. 1.8. Режим замыкания на землю в сети 10 кВ, когда в качестве дугогасящего реактора используется магнитно-вентильный реактор с $S_{\text{ном}} = 190$ кВА ($I_{\text{ном}} = 30$ А). Параметры сети:

а) емкость — $C_{\Sigma} = 5$ мкФ; емкостный ток замыкания (без компенсации) — 27,2 А;

б) емкость — $C_{\Sigma} = 2$ мкФ; емкостный ток замыкания (без компенсации) — 11 А.

систему измерения емкости сети и установления требуемого тока компенсации с погрешностью не более 2% от номинального значения. Максимальное искажение рабочего тока высшими гармониками составляет не более 2...3 А.

Управление реактором осуществляется системой автоматической настройки (путем измерения емкости сети), которая определяет ожидаемое значение тока замыкания на землю и вырабатывает сигнал для управления вентилями, который блокируется до появления замыкания. Таким образом, РУОМ при отсутствии замыкания на землю работает в режиме холостого хода, и тем самым исключается возможность опасного смещения нейтрали из-за несимметрии сети. Как видно, такая реализация системы управления позволяет исключить из числа необходимых специальные работы по дополнительному симметрированию параметров воздушных линий.

При возникновении однофазного замыкания РУОМ автоматически и практически мгновенно выходит на режим, близкий к резонансной настройке, компенсируя емкостный ток замыкания на землю (рис. 1.8).

Расчетные осциллограммы работы такого реактора в сети 10 кВ, полученные с помощью программного комплекса NРАST при тщательном моделировании магнитных и электрических цепей самого реактора и сети показаны на рис. 1.8. Здесь приведены: ток в месте повреждения, индукции в стержнях реактора и ток в его сетевой обмотке для случаев, когда емкостный ток замыкания близок к номинальному току реактора РУОМ-190 (30 А) — рис. 1.8,а, и когда он имеет величину 11 А — рис. 1.8,б. Видно, что вне зависимости от величины емкостного тока сети выход на режим, близкий к резонансному, осуществляется практически мгновенно, а остаточный ток в месте повреждения достаточно мал.

1.3. ОГРАНИЧЕНИЕ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОПН

Выбор ОПН в сетях 6(10) кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, где не предусмотрено отключение релейной защитой однофазных повреждений, сводится в основном к обеспечению его работоспособности в течение

гарантированного срока эксплуатации в условиях возможных длительных однофазных замыканий в сети (обычно в течение 2...6 часов).

На основании исследований и опыта эксплуатации [29], а также зарубежных публикаций, например [30], можно считать, что в указанных выше условиях работоспособность ОПН одноколонковой конструкции с диаметром варисторов 45...60 мм будет обеспечена в сети с током замыкания 5...10 А при трех условиях.

- 1) Будет исключена возможность длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений в точке установки ОПН.
- 2) Наибольшее рабочее напряжение сети $U_{нб.раб}$ (действующее значение линейного напряжения, которое длительно может быть приложено к ОПН при однофазном замыкании на землю) должно быть не больше длительно допустимого напряжения ОПН ($U_{ОПН}$), то есть

$$U_{нб.раб} \leq U_{ОПН}.$$

Заметим, что, как правило, в сетях 6(10) кВ напряжение $U_{нб.раб}$ может превышать номинальное напряжение сети $U_{ном}$ ($U_{нб.раб} = (1,05...1,2) \cdot U_{ном}$).

- 3) Пропускная способность ОПН должна быть не менее 20 импульсов тока на волне 1,2/2,5 мс с амплитудой $I_{ост} = 300...500$ А. При этом остающееся напряжение на ОПН $U_{ост}$ при волнах коммутационных перенапряжений составит величину

$$U_{ост} \approx (2,7...3,0) \cdot U_{ф.макс}.$$

При установке ОПН в сетях с большим емкостным током число комплектов ОПН (которые могут быть размещены в разных точках сети) должно быть увеличено.

В этом случае желательно, чтобы изготовитель учитывал необходимость параллельной работы отдельных комплектов ОПН при однофазных замыканиях.

Определить, достаточна ли известная от завода-изготовителя пропускная способность ОПН, полученная в результате специальных испытаний, для надежной работы ОПН в конкретной точке сети можно либо экспериментально, либо расчетным путем. Как уже указывалось, основным воздействием на варисторы ОПН (правильно выбранного на

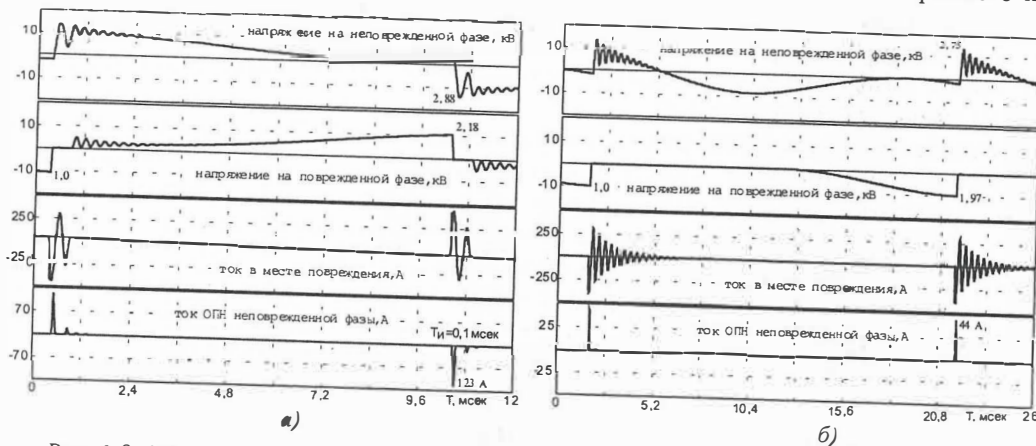


Рис. 1.9. Многократные замыкания в сети 6 кВ с изолированной нейтралью и ОПН. Емкостный ток замыкания 5 А. Параметры ОПН: $U_{ост} = 14,6$ кВ; $I_{ост} = 300$ А. Время горения дуги $t_d = 0,5$ мс (а); $t_d = 5$ мс (б).

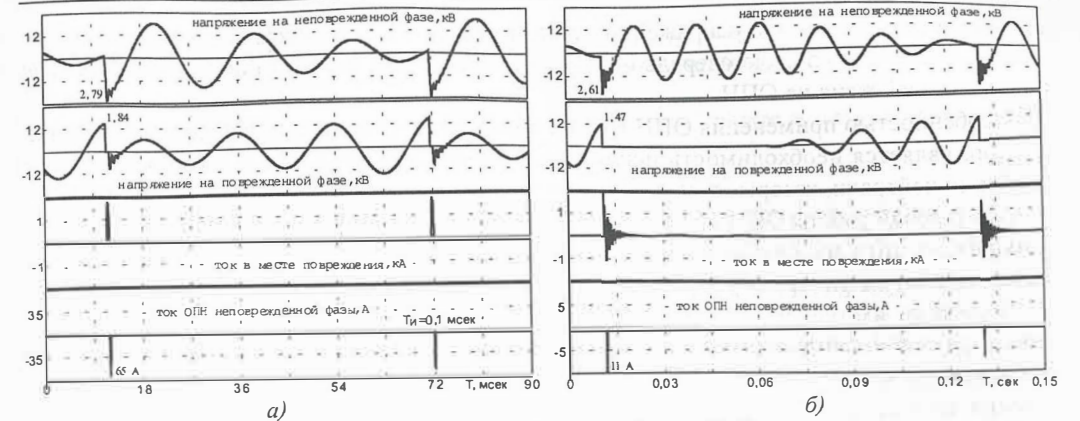


Рис. 1.10. Многократные замыкания в сети 10 кВ с ДГР и ОПН. Емкостный ток замыкания 75,6 А. Коэффициент компенсации равен $K=1,2$. Параметры ОПН: $U_{ост} = 24,3$ кВ; $I_{ост} = 300$ А. Время горения дуги $t_d = 0,5$ мс (а); $t_d = 50$ мс (б).

основании выше приведенных условий) являются импульсы токов, возникающих в режиме перемежающихся дуг однофазных замыканий. Так, например, на рис. 1.9,а показан процесс перемежающихся дуг однофазных замыканий в сети с изолированной нейтралью и ОПН при возможном высоком значении пробивного напряжения ослабленного места $U_{пр} = 2,18$. Этот режим устанавливается при времени гашения дуги $\sim 0,5$ мс и ее регулярном самогашении. Как видно из расчетной осциллограммы в одной из фаз ОПН с регулярностью 10 мс возникают импульсы тока длительностью $\sim 0,1$ мс и амплитудой ~ 120 А. При увеличении времени горения заземляющей дуги до 5 мс (рис. 1.9,б) наибольшее значение пробивного напряжения ослабленного места снижается (здесь $U_{пр} = 1,97$), (естественно, снижается кратность неограниченных с помощью ОПН дуговых перенапряжений) и снижается величина импульса тока в ОПН (здесь он равен 44 А).

Другим важным фактором, влияющим на рассеиваемую энергию в варисторах ОПН, кроме длительности горения дуги и пробивного напряжения является мощность питающей сети (трансформатора) и величина емкости сети, увеличение которой при прочих равных условиях увеличивает длительность протекания импульсов токов через ОПН (а, следовательно, и энергии в ОПН).

Как видно из примеров, существенного ограничения дуговых перенапряжений с помощью ОПН с уровнем ограничения 2,7...2,8 не происходит. Импульсы токов в ОПН ни по длительности, ни по величине, ни по энергии не превосходят энергии, рассеиваемой в ОПН в процессе испытаний, но только в том случае, если в результате многократных поглощений энергии в процессе длительного режима перемежающейся дуги не будет нарушен тепловой баланс в ОПН.

Возможность надежной работы ОПН в длительных режимах перемежающихся дуг может быть подтверждена только экспериментально, и такие данные имеются.

Высокоомное заземление нейтрали оказывает существенное влияние на снижение рассеиваемой энергии в варисторах ОПН в основном за счет уменьшения числа повторных зажигания заземляющих дуг в сети. Как уже было показано выше, повторные зажигания при пробивном напряжении выше фазного становятся невозможными, а многократные

зажигания при пробивном напряжении ниже фазного — не приводят к перенапряжениям выше 2,2...2,4, а это в свою очередь практически исключает сколько-нибудь значительные токовые воздействия на ОПН.

Особенностью применения ОПН в сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, является необходимость исключить резонансные повышения напряжения из-за смещения нейтрали, которые в случае их появления немедленно выведут из строя ОПН.

Для условий работы ОПН в этих сетях при многократных дуговых замыканиях характерна меньшая частота их срабатывания, зависящая от степени расстройки компенсации, составляющая, например, на рис. 1.10 от 3 до 6 периодов промышленной частоты.

Величина импульсов токов в ОПН также зависит от кратности неограниченных перенапряжений, которые растут с увеличением пробивного напряжения и, как правило, — с уменьшением времени горения заземляющей дуги. Длительность импульса тока ОПН зависит от частоты свободных колебаний в сети и при прочих равных условиях увеличивается с ростом емкости сети (с ростом емкостного тока замыкания).

Как и в предыдущем случае, введение резистора, параллельного дугогасящему реактору, снижает число замыканий в сети, их частоту и кратность дуговых перенапряжений, что существенно увеличивает срок службы ОПН.

1.4. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

В процессе эксплуатации электрических сетей возможно образование таких схем, когда оказываются включенными последовательно емкости и нелинейные индуктивности. Как правило, такие схемы возникают в неполнофазных и несимметричных режимах. При определенных соотношениях между параметрами элементов этого контура возможно возникновение и длительное существование феррорезонансных перенапряжений высокой кратности, часто сопровождающихся сверхтоками в обмотках трансформатора.

Пример такой схемы приведен на рис. 1.11, где видно, что обмотка фазы "b" трансформатора с одной стороны включена последовательно с емкостью C_2 на землю, с другой — к нейтрали трансформатора, где из-за его неполнофазного включения появляется

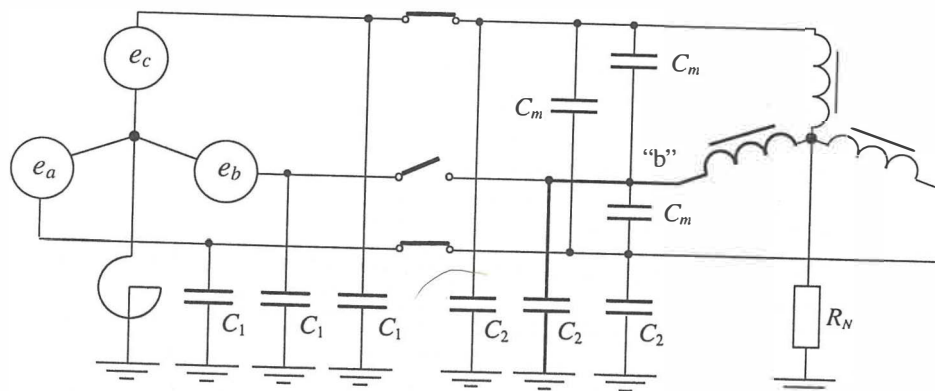


Рис. 1.11. Схема замещения трехфазной сети при включении двумя фазами трансформатора на холостом ходу.

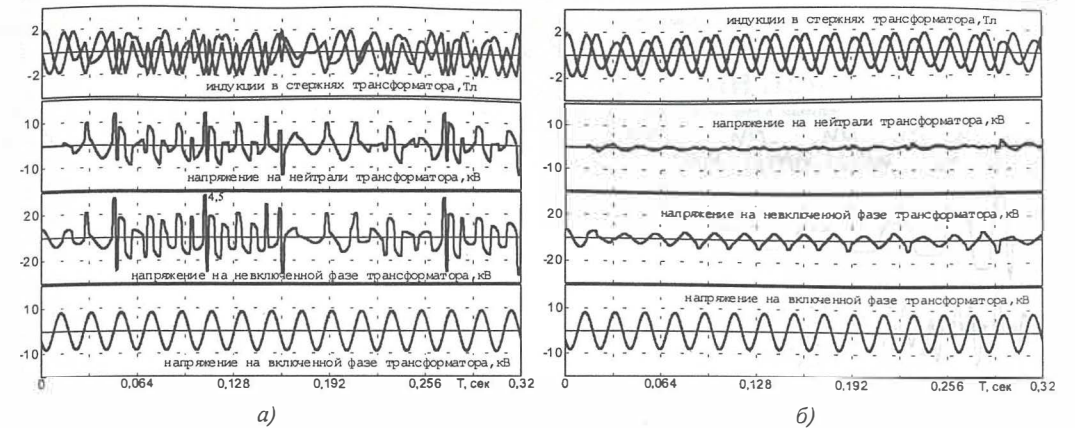


Рис. 1.12. Феррорезонансные перенапряжения при неполнофазном подключении ненагруженного трансформатора напряжением 10 кВ; мощностью 1000 кВА; $I_{xx} = 1,6\%$; $u_x = 5,5\%$ и емкостью кабельного присоединения трансформатора — 0,1 мкФ. Трансформатор с изолированной нейтралью (а); с нейтралью, заземленной через резистор 4000 Ом (б).

напряжение, что и образует последовательный потенциально опасный для развития феррорезонансных перенапряжений контур. Величина емкости C_2 имеет существенное значение при определении возможности возникновения феррорезонанса: в данном случае она должна быть такой, чтобы емкостный ток был по крайней мере одного порядка с током холостого хода трансформатора. Меньшую роль играют: емкость C_1 (слева от выключателя) и мощность питающей системы.

Пример расчета переходного процесса возникновения феррорезонансных перенапряжений, рассчитанного для схемы рис. 1.11 и связанного с разрывом одной из фаз ненагруженного трансформатора, приведен на рис. 1.12,а. Схема типична для городской разветвленной кабельной сети (представленной на рис. 1.11 емкостью C_1), где имеется возможность неполнофазного подключения отдельных присоединений с емкостью C_2 и малонагруженным трансформатором.

Как видно из рис. 1.12,а, переходный процесс размыкания одной фазы трансформатора (например, при перегорании плавкой вставки предохранителя) вызывает длительно существующие перенапряжения высокой кратности (в примере 4,5 о.е.). Наличие однофазного замыкания в сети не имеет принципиального значения: феррорезонансные перенапряжения возникают и в том, и в другом случаях. В качестве эффективного мероприятия по подавлению этих перенапряжений (рис. 1.12,б) может служить высокоомный резистор, включенный в нейтраль трансформатора со стороны обмотки ВН (естественно, в том случае, если схема соединения обмоток ВН — звезда с выведенной нейтралью). Заметим, что при моделировании магнитной системы трансформатора здесь необходимо учитывать возможность замыкания магнитного потока нулевой последовательности вне магнитопровода трансформатора, что выполнено с помощью "воздушных" стержней, включенных параллельно ферромагнитным стержням трансформатора.

Эквивалентирование подобных трехфазных схем к более простым с целью проведения упрощенных аналитических расчетов, в частности, содержащим одну нелинейную индуктивность с последующим анализом установившегося режима, дает тем более грубое

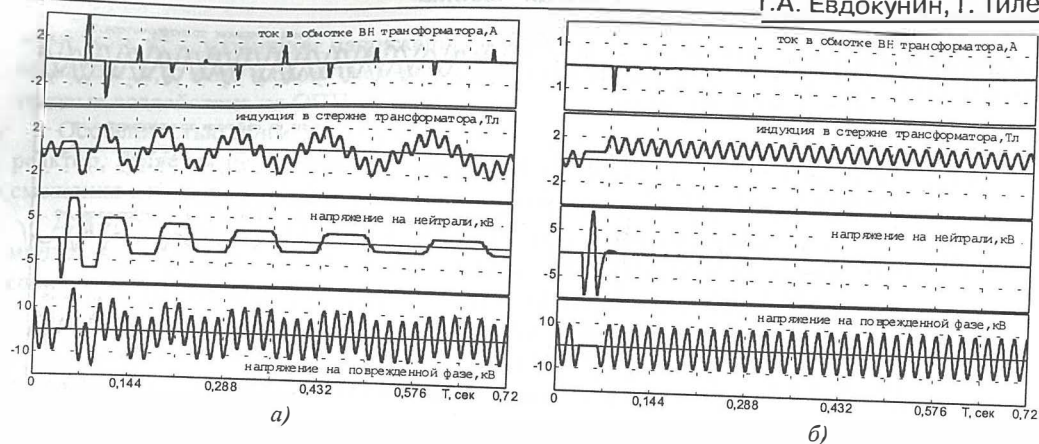


Рис. 1.13. Однофазное замыкание в сети 10 кВ при наличии измерительного трансформатора напряжения. Емкостный ток замыкания в сети 5 А. Сеть с изолированной нейтралью (а); сеть с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор 1200 Ом (б).

приближение к действительным процессам, чем больше степень насыщения. Но даже в этом случае какой-либо аналитический анализ переходных процессов практически исключен. Поэтому единственным достоверным способом расчетов феррорезонансных явлений в трехфазных сетях остается прямой расчет переходного процесса с помощью компьютерных программ.

Феррорезонансные явления в сетях 6–10 кВ опасны не только из-за возможности возникновения значительных перенапряжений, но часто приводят к повреждению трансформаторов из-за длительного протекания по их обмоткам токов, существенно превышающих номинальные. Обычно эта проблема актуальна для маломощных измерительных трансформаторов и трансформаторов контроля изоляции. Наиболее часто такие свертки сопровождают процессы возникновения и ликвидации однофазных замыканий на землю, при отсутствии продольной несимметрии в сети. Так на рис. 1.13,а показан переходный процесс в сети, возникающий после кратковременного (длительностью в несколько мсек) однофазного замыкания в сети. После самоликвидации замыкания возникает длительный переходный процесс, связанный с затуханием остаточного напряжения на нейтрали и повышенных значений индукций в стержнях, которые, в свою очередь, приводят к кратковременному насыщению стали и возникновению импульсов токов (в примере >2 А), многократно превышающих номинальные токи трансформатора. При длительно протекающих замыканиях на землю (в режиме перемежающейся дуги) повышенные токи могут привести к термическому разрушению изоляции обмотки и повреждению трансформатора. Наиболее целесообразным способом, предотвращающим подобные процессы, является высокоомное заземление нейтрали в какой-либо одной точке сети (рис. 1.13,б). Высокоомный резистор, выбранный по (1.1), оказывается достаточным для того, чтобы с рассмотренным феррорезонансным явлением можно было бы не считаться. Как уже было сказано в п. 1.3, исключение феррорезонансных перенапряжений является необходимым условием применения ОПН.

ГЛАВА 2. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И ОТКЛЮЧЕНИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Обширные данные по величинам перенапряжений, связанных с коммутацией отключения высоковольтных электродвигателей, систематизированы в [8] на основании многочисленных зарубежных публикаций. Здесь приведены результаты натурных испытаний для электродвигателей напряжением 6 кВ и мощностью от 110 до 520 кВт при различной длине питающих кабелей (от десятков до сотен метров). Коммутации осуществлялись маломасляными, масляными, воздушными и вакуумными выключателями. Наиболее надежными являются данные, полученные для маломасляных выключателей, т.к. общее число испытаний составило несколько сотен. Максимальные зарегистрированные кратности для этого типа выключателей при отключении пускового тока весьма велики и составляют 6...9 (относительно амплитуды фазного напряжения). Высокие кратности зафиксированы также для воздушных и масляных выключателей.

Что касается экспериментальных данных по вакуумным выключателям, то их меньше, и относятся они в основном к электродвигателям небольшой мощности (100...200 кВт). Так в [9] на основании десяти опытов по отключению пускового тока электродвигателя 110 кВт, 6 кВ (длина кабеля 100 м) был получен примерно 5-кратный уровень перенапряжений. В [10] на основании 50 испытаний при тех же параметрах схемы, что и в предыдущей публикации, было показано, что с вероятностью $\sim 0,1$ перенапряжения превысили остающееся напряжение на разряднике, защищающем электродвигатель, равное $U_{ост}=18$ кВ (ампл.). В [11] были зафиксированы перенапряжения кратностью 4...5 при отключении электродвигателя 6 кВ мощностью 736 кВт. Экспериментальных данных по коммутациям электродвигателей элегазовыми выключателями не обнаружено.

Возможность появления перенапряжений значительной кратности для электродвигателей большой мощности ($P > 1$ МВт) вследствие характерного для вакуумных выключателей механизма многократных повторных зажиганий дуги практически исключена [12, 35]. Это обстоятельство объясняется негашением тока дуги (500...600 А) в первом нуле тока при близко расположенных контактах.

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СЕТИ

2.1.1. ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Одним из источников, создающих перенапряжения в сети является выключатель. Коммутационные перенапряжения могут возникнуть как при включении, так и при его отключении даже в том случае, если выключатель работает идеально: т.е. замыкание контактов происходит мгновенно (без предпробоев), а размыкание – в нуле тока

промышленной частоты (без повторных зажигания и гашений дуги). Однако в реальных условиях работа выключателя может отличаться от идеальных, когда могут возникнуть следующие явления [12–17]:

- срез тока до его нулевого значения;
- пробой межконтактного промежутка в процессе включения и отключения;
- гашение дуги высокочастотного тока переходного процесса.

Срез тока – внезапное снижение тока к нулю до его естественного нулевого значения. Это связано с нестабильностью дуговой плазмы, высокочастотными колебаниями тока и возможностью восстановления диэлектрической прочности после прерывания тока. Все выключатели обнаруживают эти характеристики в различной степени (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные) [35, 36]. Для элегазовых выключателей характерно, что дуга становится нестабильной при относительно низкочастотном характере изменения тока, приводя в дальнейшем к срезу в течении 5...10 мкс. Вакуумные же выключатели создают нестабильную дугу при высокочастотном характере изменения тока с последующим очень быстрым его прерыванием [37].

Срез тока зависит от многих факторов, как то: величина отключаемого тока, характеристики цепи, сосредоточенная емкость параллельно выключателю, момент отделения контактов, конструкция аппарата и имеет статистическую природу [36, 38].

Особый интерес к проблеме среза тока в выключателях возник на фоне начального использования в вакуумном выключателе материала контактов на основе Cu–Bi, который давал ток среза от 8 до 12 А. С 1970 года большинство производителей вакуумных выключателей снизило ток среза вакуумных выключателей максимум до 2...5 А [16, 18, 35], а для вакуумных контакторов он еще меньше: до 1 А [36].

Для элегазовых выключателей никаких усилий по снижению тока среза не предпринималось, и для разных типов выключателей он составляет величину до 5 А [36, 39]. Экспериментальные исследования скорее всего подтверждают тот факт, что элегазовые выключатели имеют слабое преимущество в области меньших токов среза [36].

Вакуумные выключатели имеют существенно большую скорость восстановления диэлектрической прочности после прерывания тока, чем элегазовые [36]. Отмечается, что кумулятивная вероятность пробивной напряженности для вакуумных выключателей при средних частотах составляет от 15 до 80 кВ/мм, при высоких частотах – от 5 до 40 кВ/мм [16] и определяется расстоянием между контактами [35]. Работа [15] посвящена экспериментальному исследованию диэлектрической прочности межконтактных промежутков вакуумных выключателей классов 15 и 7,2 кВ (номинальные токи 1500 и 420 А) с помощью Rabus метода (или метода “пилы”), который дает возможность после отделения контактов зарегистрировать выдерживаемое напряжение при многократных ПЗ в условиях, когда прикладывается повторяющееся испытательное напряжение. Характеристики электрической прочности межконтактного промежутка получены в испытательной R–C схеме, однако менее обширные натурные эксперименты при коммутации высоковольтных электродвигателей в целом не противоречат данным [15]. На основании этих и других [16, 18] экспериментальных данных можно принять, что рост диэлектрической прочности межконтактного промежутка по мере движения контактов со скоростью 1 м/с происходит линейно со скоростью $dU_{дз}/dt = 20...60$ кВ/мсек. Разброс данных определяется статистической природой поведения дуги в вакуумной камере, влиянием схемы и параметрами сети.

Экспериментальные данные по скорости восстановления диэлектрической прочности элегазовых выключателей при отключении ими относительно малых индуктивных токов не столь обширны. Так в [39] отмечена начальная скорость $\sim 6...7$ кВ/мс. Кроме того, в отличие от вакуумного выключателя диэлектрическая прочность в элегазовом выключателе быстро не восстанавливается (например, после пробоя межконтактного промежутка) и требуется некоторое время для восстановления электрической прочности [37]. Однако наши расчеты не совсем согласуются с приведенными здесь данными и замедление процесса восстановления диэлектрической прочности не оказывает заметного влияния на процесс отключения.

Низкая диэлектрическая прочность межконтактного промежутка выключателей после гашения дуги при малом расстоянии между контактами может приводить к повторному зажиганию дуги в выключателе. Дальнейшее развитие процесса зависит от возможности гашения тока дуги, который содержит составляющие промышленной частоты, средних частот (несколько кГц) и высоких частот (несколько сотен кГц). Вакуумные выключатели обладают высокой дугогасящей способностью, позволяющей гасить дугу в первые нули высокочастотных токов (100...200 кГц). Например, в работе [14] экспериментально определена максимальная скорость подхода к нулю переходного высокочастотного тока, при котором еще возможно гашение — $di/dt \leq 100$ А/мксек. Другие работы [14, 18] дают диапазон $50 \leq di/dt \leq 100$ А/мксек.

В работе [38] использована вероятностная характеристика гашения дуги в зависимости от скорости подхода тока к нулю di/dt . Диапазон используемых скоростей был принят равным $20 < di/dt < 75$ А/мкс.

На основании многочисленных опытов показано, что гашение высокочастотных токов в элегазовых выключателях также возможно [35], однако гашение имеет место для малых скоростей $di/dt = 3...5$ А/мкс и многократные пробои маловероятны [36].

Таким образом, на основании вышеизложенного может быть предложена следующая математическая модель выключателя:

- скорость роста диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{дз}/dt$ с момента первого прерывания тока принимается постоянной;
- первое прерывание (срез) тока до его “естественного” нулевого значения считается возможным при заданном мгновенном значении тока ($i_{ср}$) через выключатель;
- при возникновении первого и последующих пробоев межконтактного промежутка считается возможным гашение высокочастотного тока при его переходе через “нуль” со скоростью di/dt не выше заданной.

Диапазон изменения параметров, характерных для вакуумного выключателя можно принять: $20 < dU_{дз}/dt < 60$ кВ/мс, $0 < i_{ср} < 5$ А, $50 < di/dt < 100$ А/мкс, для элегазовых выключателей параметры $dU_{дз}/dt$ и di/dt , скорее всего, на порядок ниже.

2.1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕТИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В большинстве расчетных коммутаций с достаточной для практики точностью может быть использована схема замещения электродвигателя в виде трехлучевой звезды э.д.с. (с изолированной нейтралью) за сверхпереходными индуктивными сопротивлениями. Для приближенного учета затухания высокочастотных составляющих напряжений и токов может быть использована (при соединении в параллель) звезда высокоомных активных сопротивлений. В редких случаях очень коротких кабелей (десятки метров), питающих

электродвигатели, требуется учет их входной емкости. Схема замещения справедлива как для асинхронных (АД) так и для синхронных (СД) электродвигателей. Внутренняя э.д.с. электродвигателей при коммутации отключения пусковых токов равна нулю для обоих типов. Величины э.д.с. и их фазовые сдвиги относительно напряжений шин в нормальных установившихся режимах, предшествующих отключению, должны быть определены из исходных заданных уровней напряжения на зажимах электродвигателя, его активной и реактивной мощностей. Величины э.д.с. и их фазовые сдвиги в процессах, сопровождающих выбег, зависят от типа электродвигателя, его привода, системы возбуждения и автоматики и определяются электромеханическим переходным процессом с учетом моделирования всех этих систем. Величина э.д.с. также может быть указана на основании экспериментального измерения напряжения на зажимах отключенного электродвигателя при его выбеге.

Для схемы замещения кабеля, питающего электродвигатель, на основании экспериментальных и многочисленных расчетных данных можно принять одну или две трехфазные "Т" — схемы замещения с параметрами прямой и нулевой последовательностей. Небольшое число звеньев, составляющих цепочную схему замещения кабеля, при высокочастотном характере процесса объясняется тем, что в реальных осциллограммах, полученных при натурных испытаниях, высокочастотные колебания практически не развиваются из-за их затухания в кабеле и электродвигателе. Естественно, в качестве математической модели кабеля можно взять решение телеграфных уравнений в виде "бегущих" волн, но тогда учет частотных зависимостей параметров будет обязателен. С большей тщательностью, чем это обычно имеет место, следует учесть поперечную проводимость кабеля, учитывая не только его емкость, но и потери в диэлектрике, причем желательно и их зависимость от частоты.

Модель питающего силового трансформатора допускается представлять в виде индуктивностей прямой и нулевой последовательностей.

Другая двигательная и иная нагрузка на сборных шинах представлена в виде сосредоточенных емкостей прямой и нулевой последовательностей питающих ее кабелей при их параллельном соединении. Здесь достаточно учесть минимальное число кабелей других присоединений, так как возможное их увеличение не дает каких-либо новых особенностей в рассматриваемых процессах.

Общая расчетная схема для анализа перенапряжений, создаваемых выключателями представлена на рис. 2.1. Здесь показана общая нагрузка (Н), из состава которой выделена нагрузка отдельного присоединения в виде питающего кабеля (К) с электродвигателем (Д), коммутируемого выключателем (В). Питание секции осуществляется от шин неизменного напряжения через питающий трансформатор (Т).

Схема замещения рассматриваемой сети представлена на рис. 2.2 в однолинейном виде. Параметры ветвей между соответствующими номерами узлов (0 - 4) задаются для прямой и

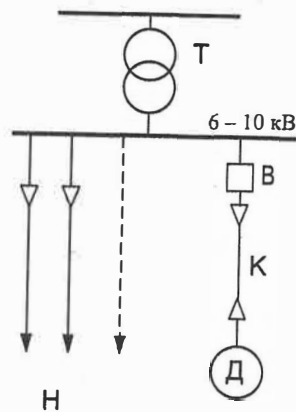


Рис.2.1. Расчетная схема сети с электродвигателем.

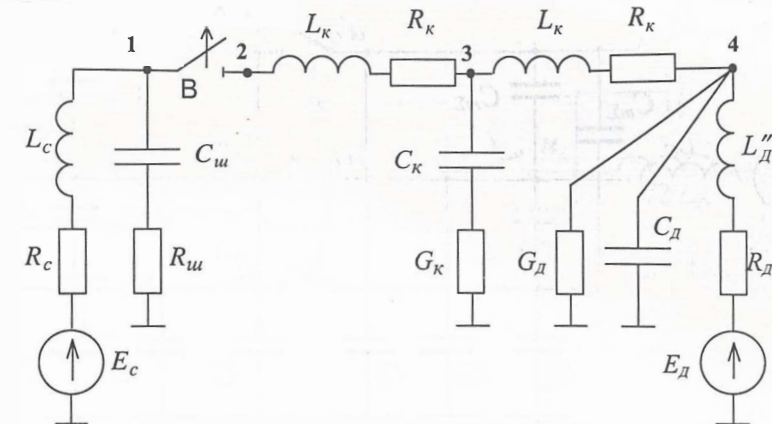


Рис.2.2. Однолинейная схема замещения сети с электродвигателем.

нулевой последовательностей. С учетом сказанного выше, ветвь E_c-1 представляет модель трансформатора; ветвь $1-0$ — модель нагрузки; ветвь $1-2$ — выключатель; R_k, L_k, C_k, G_k — элементы "Т" схемы замещения кабеля, питающего электродвигатель; ветви $E_d-4, 4-0$ — представляют модель коммутируемого электродвигателя.

2.2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИЯХ И ОТКЛЮЧЕНИЯХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИДЕАЛЬНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ

Современные схемы неблочных электрических станций имеют мощную и разветвленную сеть собственных нужд. Основным элементом этой сети (рис. 2.3) являются крупные асинхронные электродвигатели (Д) напряжением 6 кВ, питающиеся от трансформаторов собственных нужд (Т) через отдельные кабельные присоединения (К). Общее количество присоединений к данной секции достаточно велико (20...30). Схема, подобная рассматриваемой, справедлива также для питания синхронных и асинхронных электродвигателей на ряде промышленных предприятий. В процессе выполнения технических операций производятся включения и отключения отдельных присоединений с помощью выключателей (В), коммутирующих электродвигатели вместе с соответствующими питающими кабелями. Кроме того, возможны коммутации электродвигателей в процессе АВР, отключения заторможенных электродвигателей и др. Все эти коммутационные операции сопровождаются перенапряжениями различной кратности и частоты.

Рассмотрим в качестве примера физическую сущность перенапряжений, возникающих при пуске электродвигателя. На рис. 2.4 приведена упрощенная схема замещения сети. Здесь L_c — результирующая индуктивность прямой последовательности питающей сети; L_D —

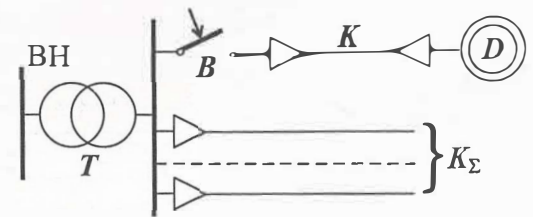


Рис.2.3. Принципиальная схема сети.

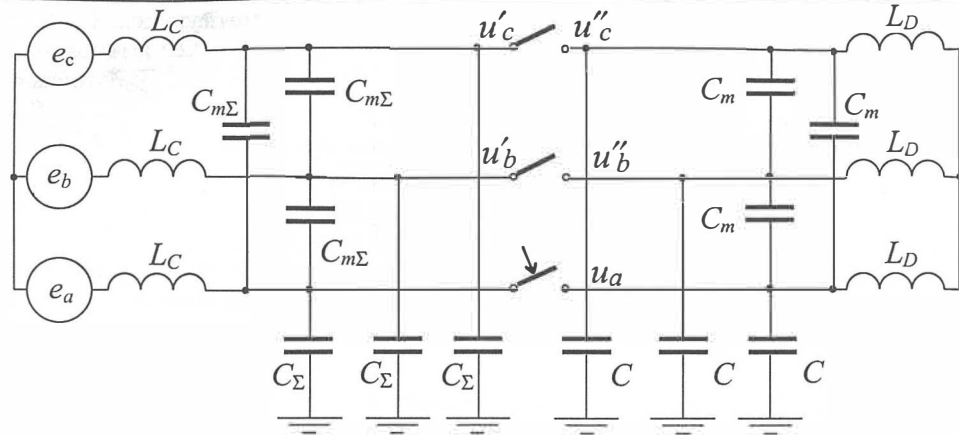


Рис. 2.4. Схема замещения сети по рис. 2.3.

сверхпереходная индуктивность электродвигателя; e_{da}, e_{db}, e_{dc} — собственные э.д.с. электродвигателя; $C, C_\Sigma, C_m, C_{m\Sigma}$ — емкости на землю и между фазами коммутируемого присоединения (C, C_m) и всех остальных кабелей данной секции ($C_\Sigma, C_{m\Sigma}$). Нагрузка на других присоединениях, индуктивность кабелей и активные сопротивления сети не учитываются. Мощность отдельного электродвигателя много меньше мощности трансформатора, поэтому дополнительно можно пренебречь индуктивностью $L_c \ll L_D$.

Рассмотрим включение первой фазы (фазы "а", см. рис. 2.4). Трехфазная сеть слева от выключателя при учете сформулированных допущений может быть эквивалентирована к простому виду при отбрасывании междуфазных емкостей $C_{m\Sigma}$, как включенных на шины неизменных междуфазных э.д.с. e_{ac}, e_{bc}, e_{ca} , и параллельным преобразованием ветвей, содержащих э.д.с. и емкости (рис. 2.5), по формулам:

$$e_3^{(1)} = (e_c \cdot C_\Sigma + e_b \cdot C_\Sigma) / (2 \cdot C_\Sigma) = -0,5 \cdot e_a, \quad (\text{см. рис. 2.5a, б})$$

$$e_3^{(2)} = (1,5 e_a \cdot 2 C_\Sigma) / (2 C_\Sigma + C_\Sigma) = e_a, \quad (\text{см. рис. 2.5, в})$$

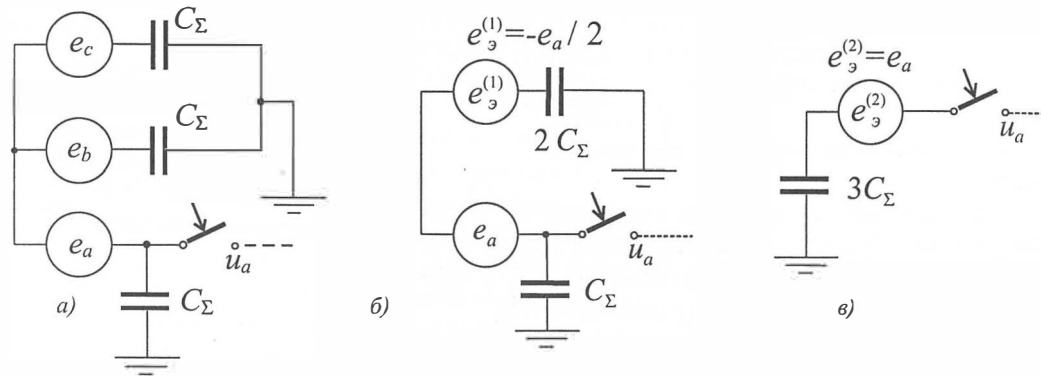


Рис. 2.5. Эквивалентные преобразования схемы замещения по рис. 2.4 (слева от выключателей).

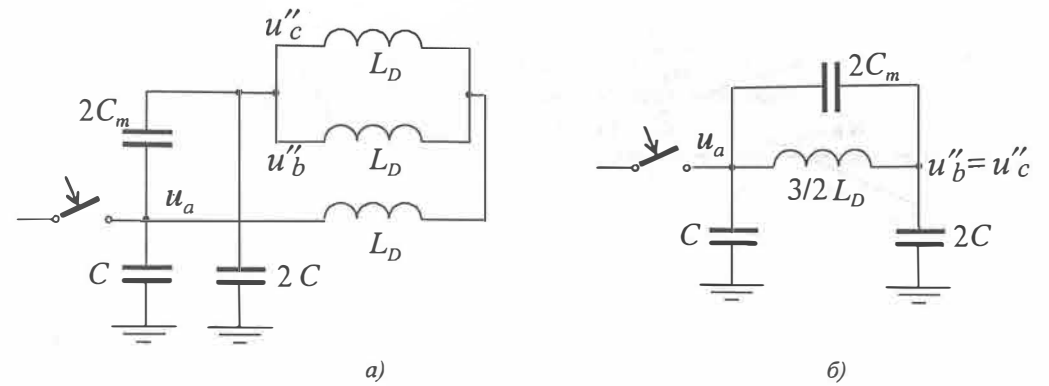


Рис. 2.6. Эквивалентные преобразования схемы замещения по рис. 2.4 (справа от выключателей).

Правая часть (относительно выключателя) трехфазной схемы также может быть преобразована к однофазному эквиваленту, т. к. $u''_b = u''_c$, что следует из схемы (см. рис. 2.4) при одинаковых собственных и взаимных параметрах фаз. Тогда емкости фаз "b" и "c" на землю соединяются параллельно, междуфазная емкость (этих фаз) отбрасывается, и схема преобразуется к виду рис. 2.6,а, а затем — рис. 2.6,б. Таким образом, объединив схемы (см. рис. 2.5,в и рис. 2.6,б) и учитывая, что $C_\Sigma \gg C$ (т. к. по предположению секция имеет большое число кабельных присоединений, кроме коммутируемого), получим расчетную схему рис. 2.7. Используя теорему об эквивалентном генераторе, можем преобразовать схему к колебательному контуру, содержащему последовательно индуктивность и емкость. Однако можно определить искомые напряжения на фазах электродвигателя проще, заметив, что в момент включения контура (см. рис. 2.7, $t=0$) величина тока в индуктивности $3/2 L_D$ равна нулю, следовательно, мгновенное значение включаемой э.д.с. e_a распределяется обратно пропорционально емкостям $2C_m$ и $2C$:

$$u''_b(t=0) = u''_c(t=0) = e_a(t=0) C_m / (C_m + C) = u_{нач}$$

Таким образом, для получения переходного процесса изменения напряжений на невключенных фазах $u''_b(t)$ и $u''_c(t)$ можно рассмотреть включение обычного колебательного контура с ненулевыми начальными условиями по напряжению на емкостях. Угловая частота переходного процесса $\beta = 1 / \sqrt{1,5 L_D \cdot 2(C + C_m)}$. Учитывая, что при реальных соотношениях параметров $\beta \gg \omega_0$ (ω_0 — частота источников э.д.с.), для определения напряжений на невключенных фазах можно воспользоваться формулой:

$$u''_b(t) = e(t=0) - [e(t=0) - u_{нач}] \cdot \cos(\beta t).$$

Наибольшее значение напряжения будет при включении электродвигателя в момент максимума э.д.с. $e_a(t=0) = E_m$; $u''_{bmax} = 2E_m - 0,2E_m = 1,8E_m$, где $C_m / (C + C_m) = 0,2$; $u_{нач} = 0,2E_m$.

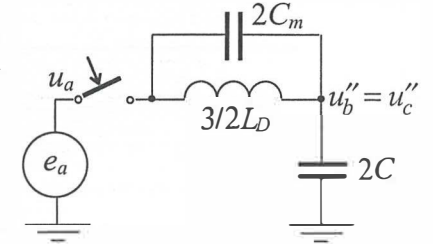


Рис. 2.7. Полная эквивалентная схема замещения по рис. 2.4.

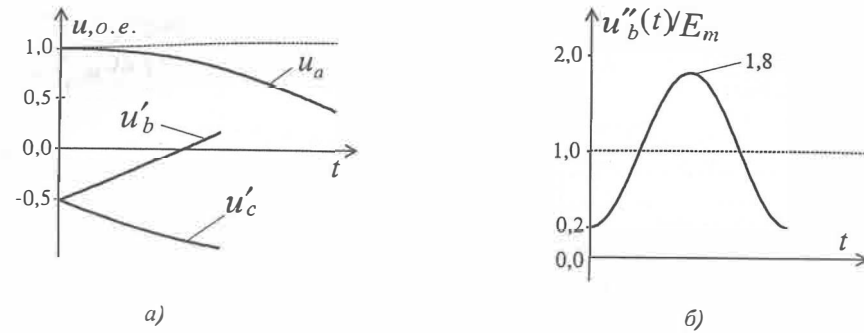


Рис. 2.8. Качественный анализ процесса включения первой фазы электродвигателя.

Что касается напряжения на включенной фазе “а”, то в схеме (см. рис. 2.7) оно устанавливается скачком и при данном моменте включения $u_{amax} = E_m$.

Включение одной фазы из-за соотношения $C_2 \gg C$ не вызовет изменения напряжения на нейтрали системы, оно по-прежнему останется равным нулю, следовательно, включение второй фазы произойдет при уравновешенной системе напряжений u_a, u'_b, u'_c такой же, какой является система ЭДС e_a, e_b, e_c .

Рассмотрим включение второй фазы. На рис. 2.8а приведены временные зависимости изменения фазных напряжений u_a, u'_b, u'_c со стороны питающей системы, на рис. 2.8б - напряжение на невключенных фазах $u''_b = u''_c$, начиная с момента включения фазы “а” в максимум напряжения (при $\beta \gg \omega_0$, к моменту достижения максимума напряжения $u''_b(t)$ напряжение промышленной частоты u_a, u'_b, u'_c практически не отличается от значения при $t=0$). Если замыкание контактов выключателя в фазе “b” ($t=t_b$) произойдет с задержкой после включения фазы “а” (которая включилась в момент $t=0$), то мгновенное значение напряжения $u''_b(t)$ может быть в интервале $0,2 \leq u''_b(t=t_b) \leq 1,8$ (см. рис. 2.8,б), а вынужденная составляющая напряжения на фазе “b” равна — 0,5 (см. рис. 2.8,а). Таким образом, интенсивность переходного процесса (максимум напряжения на следующей

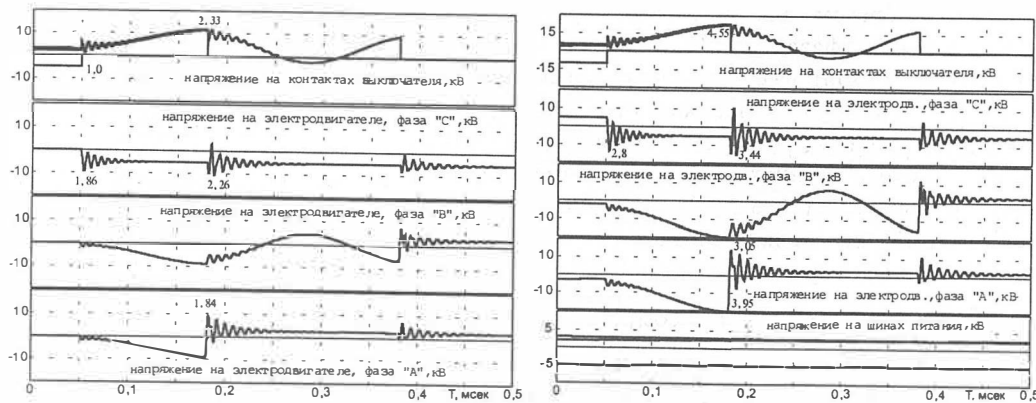


Рис. 2.9. Пуск электродвигателя мощностью 630 кВт и напряжением 6 кВ.

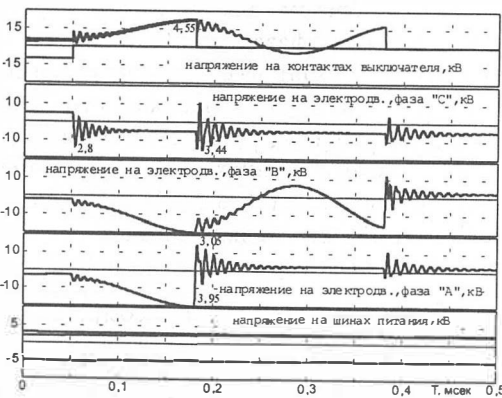


Рис. 2.10. Самозапуск электродвигателя мощностью 630 кВт и напряжением 6 кВ.

включаемой фазе) будет определяться задержкой во включении фазы “b”. Наибольшее значение этих напряжений будет при включении фазы “b” в максимум ее свободных колебаний. Весьма опасным в этом случае является также возникающий срез напряжения, воздействующий на витковую изоляцию электродвигателя.

Изложенный упрощенный теоретический анализ касался только коммутации включения единичного электродвигателя в режиме нормального пуска. В условиях эксплуатации имеют место перенапряжения при коммутации переключения вращающихся электродвигателей в процессе АВР на другой источник питания. Коммутационные перенапряжения возникают и при отключении электродвигателей, в т.ч. — в режиме пуска, а также при отключении выпавших из синхронизма синхронных электродвигателей. Все эти коммутационные операции могут происходить при наличии однофазных замыканий на землю, что еще более увеличивает кратность коммутационных перенапряжений. Некоторые особенности возникновения перенапряжений могут наблюдаться при отключениях электродвигателей вакуумными выключателями (см. п. 2.3).

Характерные переходные процессы, сопровождающие коммутации электродвигателей и рассчитанные с помощью программы NРАST по схеме рис. 2.4, показаны на рис. 2.9–2.12. На рис. 2.9 показан процесс включения заторможенного электродвигателя, когда первая фаза “с” включается в минимум напряжения сети, а вторая (фаза “а”) — в минимум напряжения свободных колебаний, при этом максимальные перенапряжения имеют величину порядка двухкратных. Существенно более опасными являются перенапряжения, возникающие при включении электродвигателя в процессе АВР (рис. 2.10), когда момент замыкания контактов первой включающей фазы выключателя отвечает максимуму напряжения на контактах. В свою очередь, эта разность имеет наибольшее значение в том случае, если в момент включения э.д.с. сети и внутренняя э.д.с. электродвигателя находятся в противофазе. Включение первой фазы “с” в момент максимальной разности напряжений на контактах вызывает максимальные перенапряжения на высокой частоте ~140 кГц кратностью ~2,8. На двух невключенных фазах имеют место относительно низкочастотные свободные колебания частотой ~3 кГц, при этом напряжения на фазах “b” и “a” достигают величины 3,95. Включения второй (“a”) и третьей фаз вызывают высокочастотные импульсы перенапряжений другой полярности (максимум равен 3,05 на фазе “a”) и крутые срезы напряжений (с фронтом порядка 1 мкс), максимальный из которых равен разности указанных значений: $3,95 + 3,05 = 7,0$. Эти срезы напряжения воздействуют на витковую изоляцию первых катушек электродвигателя. Заметим, что регулирование разброса в моментах замыкания отдельных фаз для снижения перенапряжений должно иметь возможность регулирования в пределах хотя бы четверти периода свободных колебаний, т. е. 0,05...0,08 мс, что практически нереально.

Другой коммутацией электродвигателя, приводящей к опасным перенапряжениям, является отключение выпавшего из синхронизма электродвигателя. Пример такого процесса приведен на рис. 2.11.

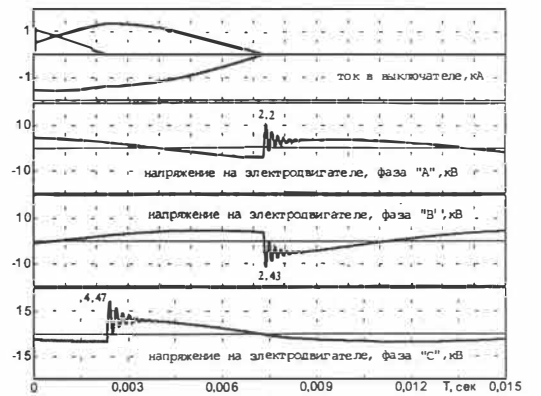


Рис. 2.11. Отключение электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт в режиме асинхронного хода.

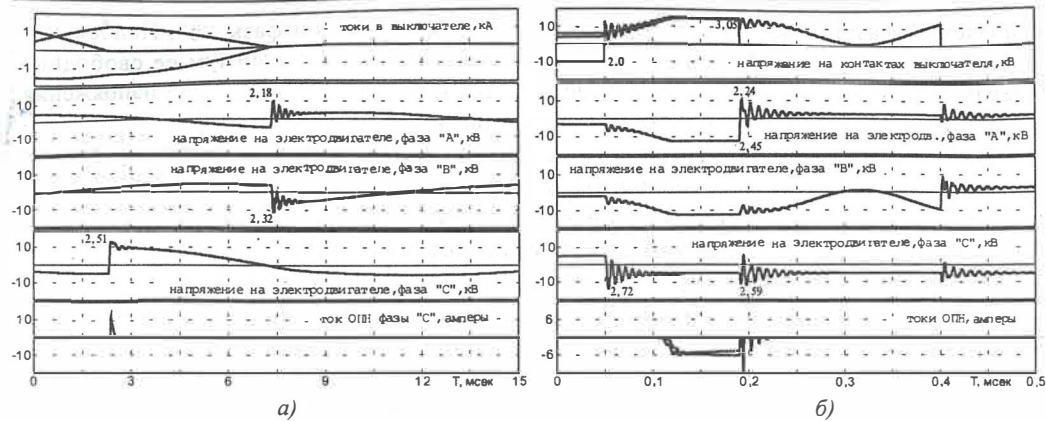
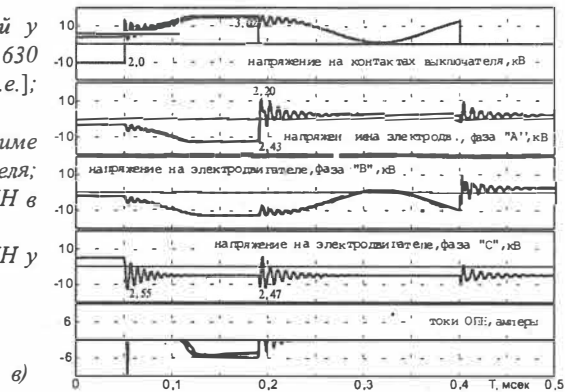


Рис. 2.12. Ограничение перенапряжений у зажимов электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт с помощью ОПН ($U_{\text{ост}} = 14,6 \text{ кВ}$ [2,84 о.е.]; $I_{\text{ост}} = 0,3 \text{ кА}$):

а) при отключении электродвигателя, в режиме асинхронного хода с ОПН в ячейке выключателя;

б) при самозапуске электродвигателя с ОПН в ячейке выключателя;

в) при самозапуске электродвигателя с ОПН у зажимов электродвигателя.



Наиболее опасным является момент отключения первой фазы, совпадающий с противофазным положением э.д.с. сети и внутренней э.д.с. электродвигателя. Максимальная кратность перенапряжений имеет место при отключении первой фазы и в примере на рис. 2.11 составляет величину 4,47, отключение других фаз дает меньшие перенапряжения (на рис. 2.11 — наибольшая кратность 2,43). В отличие от коммутации включения, основная частота, на которой имеют место перенапряжения, здесь ниже, в примере она составляет примерно 4,9 кГц.

Ограничение коммутационных перенапряжений при включениях и отключениях электродвигателей практически можно осуществить только с помощью ОПН. Работа ОПН при ограничениях перенапряжений, возникающих при коммутациях электродвигателей сопровождается в большинстве случаев однократными импульсами тока длительностью от единиц до нескольких сотен микросекунд и величиной в десятки ампер, что легко поглощается варисторами ОПН. Эффект ограничения перенапряжений с помощью ОПН, установленный в ячейке выключателя, иллюстрирован на рис. 2.12, а–б, где дополнительно показаны форма и величина токов в ОПН. Рис. 2.12, в показывает несколько больший эффект ограничения высокочастотных составляющих перенапряжений (только при коммутации включения) в случае установки ОПН непосредственно у зажимов электродвигателя, однако практическая реализация требует установки для ОПН специального защитного кожуха, что со-

здает некоторые эксплуатационные неудобства и поэтому часто не выполняется. Очевидно, что установка ОПН на сборных шинах вообще не приведет к участию ОПН в ограничении перенапряжений при любых коммутациях электродвигателя (см., например, на рис. 2.10 форму напряжения на шинах питания, где в напряжении полностью отсутствуют какие-либо составляющие переходного процесса).

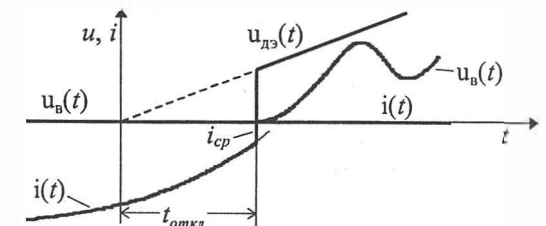
Установка ОПН — практически единственное универсальное средство для подавления перенапряжений при коммутациях электродвигателей. Резистивное заземление нейтрали (как высокоомное так и низкоомное) и тем более заземление нейтрали через дугогасящий реактор практически не оказывают влияния на эти коммутационные перенапряжения. Однако высокоомное и в особенности низкоомное резистивное заземление нейтрали позволяют снизить остающееся напряжение на ОПН и тем самым обеспечить более глубокую защиту изоляции электродвигателей.

2.3. ОСОБЕННОСТИ КОММУТАЦИЙ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

В большинстве публикаций, посвященных анализу перенапряжений, создаваемых вакуумными выключателями, указываются следующие причины, [12–17 и др.]:

- срез тока до его нулевого значения и освобождение энергии, запасенной в индуктивных элементах схемы;
- недостаточная диэлектрическая прочность межконтактного промежутка в начальный интервал времени после прерывания тока дуги, который не может выдержать переходного восстанавливающегося напряжения, что приводит к повторным зажиганиям дуги;
- виртуальный срез тока (доходящий до сотен ампер) в соседних фазах, вызванный повторными зажиганиями дуги (ПЗ) в первой отключаемой фазе;
- возможность многократных пробоев (предпробоев), сопровождающихся гашениями переходного тока, при уменьшающемся межконтактном промежутке в процессе коммутации включения.

В зависимости от вида коммутируемого оборудования (электродвигатель, трансформатор, кабель и т.д.) может быть определяющей какая-либо одна из этих причин. Например, учет среза тока более важен для определения максимальных перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора, в то же время, учет недостаточной диэлектрической прочности в начальный период важен при рассмотрении перенапряжений при отключениях заторможенного электродвигателя и т.д. Одновременно, как было показано в п. 2.2, даже без учета основных из выше перечисленных причин (т.е., например, без среза тока и повторных зажигания дуги в выключателе, т.е. при использовании



“идеального выключателя”) можно получить весьма высокие кратности перенапряжений при коммутации электродвигателей.

Рассмотрим более обстоятельно процесс отключения заторможенного электродвигателя вакуумным выключателем. После прерывания тока (вне зависимости от величины тока среза), если переходное восстанавливающееся напряжение (u_v) растет быстрее, чем диэлектрическая прочность между контактами выключателя, возникает условие для многократных повторных зажиганий дуги (ПЗ). Возникновению ПЗ благоприятствует момент начала движения контактов ($t_{откл}$), если он попадает в зону примерно $t_{откл} < 0,5 \dots 1$ мсек до “естественного” нуля тока (или момента среза тока, рис. 2.13). Так как за это малое время движения контактов величина межконтактного промежутка, а следовательно и величина диэлектрической прочности промежутка часто оказывается недостаточной, чтобы успешно противостоять росту восстанавливающегося напряжения (несмотря на то, что предполагается, что диэлектрическая прочность в момент прерывания тока практически мгновенно принимает значение, отвечающее текущей длине промежутка, см. скачок $U_{дв}$ на рис. 2.13), возникают условия для пробоя межконтактного промежутка. Таким образом, чем больше случайная величина $t_{откл}$, тем более вероятно отключение без повторных зажиганий.

Если первый пробой межконтактного промежутка ВВ после прерывания тока может иметь место из-за недостаточной его диэлектрической прочности, то последующие многократные повторные пробои происходят из-за высокой дугогасящей способности ВВ, позволяющей гасить дугу в первый же нуль высокочастотного переходного тока (частотой 100...200 кГц), сопровождающего каждый пробой [18].

Ниже, при рассмотрении проблемы перенапряжений основное внимание будет уделяться явлениям среза тока и многократных повторных зажиганий при отключениях

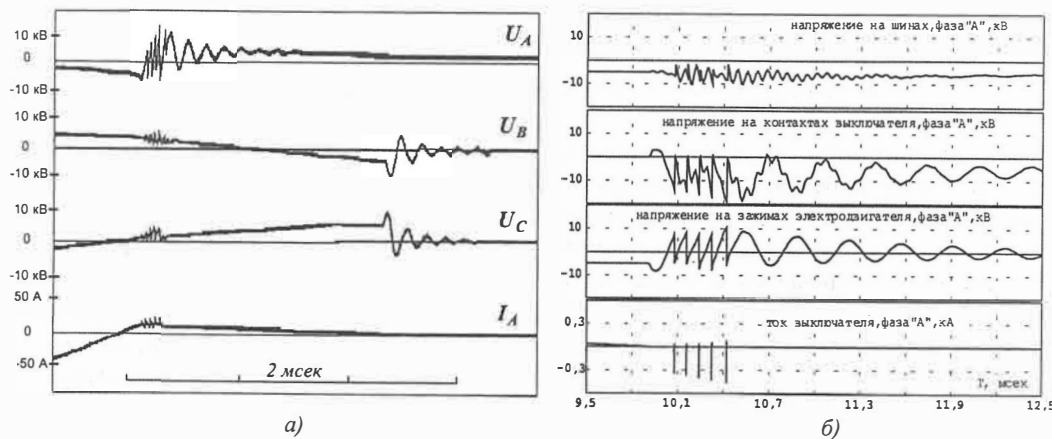


Рис. 2.14.

а) Фрагмент экспериментальной осциллограммы отключения пускового тока электродвигателя мощностью $P_{дв} = 200$ кВт.

б) Отключение пускового тока: ток среза $i_{ср} = 5$ А, скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дв}/dt = 15$ кВ/мсек, $di/dt = 50$ А/мсек, начало отключения $t_{откл} = 0,85$ мсек, длина кабеля $l_k = 100$ м, емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ, мощность электродвигателя $P_{дв} = 200$ кВт

первой фазы выключателя. Не будут рассматриваться перенапряжения, возникающие из-за виртуального среза, так как эти перенапряжения могут быть ликвидированы конструктивно заводом-изготовителем, или подавлены с помощью устройств, предназначенных для снижения перенапряжений при отключении первой фазы.

На рис. 2.14,а представлена одна из экспериментальных осциллограмм, полученных при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя напряжением 6 кВ мощностью 200 кВт в натурном эксперименте, проведенном ОРГЭС на одной из ТЭЦ г. Уфы. Для сравнения на рис. 2.14,б показана расчетная осциллограмма, выполненная с помощью программы “Triada” (разработка СПбГТУ) для условий этого эксперимента. Ток среза принят равным $i_{ср} = 5$ А, скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дв}/dt = 15$ кВ/мсек, начало движения контактов $t_{откл} = 0,85$ мсек.

Как видно, процесс отключения сопровождается пятью повторными зажиганиями дуги в выключателе с последующим отключением этой фазы. Кратность максимальных перенапряжений, отнесенных к амплитуде фазного напряжения $6,3 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5,1$ кВ составляет 2,1. Отключение последующих фаз (при отсутствии виртуального среза) дает меньшие кратности перенапряжений, чем при отключении первой. Из сравнения рис. 2.14,а,б видно, что математическое моделирование дает неплохое соответствие экспериментальных и расчетных данных.

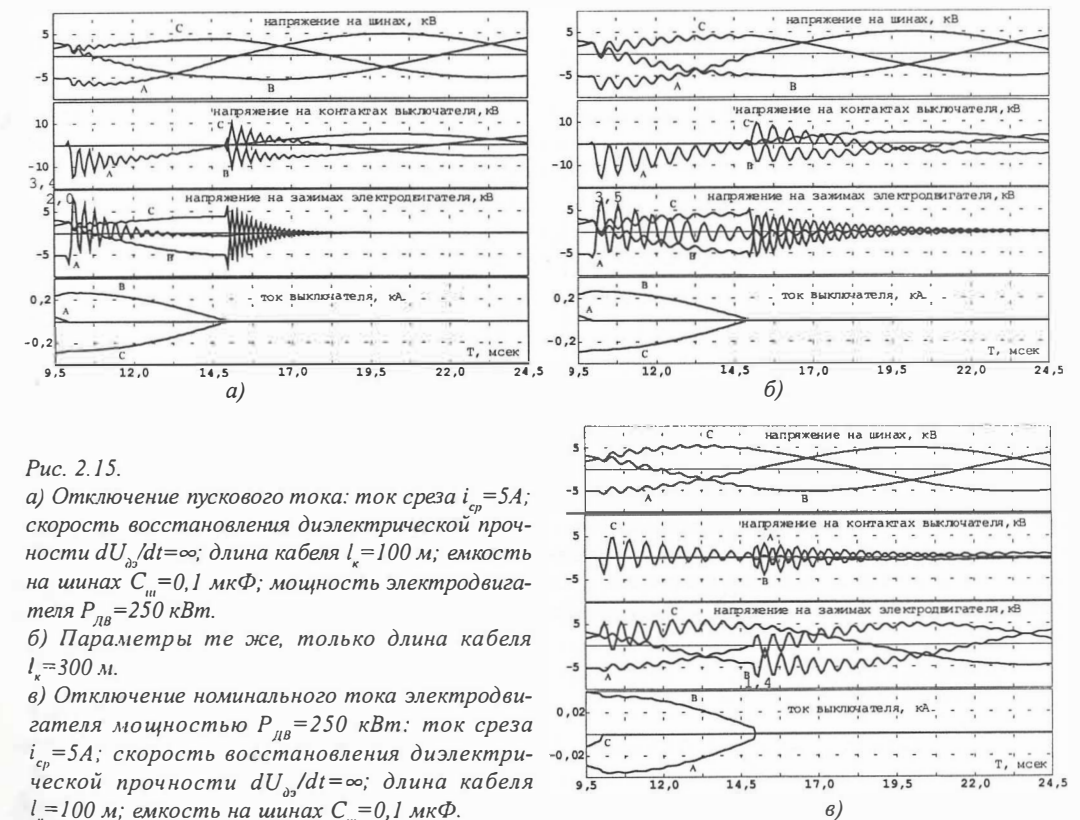


Рис. 2.15.

а) Отключение пускового тока: ток среза $i_{ср} = 5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дв}/dt = \infty$; длина кабеля $l_k = 100$ м; емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ; мощность электродвигателя $P_{дв} = 250$ кВт.

б) Параметры те же, только длина кабеля $l_k = 300$ м.

в) Отключение номинального тока электродвигателя мощностью $P_{дв} = 250$ кВт: ток среза $i_{ср} = 5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дв}/dt = \infty$; длина кабеля $l_k = 100$ м; емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ.

Покажем основные факторы, влияющие на возможное число повторных зажигания дуги в выключателе и кратность возникающих при этом перенапряжений. На рис. 2.15,а,б показаны аналогичные рис. 2.14 переходные процессы отключения пускового тока асинхронного электродвигателя с номинальной мощностью 250 кВт (пусковой ток $I_{пм} \approx 0,3$ кА) при питании через трансформатор мощностью 25 МВА и длине кабеля $l_k = 100$ м (рис. 2.15,а) и $l_k = 300$ м (рис. 2.15,б), $dU_{дз}/dt = \infty$, ток среза $i_{ср} = 5$ А. На рис. 2.15 приведены все три фазы соответствующих напряжений и токов. Как видно (рис. 2.15,а), отключение первой фазы вызывает появление на зажимах электродвигателя перенапряжений кратностью $U_m \approx 2,0 \dots 2,1$ и меньших — при отключении двух других. На контактах выключателя через время примерно равное $\sim 0,2$ мсек после прерывания тока наступает максимум переходной составляющей перенапряжений кратностью 3,4 (17,2 кВ). Частота этих свободных колебаний приближенно может быть определена по формуле

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_3 \cdot C_3}}, \text{ Гц} \quad (2.1)$$

где $L_3 = 1,5 \times L_d''$; $C_3 = C_0 + 2 \times C_m$; C_0 , C_m — емкости питающего кабеля на оболочку и между фазами. В данном случае частота свободных колебаний близка к $f = 3$ кГц. Увеличение длины кабеля в соответствии с формулой (2.1) уменьшает частоту восстанавливающегося

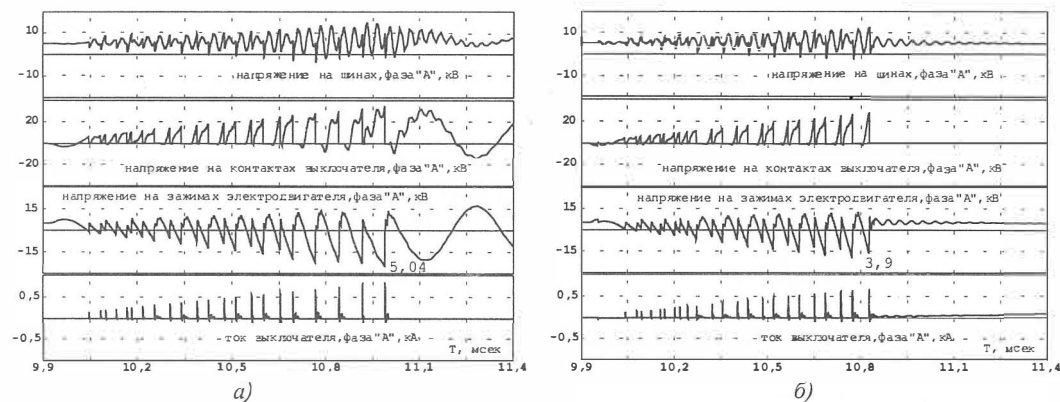
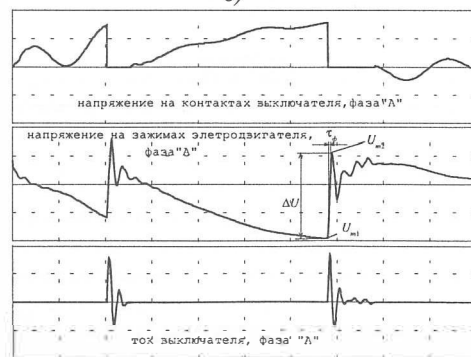


Рис. 2.16.

а) Отключение пускового тока: ток среза $i_{ср} = 5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дз}/dt = 30$ кВ/мсек; $di/dt = 50$ А/мсек; длина кабеля $l_k = 100$ м; емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ; мощность электродвигателя $P_{дв} = 250$ кВт; начало отключения $t_{откл} = 0,17$ мсек.

б) Параметры те же, только $t_{откл} = 0,092$ мсек и происходит негашение высокочастотного тока отключения.

в) Форма напряжения на электродвигателе и контактах выключателя при большей развертке во времени.



в)

напряжения (рис. 2.15,б) и при прочих равных условиях увеличивает вероятность отключения без повторных зажигания (или при меньшем их числе).

Увеличение мощности электродвигателя, как следует из рис. 2.14,а, (при той же длине кабеля) увеличивает частоту свободных колебаний процесса и скорость восстановления напряжения на контактах ВВ.

Существенно меньшая интенсивность переходного процесса имеет место при нормальном отключении вращающегося электродвигателя вне зависимости от его загрузки. Это можно видеть на рис. 2.15,в, где показано, что в процессе отключения номинального тока на расходящихся контактах ВВ создается столь малое переходное восстанавливающееся напряжение, что отсутствуют условия для пробоя промежутка практически вне зависимости от момента начала движения контактов.

С помощью рис. 2.15,а можно убедиться, что если, например, начало движения контактов $t_{откл}$ попадает в зону $t_{откл} \approx 0 \dots 0,5$ мсек, то скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка, меньшая $dU_{дз}/dt < 25$ кВ/мсек, оказывается недостаточно высокой, и вблизи максимума напряжения свободных колебаний на контактах выключателя может произойти электрический пробой его межконтактного промежутка. Воспользуемся для этого следующими, приведенными выше при описании рис. 2.15,а, данными: время наступления максимума напряжения на контактах выключателя $\approx 0,2$ мсек после среза тока, а сам максимум равен 17,2 кВ. Таким образом, с момента начала движения контактов $t_{откл} = 0,5$ мсек до максимума межконтактного напряжения проходит время $t = 0,5 + 0,2 = 0,7$ мсек и только в том случае, если скорость роста диэлектрической прочности межконтактного промежутка будет превышать значение $dU_{дз}/dt = 25$ кВ/мсек повторное зажигание дуги не случится (т.к. $U_{дз} = 25 \cdot 0,7 = 17,5$ кВ $> U_{в} = 17,2$ кВ). Таким образом, при фиксированной и конечной скорости восстановления диэлектрической прочности условия для первого и последующих пробоев определяются моментом начала движения контактов $t_{откл}$.

На рис. 2.16,а показан процесс отключения пускового тока, рассчитанный для тех же условий, что и рис. 2.15,а, но при $t_{откл} = 0,17$ мсек (одно деление по оси времени составляет 0,15 мсек) и $dU_{дз}/dt = 30$ кВ/мсек. Здесь после среза тока при его мгновенном значении $i_{ср} = 5$ А, прочность промежутка ВВ спустя время $t_{откл} = 0,17$ мсек после начала движения контактов оказывается недостаточной, и происходит первый, а затем и ряд последующих пробоев промежутка (всего 22) с гашением дуги каждый раз после прохождения через выключатель одной-трех (в зависимости от скорости подхода тока к нулю, принятой здесь равной $di/dt = 50$ А/мсек) высокочастотных полуволн тока. Видно, что максимальное перенапряжение на электродвигателе достигает высокой кратности $U_{m1} = 5,04$ о.е., то есть намного выше, чем на рис. 2.15,а, где отсутствует явление многократных ПЗ. При увеличении случайного момента времени $t_{откл}$ число ПЗ снижается и уже для $t_{откл} = 0,5$ мсек при $dU_{дз}/dt = 30$ кВ/мсек отключение происходит без ПЗ, то есть так, как показано на рис. 2.15,а. Наоборот, при уменьшении времени $t_{откл}$ число ПЗ увеличивается, и при некотором малом $t_{откл}$ после серии ПЗ происходит негашение дуги высокочастотного тока (рис. 2.16,б), после чего возобновляется протекание тока частоты 50 Гц с последующим его гашением спустя время ~ 10 мсек без каких-либо повторных зажигания, так как диэлектрическая прочность межконтактного промежутка к этому моменту будет очень велика (полное время движения контактов 6...8 мсек, диэлектрическая прочность полного межконтактного промежутка больше 30 кВ/мм).

Фрагмент процесса многократных повторных зажигания и гашений дуги в ВВ при большой развертке во времени показан на рис. 2.16,в. Возникающий при этом относительно

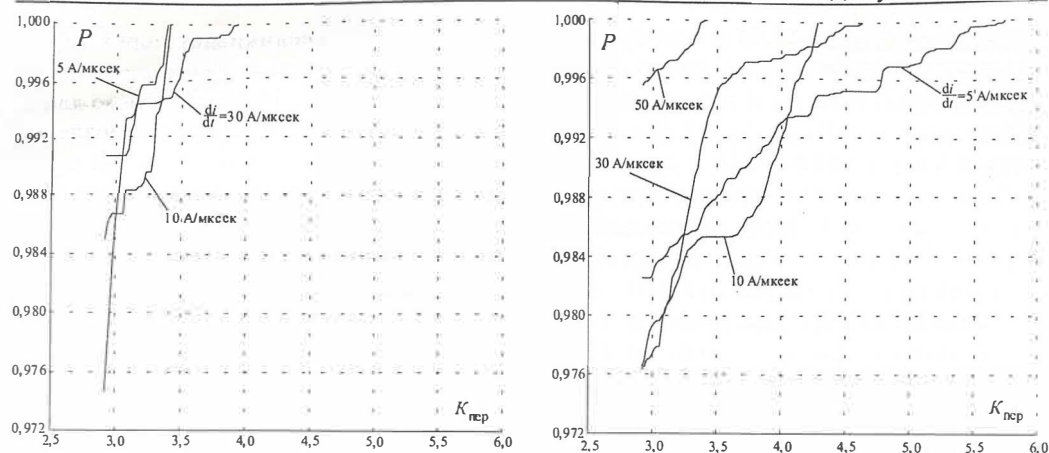


Рис.2.17 Условные статистические функции распределения $P(K_{пер})$ максимальных перенапряжений ($K_{пер} = |U_{max} / U_{ф.н.р.мах}|$) на зажимах электродвигателя мощностью 250 кВт при отключении пускового тока и длине кабеля =100 м в зависимости от скорости изменения тока в момент гашения di/dt : а) скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{до}/dt = 5$ кВ/мсек, б) $dU_{до}/dt = 30$ кВ/мсек

низкочастотный максимум перенапряжений U_{m1} определяет способность корпусной изоляции электрической машины выдерживать перенапряжения. Как видно из рис.2.16, в, после очередного пробоя межконтактного промежутка в вакуумной камере, на изоляции электродвигателя возникает высокочастотный пик перенапряжений с амплитудой равной U_{m2} . В результате образуется импульс напряжения ΔU (напряжение среза) с крутым фронтом τ_{ϕ} (порядка микросекунды), равный разности мгновенных значений напряжений относительно земли перед зажиганием дуги и после первого перехода высокочастотного тока через нуль: $\Delta U = |U_{m1} - U_{m2}|$. Этот максимум напряжения является определяющим для оценки возможности выдерживать перенапряжения для витковой изоляции электрической машины.

Варьирование времени начала движения контактов и скорости восстановления диэлектрической прочности позволяют определить максимальную величину перенапряжений, которые можно ожидать при данной коммутации в схеме сети с заданными параметрами. Естественно, с ростом скорости восстановления диэлектрической прочности значение времени $t_{откл}$, при котором возникает серия повторных зажигания, уменьшается.

Ниже приведены некоторые результаты большого числа расчетов переходных процессов отключения пусковых токов электродвигателей различной мощности при различной длине питающих кабелей, скорости восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{до}/dt$, максимальной скорости подхода тока к нулю di/dt , при которой имеет место гашение высокочастотного тока. В каждой серии расчетов оставались неизменными указанные выше параметры и варьировался момент начала отключения $t_{откл}$. В предположении о равнозначности любого значения $t_{откл}$ в интервале полуволны синусоиды тока промышленной частоты строились вероятностные характеристики максимальных перенапряжений относительно земли (U_{m1} или U_{m2}), определенные в каждом из расчетов. Разброс $\Delta t_{откл}$ значений момента начала отключения $t_{откл}$, приводящих к значительным перенапряжениям, очень невелик (он составляет

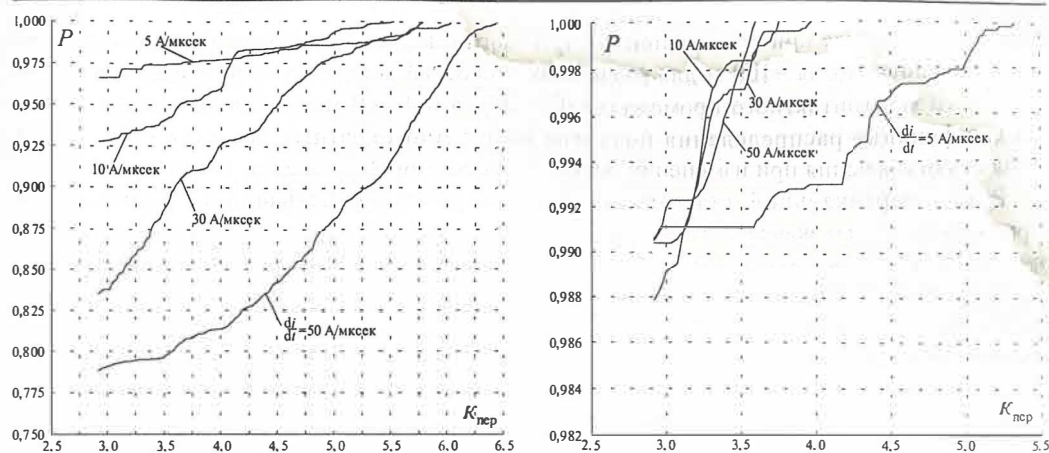


Рис.2.18 Условные статистические функции распределения $P(K_{пер})$ максимальных перенапряжений ($K_{пер} = |U_{max} / U_{ф.н.р.мах}|$) на зажимах электродвигателя мощностью 250 кВт при отключении пускового тока и длине кабеля =300 м в зависимости от скорости изменения тока в момент гашения di/dt : а) скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{до}/dt = 5$ кВ/мсек, б) $dU_{до}/dt = 30$ кВ/мсек

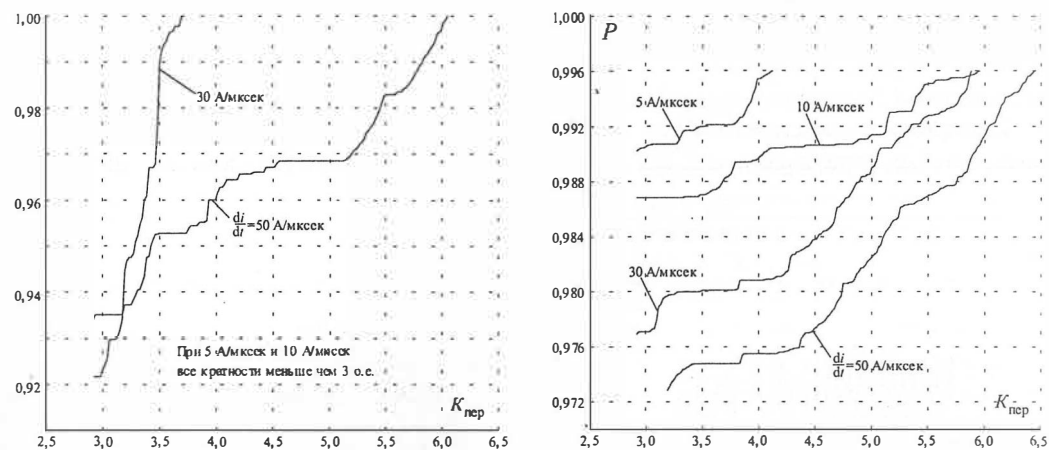


Рис.2.19 Условные статистические функции распределения $P(K_{пер})$ максимальных перенапряжений ($K_{пер} = |U_{max} / U_{ф.н.р.мах}|$) на зажимах электродвигателя мощностью 630 кВт при отключении пускового тока и длине кабеля =300 м в зависимости от скорости изменения тока в момент гашения di/dt : а) скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{до}/dt = 5$ кВ/мсек, б) $dU_{до}/dt = 30$ кВ/мсек

величину порядка $\Delta t_{откл} = 0,05...0,1 t_{откл}$), что требует очень малого шага варьирования внутри этого диапазона, составляющего величину примерно 1 мсек. Вне диапазона $\Delta t_{откл}$ уровень перенапряжений резко снижается.

На рис.2.17 представлены условные статистические функции распределения максимальных перенапряжений $P(K_{пер})$, возникающие в процессе повторных зажигания

дуги в выключателе при отключении им пускового тока электродвигателя мощностью 250 кВт при длине кабеля = 100 м для различных скоростей восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка $dU_{дз}/dt = 5$ и 30 кВ/мсек. Как уже указывалось, каждая функция распределения получена путем многократных расчетов (100...1000) процесса отключения при изменении времени отключения $t_{откл}$ с шагом 1 мсек.

Вдоль вертикальной оси отложена вероятность неперевышения заданного по горизонтальной оси значения $K_{пер} = U_{max}/U_{ф.н.р.мах}$ (см. рис.2.17), причем фиксировались только кратности $K_{пер}$, превышающие величину $K_{пер} = 2,5$ по отношению к амплитуде фазного наибольшего рабочего напряжения на электродвигателе $U_{ф.н.р.мах}$. Из рис.2.17 видно, что в данной коммутации и при данных параметрах сети и выключателя перенапряжения высоких кратностей в процессе многократных повторных зажигания дуги в выключателе возникают исключительно редко. Так из рис.2.17,а, видно, например, что кратность перенапряжений выше чем $K_{пер} = 3,5$ имеет место лишь в 4 коммутациях из 1000. Кроме того, большая скорость роста диэлектрической прочности межконтактного промежутка (в данном случае приведены две скорости $dU_{дз}/dt = 5$ кВ/мсек, рис.2.17,а и 30 кВ/мсек, рис.2.17,б) может создать условия для получения больших кратностей перенапряжений (так в приведенных зависимостях максимальная кратность возрастает с 3,9 о.е. до 5,7 о.е.). Однако, как уже указывалось ранее, дальнейший рост параметра $dU_{дз}/dt$ до значений 50 кВ/мсек и выше при данных параметрах сети исключает возможность даже единичного повторного зажигания, кратность максимальных перенапряжений будет невелика, вид переходного процесса в этом случае "идеального" выключателя показан на рис. 2.15. Что касается влияния на перенапряжения различных скоростей подхода тока к нулю, при которых имеет место гашение дуги, то, как видно из рис.2.17 это влияние неоднозначно.

С увеличением длины кабеля $l_k = 300$ м, при прочих равных условиях, кратность максимальных перенапряжений, как правило, возрастает. Так при скорости $dU_{дз}/dt = 5$ кВ/

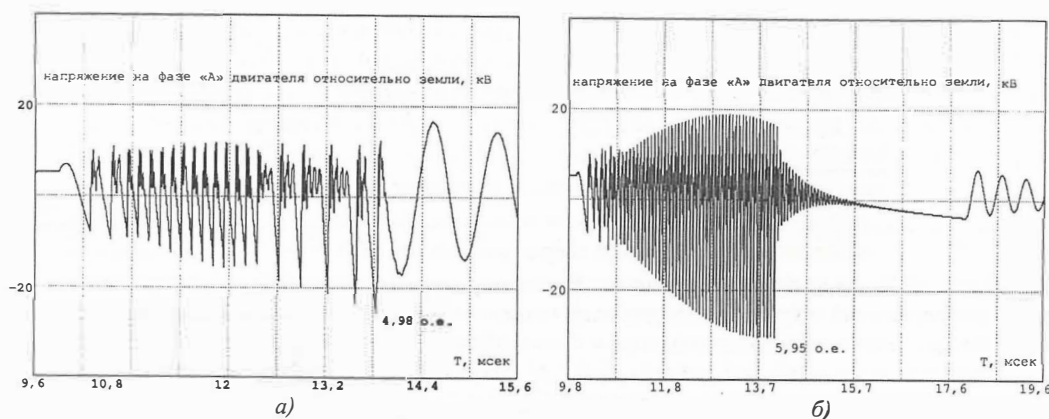


Рис. 2.20. а) Отключение пускового тока: ток среза $i_{ср} = 5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дз}/dt = 5$ кВ/мсек; $di/dt = 5$ А/мсек; длина кабеля $l_k = 300$ м; емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ; мощность электродвигателя $P_{дв} = 250$ кВт; начало отключения $t_{откл} = 0,0074$ мсек - гашение дуги в выключателе.

б) Параметры те же, только $di/dt = 50$ А/мсек; $P_{дв} = 630$ кВт; $t_{откл} = 0,0739$ мсек - негашение высокочастотного тока отключения.

мсек максимальная кратность уже составляет 6,5 о.е. (рис.2.18,а). Перенапряжения высокой кратности могут иметь место при различной способности гашения дуги в выключателе (как для малых $di/dt = 5$ А/мсек так и для больших $di/dt = 50$ А/мсек). При большей скорости нарастания диэлектрической прочности $dU_{дз}/dt = 30$ кВ/мсек роста перенапряжений как в предыдущем случае нет (рис.2.18,б).

Увеличение мощности электродвигателя ($P_{дв} = 630$ кВт) при прежней длине кабеля $l_k = 300$ м показывает, что при таких параметрах сети малая скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{дз}/dt = 5$ кВ/мсек (рис.2.19,а) в сочетании с малыми значениями производных тока $di/dt = 5$ А/мсек, при которых гасится ток дуги дает низкие кратности перенапряжений, но более быстрый рост диэлектрической прочности $dU_{дз}/dt = 30$ кВ/мсек (рис.2.19,б) уже и при малых di/dt может дать большие кратности перенапряжений.

Как видно из всех приведенных зависимостей, бытующее во многих публикациях мнение, что способность вакуумных выключателей гасить высокочастотный ток - основная причина, объясняющая возможную эскалацию перенапряжений при отключении пусковых токов электродвигателей не полностью подтверждается приведенными расчетами. Более правильный вывод можно сформулировать следующим образом. Одновременно малые значения скорости восстановления диэлектрической прочности промежутка $dU_{дз}/dt$ и способность гашения тока только при малых значениях di/dt может снизить вероятность значительных перенапряжений, а не исключить их. Так, например, на рис.2.20а,б показано, что в определенных условиях примерно одинаковые перенапряжения возникают как при одновременно малых значениях параметров $dU_{дз}/dt$ и di/dt так и при большой скорости di/dt .

Первый расчет на рис.2.20а относится скорее к элегазовым выключателям, второй на рис.2.20б - к вакуумным. Хотя, как было отмечено выше, вероятность получения высоких кратностей перенапряжений для вакуумных выключателей в данной коммутации очень мала. Следует отметить, что вероятность получения таких же кратностей для элегазовых выключателей должна быть еще ниже. Оценить эту вероятность для сравнения элегазовых и вакуумных выключателей в настоящее время не представляется возможным, т.к. экспериментальных данных по характеристикам di/dt и $dU_{дз}/dt$ (а также временных характеристик задержки в нарастании диэлектрической прочности) элегазовых выключателей в режимах отключения ими относительно малых индуктивных токов недостаточно: [36,37,39] и они не могут быть положены в основу сравнения.

2.4. ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ОПН

Необходимость защиты изоляции высоковольтных электродвигателей рассматривается во многих публикациях [5,12,16,19-29 и др.]. Многие из них, например, [19-21, 22-24] обосновывают необходимость защиты изоляции электродвигателя независимо от типа выключателя, предназначенного для его коммутации. Часть этого материала из [22-24] приведена в п.2.2, где рассмотрены перенапряжения, создаваемые «идеальным» выключателем и их ограничение с помощью ОПН.

Условия, принятые при эксплуатации высоковольтных электродвигателей в России, имеют некоторые отличия по сравнению с таковыми для ряда зарубежных потребителей. Во-первых, в России не применяются для защиты электродвигателей какие-либо меры ограничения перенапряжений, в то время как за рубежом для этих целей используются импульсные

конденсаторы и ОПН. Во-вторых, электрические сети 6-10 кВ в России имеют изолированную или заземленную через дугогасящий реактор нейтраль, в то время как за рубежом широко используются системы эффективного или низкоомного резистивного заземления нейтралей, что в совокупности с надежными и селективными защитами от замыканий на землю дает возможность осуществить более глубокую защиту от перенапряжений с помощью ОПН, чем это может быть сделано в сетях с малыми токами замыкания на землю.

Выдерживаемые импульсные напряжения для новой изоляции электрических машин нормируются стандартом МЭК (IEC 34-15 1995-01). В частности, для электрических машин с номинальным напряжением $U_N=6$ кВ нормируется: номинальное выдерживаемое напряжение грозового импульса с фронтом 1,2 мкс и длиной 50 мкс ($4U_N+5$) на уровне 29 кВ (или в долях амплитуды наибольшего фазного рабочего напряжения $6,3 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5,14$ кВ получим 5,6 о.е.); номинальное выдерживаемое напряжение импульса с крутым фронтом 0,2 мкс на уровне 19 кВ ампл. (3,7 о.е.) и номинальное выдерживаемое напряжение промышленной частоты $2U_N+1=13$ кВ действ. (3,6 о.е.). Заметим, что в отечественной практике при проведении периодических профилактических испытаний главной изоляции в качестве испытательного напряжения применяется одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты 10 кВ действ. (2,7 о.е.) [31]. Однако это испытание, естественно, не дает информации об импульсной прочности изоляции электрической машины, находящейся в эксплуатации. Поэтому многие полагают, что импульсную прочность корпусной изоляции электрической машины в процессе эксплуатации следует оценивать по этому испытательному напряжению, т.е. $10 \cdot \sqrt{2} / 5,14 = 2,7$ о.е. Если считать, что в таком же соотношении снижается прочность витковой изоляции, то ее величина равна $5,6 \cdot 10 / 13 = 4,3$ о.е. Существует также мнение, что импульсную прочность изоляции электрической машины, находящейся в эксплуатации, следует оценивать, исходя из значения коэффициента импульса равного 1.

Другой известный стандарт, обсуждаемый, например, в [20, 32], существенно отличается от стандарта МЭК. Так, например, там в качестве выдерживаемого импульсного напряжения для волн перенапряжений с фронтом $\tau_\phi \geq 5$ мкс принята величина 4,7 о.е. (в качестве базисного принята амплитуда номинального фазного напряжения) и 2,0 о.е. для волн с фронтом $t_\phi = 0,2$ мкс. Однако следует заметить, что согласно [20] с 1991 г. IEEE Working Group рекомендует разработать двухуровневый стандарт, причем стандарт второго уровня весьма близок к стандарту МЭК.

Таким образом, если ориентироваться на стандарт МЭК для новой изоляции электрической машины, защищаемой ОПН с остающимся напряжением относительно земли $U_{ост} = 2,6 \cdot 2,8$ о.е., то корпусная изоляция будет защищена с коэффициентом запаса $K_N = 3,6 / 2,6 \cdot 2,8 = 1,38 \cdot 1,29$ (не менее), и витковая - с коэффициентом $K_B = 5,6 / 5,2 \cdot 5,6 = 1,08 \cdot 1$.

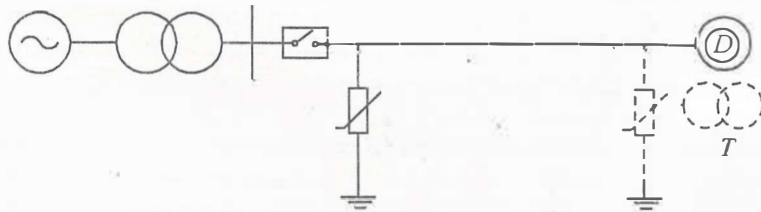


Рис. 2.21. Место установки ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений

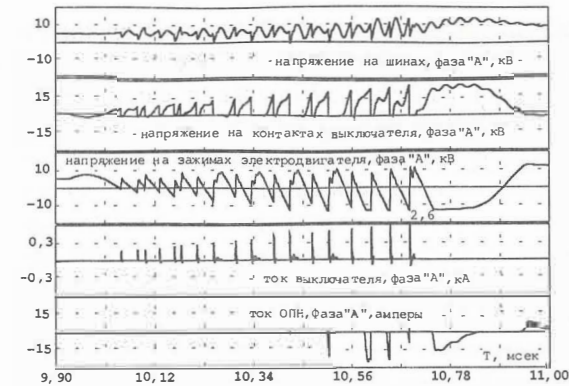


Рис. 2.22. Параметры сети и выключателя как на рис. 2.16а (отключение пускового тока: ток среза $i = 5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{до}/dt = 30$ кВ/мкс; $di/dt = 50$ А/мксек; длина кабеля $l_k = 100$ м; емкость на шинах $C_{ш} = 0,1$ мкФ; мощность электродвигателя $P_{дв} = 250$ кВт; начало отключения $t_{откл} = 0,17$ мсек), ОПН подключен в узле 2 (рис. 2.2).

Последний коэффициент запаса вычислен на основании гарантированной стандартом импульсной прочности на волне 1,2 мкс равной 5,6 о.е. и теоретически возможного максимального значения среза напряжения $\Delta U_{max} = 2U_{ост}$, когда срез ΔU_{max} образован ближайшими разнополярными максимумами напряжения равными напряжению ограничения ОПН (т.е. когда до и после среза перенапряжения достигали напряжения $U_{ост}$).

При оценке надежности работы изоляции электродвигателя, защищенной ОПН, на основании данных профилактических испытаний: т.е. корпусной на уровне 2,7 о.е. и витковой на уровне 4,3 о.е. оценку надежности защиты изоляции ОПН с уровнем ограничения $U_{ост} = 2,6 \cdot 2,8$ следует проводить методом статистической координации изоляции так как не каждая коммутация будет приводить к максимальному расчетному коммутационному току в ОПН и следовательно - к максимальному остающемуся напряжению на нем, а также по этой причине максимальное напряжение среза ΔU_{max} практически всегда будет ниже теоретической кратности $\Delta U_{max} = 2U_{ост}$.

В качестве примера в схеме рис.2.21 проведен расчет процесса отключения пускового тока вакуумным выключателем, сопровождающийся эскалацией перенапряжений и их ограничением с помощью ОПН. Вольт-амперная характеристика ОПН задана двумя точками: $U_{ост 100A} = 14$ кВ и $U_{ост 300A} = 14,6$ кВ на волне 30/60 мкс при токах 100 А и 300 А соответственно. Расчет переходного процесса с ОПН показан на рис.2.22. Он проведен при тех же условиях, что и процесс рис.2.16а. Из сравнения рис.2.16а и 2.22 видно, что ОПН уменьшает число повторных зажигания, ограничивает уровень перенапряжений относительно земли и тем самым относительно полюсов выключателя. Ограничивается, таким образом, и кратность высокочастотного импульса перенапряжения, который прикладывается к продольной изоляции электрической машины. Из рисунка также видно, что наибольший отрицательный максимум напряжения на электродвигателе ограничен ОПН до уровня -2,6 о.е., а наибольший высокочастотный максимум противоположной полярности (неограниченный ОПН), возникший после повторного пробоя межконтактного промежутка и перехода (с гашением) высокочастотного тока через нуль составляет 1,6 о.е. Таким образом, максимальное напряжение ΔU в данном случае составило $\Delta U = 2,6 + 1,6 = 4,2$. Без ОПН процесс отключения имел бы вид рис.2.16а,б, где перенапряжения опасны как для корпусной изоляции ($5,04 > 2,7$) так и для витковой ($5,04 + 1,6 = 6,64 > 4,3$). Заметим, что коммутации электродвигателя, осуществляемые «идеальным» выключателем также могут приводить к перенапряжениям, опасным для изоляции. Так для корпусной изоляции в

коммутациях отключения асинхронного хода и самозапуска на рис.2.10 и 2.11 кратности перенапряжений относительно земли больше расчетного значения 2,7 о.е.: ($3,95 > 2,7$ и $4,47 > 2,7$), а для витковой изоляции опасной является коммутация самозапуска электродвигателя, когда $\Delta U = 3,05 + 3,95 = 7 > 4,3$.

Что касается изоляции электрических машин с ослабленной изоляцией, то применение ОПН с теми же характеристиками также дает возможность снизить воздействующие перенапряжения на изоляцию машины и повысить уровень надежности работы изоляции. При необходимости защиты изоляции с пониженным уровнем прочности на более высоком уровне надежности требуется более глубокое ограничение перенапряжений, что возможно в сети, выполненной с низкоомным резистивным заземлением нейтрали, или применение ОПН с искровым промежутком. При имеющейся возможности установки ОПН непосредственно у зажимов электродвигателя (рис.2.21 пунктиром) также будет обеспечена более высокая кратность ограничения высокочастотных перенапряжений.

ГЛАВА 3. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИЯХ НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Значительный объем экспериментальных данных по коммутационным перенапряжениям, вызванных отключением ненагруженных трансформаторов средних классов напряжений, систематизирован в [33]. В основном эти данные относятся к воздушным и масляным выключателям. Наибольшие зарегистрированные кратности составляют 4...6 о.е. и зависят главным образом от величины тока среза и параметров сети. Там же приведена методика оценки таких перенапряжений для любого типа выключателей и систематизированы результаты многочисленных экспериментов, доказывающих возможность среза тока для многих типов выключателей, а не только для вакуумных. Объем экспериментальных данных по таким коммутациям собственно для вакуумных и особенно для элегазовых выключателей невелик [25,33] и не позволяет судить о каких-либо их особенностях, которые не учитываются в расчетных методиках. Ниже, на основании компьютерного моделирования, показано, что с большой долей уверенности можно считать, что отключение установившихся токов холостого хода трансформаторов в сетях 6-10 кВ вакуумным или элегазовым выключателем в основном не вызывает опасных перенапряжений. Однако, прерывание неустановившегося тока намагничивания может привести в случае малой емкости сети со стороны трансформатора к более существенным перенапряжениям [34].

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ И ТРАНСФОРМАТОРА

При анализе коммутационных перенапряжений, связанных с отключением ненагруженных трансформаторов, использовалась расчетная схема рис. 3.1.

Схема замещения сети и трансформатора, предназначенная для расчета по программному комплексу NRAFT [6] приведена на рис. 3.2. Кабель (или шинопровод) представлен трехфазной «Т-схемой» замещения, источник питания - трехфазной эдс, индуктивностями L_c - (сети и трансформатора) и суммарной емкостью $C_{ш}$ шин или другого оборудования на левом полюсе выключателя. Используя возможности NRAFT, в математической модели трансформатора учитывались: нелинейные свойства электротехнической стали в виде типовой характеристики индукции B от напряженности магнитного поля H : $B=f(H)$; реальные размеры стержней и ярм трехстержневого магнитопровода трансформатора, а также размеры воздушных стержней (см. п.1.1 и [6]),

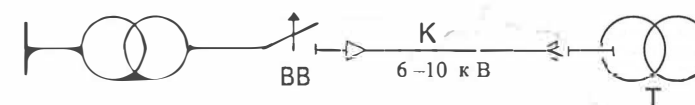


Рис. 3.1. Расчетная схема сети с трансформатором.

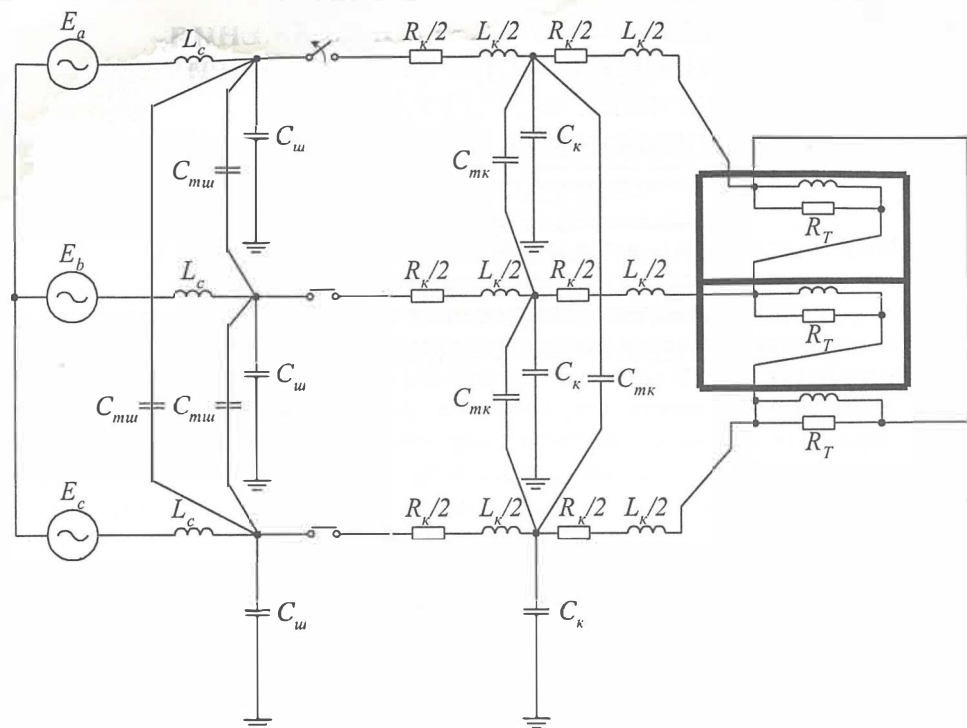


Рис. 3.2 Расчетная схема замещения трехфазной сети. При компьютерном моделировании переходных процессов, приведенных ниже, принято $E_{max}=5,4$ кВ; $L_c=6,32$ мГн; $C_{ш}=0,06$ мкФ; $C_{ми}=0,013$ мкФ; $L_k/2=0,00126$ мГн; $R_k/2=0,001$ Ом; $C_k=0,0024$ мкФ; $C_{мк}=0,03$ мкФ; $R_T=100$ кОм.

позволяющие моделировать рассеяние в межобмоточных каналах. Схема соединений обмоток трансформатора на стороне 6-10 кВ - треугольник. Учет нелинейности кривой $V=f(H)$ для стали, используемой в трансформаторах современных конструкций позволяет с достаточной точностью учесть составляющую потерь в стали трансформатора на гистерезис [33, 34]. Потери в стали на вихревые токи учитывались по каталожным данным для промышленной частоты. Определенное на основании этих данных активное сопротивление R_T включалось параллельно каждой из фаз обмотки трансформатора, соединенной в треугольник (рис. 3.2). В работе не принималось во внимание увеличение потерь на вихревые токи вследствие переходного процесса (путем введения частотно-зависимого активного сопротивления в модель трансформатора, как это сделано, например, в [34]). Учет этой частотной зависимости более актуален для схем сети с малой расчетной емкостью присоединения.

3.2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

При отключении ненагруженных трансформаторов в схеме рис. 3.1 основным «механизмом», создающим перенапряжения высокой кратности, является срез тока.

Наиболее существенными факторами, влияющими на перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов при возможном срезе тока являются: величина тока среза; емкость между выключателем и трансформатором (емкость кабеля, шинпровода или входная емкость трансформатора при отсутствии кабеля); исходный режим трансформатора, предшествующий отключению; форма кривой намагничивания трансформатора; мощность трансформатора; потери (на гистерезис и вихревые токи).

Рассматривались две расчетные коммутации: отключение ненагруженного трансформатора из установившегося режима и отключение ненагруженного трансформатора в цикле В-О, когда апериодическая составляющая потокосцепления трансформатора имеет максимальное значение.

Пример коммутации отключения первой фазы ненагруженного трансформатора напряжением 6 кВ, мощностью 400 кВА при длине кабеля 10 м и токе среза $i_{cp}=1,7$ А приведен на рис. 3.3. Здесь показан ток в одной из фаз выключателя (первой отключаемой), фазные напряжения относительно земли на полюсе выключателя со стороны сети и со стороны трансформатора и напряжение на контактах отключаемого полюса. При отсутствии повторных зажиганий дуги в выключателе перенапряжения на отключаемой фазе трансформатора в данном случае имеет вид однократного импульса амплитудой 4,67 о.е. (рис.3.3).

Диапазон амплитуд токов намагничивания трансформаторов 6-10 кВ мощностью 25...6300 кВА составляет $i_{хх,м}=0,1...7$ А (при коэффициенте формы 1,5...1,6, показывающем отношение амплитуды тока к его действующему значению). Предполагаем, что

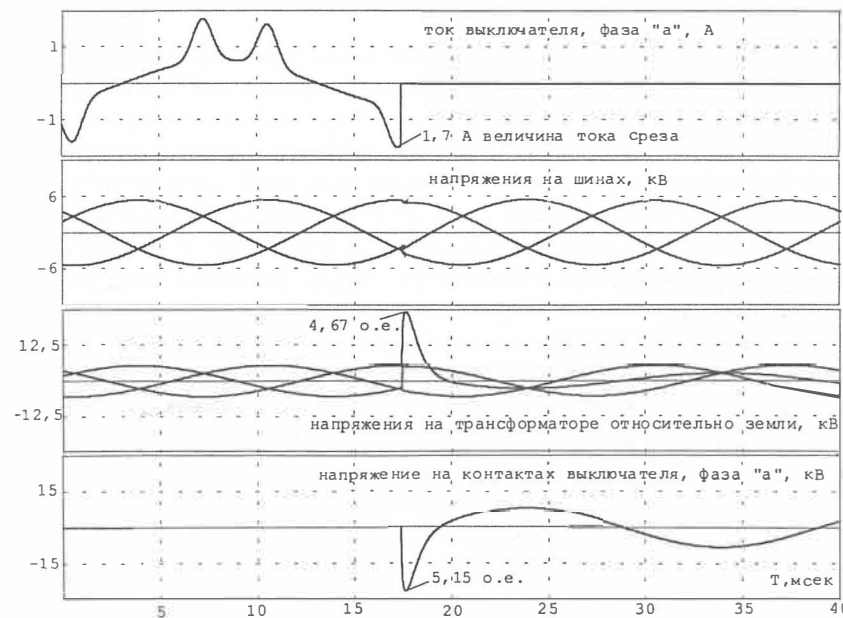


Рис. 3.3 Отключение первой фазы ненагруженного трансформатора 6 кВ мощностью $S_T=400$ кВА из установившегося режима со срезом тока величиной $i_{cp}=1,7$ А; длина кабеля $l_k=10$ м; $dU_{ог}/dt=\infty$

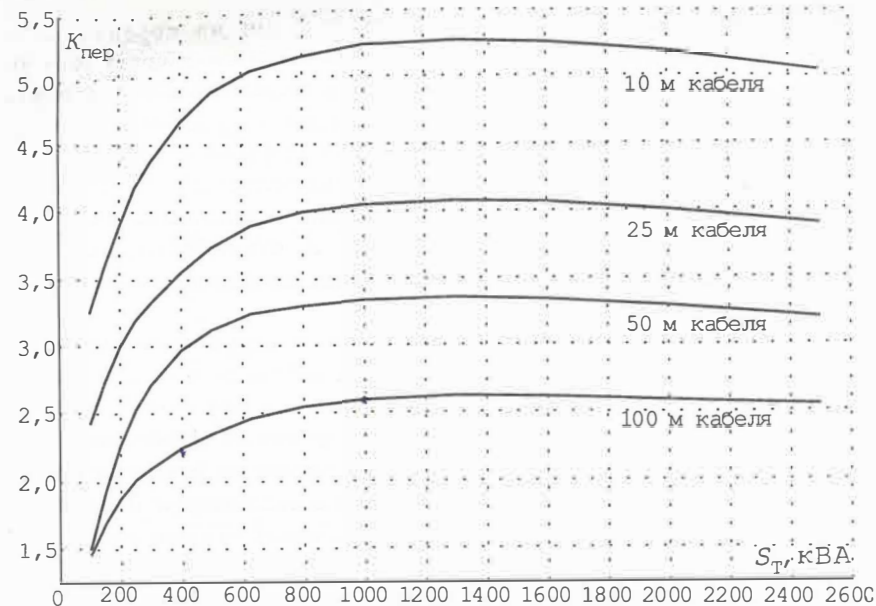


Рис. 3.4 Зависимость кратностей максимальных перенапряжений $K_{пер}$ на трансформаторе от мощности трансформатора и длины кабеля при срезе тока холостого хода на максимуме (но не более 5 А).

максимальное значение тока среза $i_{ср} \leq 5$ А, и что в наихудшем случае срез происходит вблизи максимума тока холостого хода. Зависимость кратностей перенапряжений при варьировании величины тока среза $i_{ср}$, длины кабеля $l_{каб}$ и мощности трансформатора S_T можно получить из рис. 3.4, где приведены результаты расчетов подобных рис. 3.3.

Как видно из рис. 3.4 кратность перенапряжений растет с мощностью трансформатора (при неизменной длине кабеля) т.к. растет максимально возможный ток среза (из-за увеличения тока намагничивания трансформатора). Однако здесь играют роль потери холостого хода трансформатора, также увеличивающиеся с ростом мощности, поэтому зависимость $K_{пер}$ от мощности имеет нелинейный характер. Увеличение длины кабеля, очевидно, снижает кратность перенапряжений. Если ориентироваться на одноминутное испытательное напряжение трансформаторов 6-10 кВ, равное примерно 6...7 кратному номинальному амплитудному фазному напряжению для масляных трансформаторов и 4...5 кратному для сухих трансформаторов, то из рис. 3.4 видно, что например при длине кабеля, питающего трансформатор $l_k > 25$ м, такая коммутация неопасна для трансформаторов любой мощности и типа. В других случаях (для сухих трансформаторов и при малой длине кабеля) со стороны трансформатора или на трансформаторе должны быть установлены ОПН.

Несколько другая картина имеет место при редкой коммутации отключения ненагруженного трансформатора с неустановившимся током намагничивания, который многократно превышает его установившееся значение, рис. 3.5. Здесь на поле тока выключателя показан возможный диапазон Δt моментов начала движения контактов выключателя, при котором ток $i_{откл}$ в этот момент больше возможного тока среза — $i_{откл} > i_{ср}$.

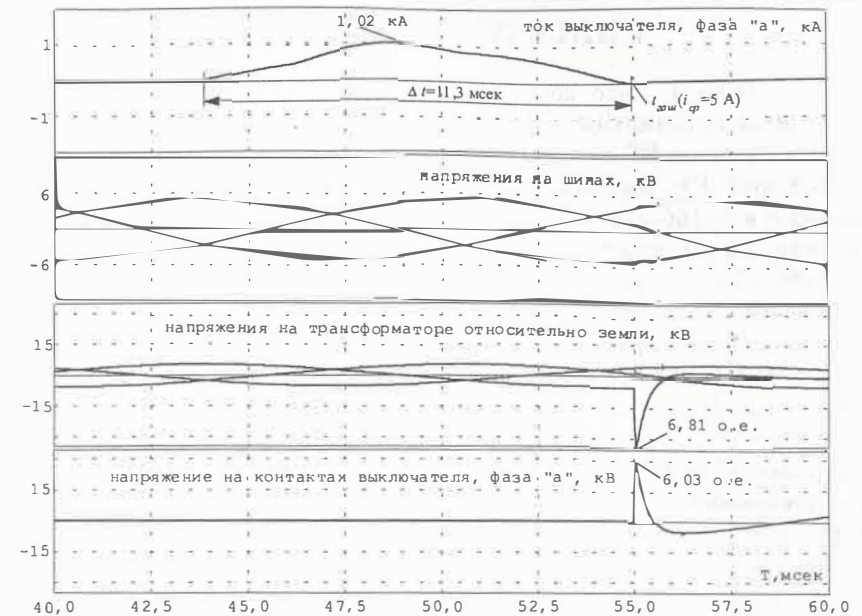


Рис. 3.5 Отключение первой фазы ненагруженного трансформатора 6 кВ мощностью 400 кВА из неустановившегося режима со срезом тока $i_{ср} = 5$ А, кабель длиной $l_k = 10$ м, $dU_{от}/dt = \infty$ кВ/мсек.

Иными словами — мгновенное значение неустановившегося тока в течение $\Delta t = 11,3$ мсек превышает ток среза. Таким образом, гашение дуги не происходит вплоть до момента $t_{гаш}$, когда мгновенное значение тока выключателя становится меньше тока среза $i_{ср}$ (рис. 3.5). Если момент начала движения контактов попадает в начало интервала Δt , то к моменту $t_{гаш}$ прочность межконтактного промежутка становится большой, и срез тока не приводит к повторным зажиганиям, при этом возникает однократный значительный импульс перенапряжения (см. рис. 3.5, где $U_{max} \approx 6,8$, здесь мы предполагаем, что срез тока возможен при любом межэлектродном расстоянии вакуумного выключателя).

В случае, когда начало движения контактов окажется относительно близко к моменту среза тока и восстанавливающаяся электрическая прочность межконтактного промежутка будет недостаточной для того, чтобы выдержать восстанавливающееся напряжение, может произойти несколько повторных зажиганий дуги в выключателе, сопровождающихся снижением максимальной кратности перенапряжений.

ГЛАВА 4. КОММУТАЦИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Известно [40,41], что коммутации конденсаторных батарей (КБ) являются потенциальным источником опасных сверхтоков и перенапряжений. Коммутации включения единичной КБ на шины системы и подключения параллельно работающей дополнительной КБ вызывают опасные переходные сверхтоки превышающие номинальные в 5..100 раз. Последние являются причиной возникновения опасных перенапряжений в удаленных точках сети и в сетях более низких напряжений.

Коммутация отключения КБ наиболее опасна т.к. может явиться причиной эскалации перенапряжений в том случае, если процесс отключения сопровождается повторными зажиганиями дуги в выключателе. Тогда каждое повторное зажигание дуги опасно не только возникающими перенапряжениями в сети, но и большими переходными токами, сопутствующими повторным пробоям межконтактного промежутка в выключателе.

Отключение конденсаторных батарей рассмотрим в простейшей однолинейной схеме сети, изображенной на рис. 4.1, где показан источник питания, представленный неизменной ЭДС за индуктивностью сети и трансформатором, коммутируемая конденсаторная батарея (КБ) и другие присоединения на секции питания. Трехфазная схема замещения этой сети представлена на рис. 4.2, где e_a, e_b, e_c - неизменные фазные ЭДС, L - индуктивность трансформатора и сети, $L_{КБ}$ - индуктивность КБ для ограничения переходного тока при ее включении, C_{Σ} - суммарные емкости фаза-земля кабельных присоединений других нагрузок на секции, C - фазные емкости конденсаторной батареи при их соединении в звезду с изолированной нейтралью. Для выключателя показано положение при одной отключенной фазе.

Для рассматриваемой схемы рис. 4.2 из граничного условия $i_a=0$ и баланса токов $i_b+i_c=0$ следует, что несмотря на продольную несимметрию, источник питания имеет симметричную нагрузку и, следовательно, $u_{NC}=0$. Определим далее напряжение на

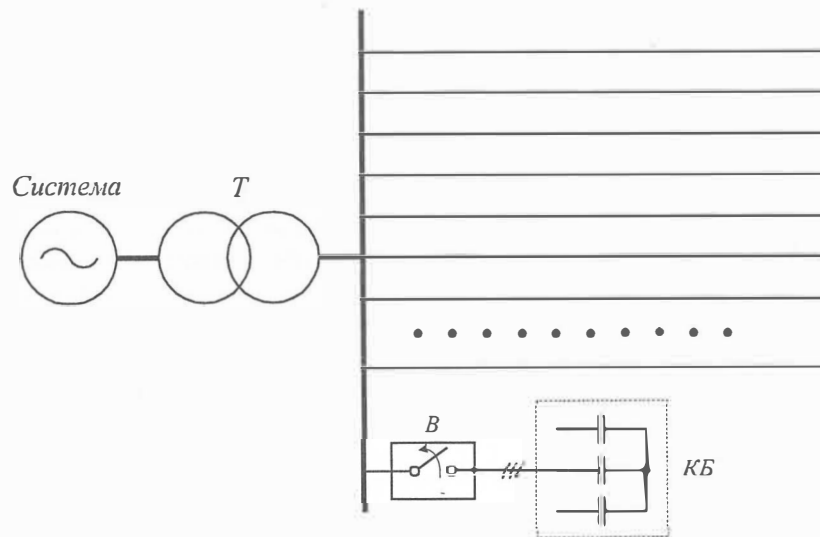


Рис. 4.1 Принципиальная схема сети с коммутируемой конденсаторной батареей

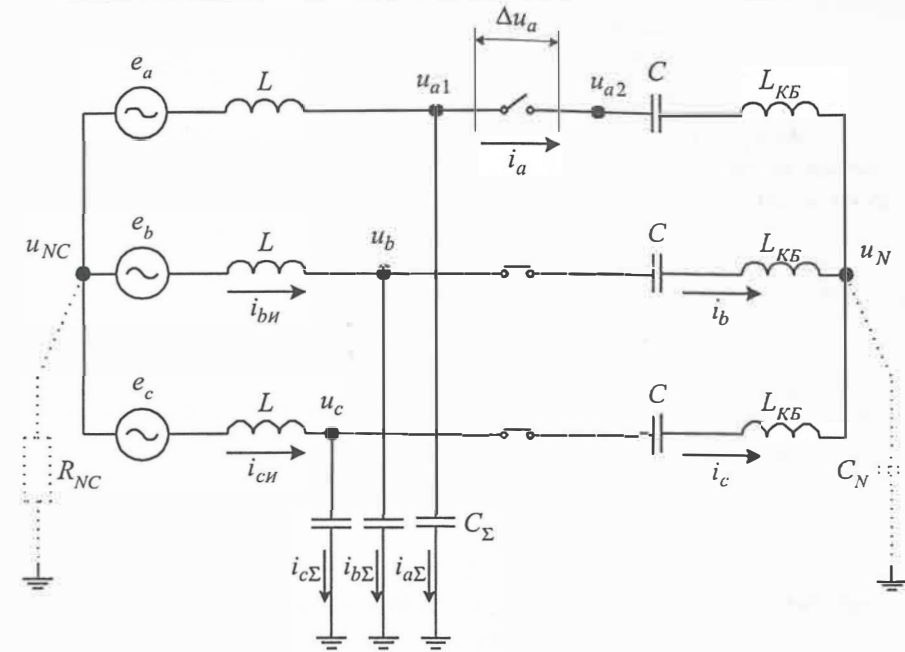


Рис. 4.2 Расчетная схема замещения трехфазной сети. При компьютерном моделировании переходных процессов, приведенных ниже, принято: $R_{NC}=10^9$ Ом; $E_{max}=8,16$ кВ; $L=6,54$ мГн; $C_{\Sigma}=0,3$ мкФ; $L_{КБ}=10$ мГн; $C=100$ мкФ; $C_N=0,03$ мкФ;

элементах схемы при переходном процессе отключения одной фазы выключателя. Пренебрежем индуктивностями $L, L_{КБ}$ для этого процесса.

Напряжение \bar{U}_c на любой емкости схемы C рис. 4.2 запишем в операторном виде :

$$\bar{U}_c = \frac{\bar{I}}{pC} + \frac{u_c(0)}{p}$$

или

$$pC\bar{U}_c = \bar{I} + Cu_c(0)$$

где $\bar{U}_c \doteq u_c, \bar{I} \doteq i$ - изображения напряжения на емкости и тока в ней, $u_c(0)$ - начальное напряжение на емкости.

Изображения токов в конденсаторной батарее :

$$\bar{I}_b = pC(\bar{U}_b - \bar{U}_N) - C[u_b(0) - u_N(0)] \tag{4.1}$$

$$\bar{I}_c = pC(\bar{U}_c - \bar{U}_N) - C[u_c(0) - u_N(0)]$$

где $\bar{U}_N \doteq u_N$ - изображение напряжения на нейтрали КБ, $u_b(0), u_c(0), u_N(0)$ - начальные значения напряжений на фазах „ b “ и „ c “ относительно земли и начальное напряжение на нейтрали КБ в момент прерывания тока в фазе „ a “ выключателя

Граничное условие в изображениях :

$$\bar{I}_a = 0$$

Баланс токов в нейтрали КБ в изображениях :

$$\bar{I}_b + \bar{I}_c = 0 \quad (4.2)$$

Складываем уравнения (4.1) и приравниваем сумму нулю согласно (4.2), а также используем очевидные уравнения узловых напряжений со стороны источника:

$$\bar{U}_b = \bar{E}_b + \bar{U}_{NC}, \bar{U}_c = \bar{E}_c + \bar{U}_{NC} \text{ и } \bar{E}_a + \bar{E}_b + \bar{E}_c = 0$$

где \bar{U}_{NC} – изображение напряжения на нейтрали сети.

В результате получим изображение напряжения на нейтрали КБ :

$$\bar{U}_N = -\frac{\bar{E}_a}{2} + \bar{U}_{NC} + \frac{u_a(0) - 2u_N(0)}{2p}$$

Учитывая, как было показано ранее, что $\bar{U}_{NC} = 0$ и в момент коммутации $u_N(0) = 0$, получим оригинал напряжения u_N :

$$u_N(t) = -\frac{1}{2}[e_a(t) - u_a(0)] \quad (4.3)$$

Найдем напряжение относительно земли на отключенной фазе (со стороны КБ). Искомое напряжение в изображении определим из уравнения :

$$pC[\bar{U}_{a2} - \bar{U}_N] = \bar{I}_a + C[u_a(0) - u_N(0)]$$

Используем равенства $\bar{I}_a = 0$ и $u_N(0) = 0$ и получим с помощью (4.3) оригинал напряжения u_{a2} :

$$u_{a2}(t) = -\frac{1}{2}[e_a(t) - 3u_a(0)] \quad (4.4)$$

И, наконец, напряжение на контактах разомкнутой фазы :

$$\Delta u_a = u_{a1} - u_{a2} = \frac{3}{2}[e_a(t) - u_a(0)] \quad (4.5)$$

На основании полученных выражений (4.3), (4.4), (4.5) можно сделать предварительные выводы о наибольших значениях напряжений, имеющих место на этапе отключения первой фазы выключателя. В условиях, когда отключению первой фазы предшествует симметричный режим напряжений u_a, u_b, u_c практически равных фазным ЭДС e_a, e_b, e_c в момент нулей тока соответствующие напряжения, естественно, имеют максимальные значения (например, для фазы „а“ имеем : $e_a(t=0) = E_m = u_a(0)$, где E_m – амплитуда ЭДС). Спустя половину периода промышленной частоты (в том случае, если разброс в моментах отключения фаз более этой величины) напряжение на нейтрали - u_N становится равным фазному (см.(4.3)), где $e_a(t=0.01c) = -E_m$ и $u_N(t=0.01c) = +E_m$. На основании (4.4) и (4.5) напряжение на КБ отключенной фазы относительно земли становится равным $u_{a2}(t=0.01c) = 2E_m$, напряжение на контактах отключенной фазы $\Delta u_a(t=0.01c) = 3E_m$. Полученные результаты весьма близко соответствуют данным компьютерного моделирования (рис. 4.3), которое выполнено с учетом потерь в схеме, $L \neq 0$ $L_{KB} \neq 0$ и при реальных емкостных и активных проводимостях в нейтрали КБ и сети (см. пункт на рис. 4.2). Так напряжение на отключаемой фазе достигает значения 2,23

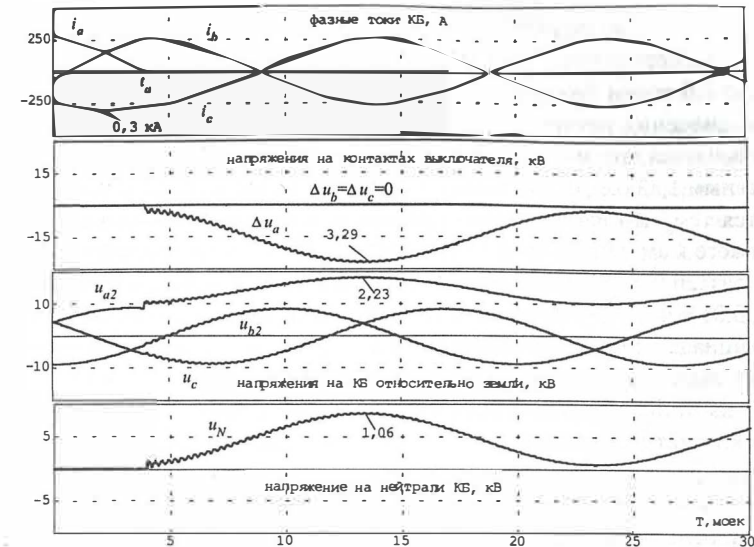


Рис.4.3 Отключение одной фазы конденсаторной батареи ($i_{a,b,c}$ – токи выключателя, $\Delta u_{a,b,c}$ – напряжения на контактах выключателя, $u_{a,b,c}$ – напряжения на КБ относительно земли, u_N – напряжение на нейтрали КБ, t_a – момент отключения первой фазы КБ). Напряжения даны в о.е., в долях амплитуды фазного напряжения сети 10 кВ ($E_{max} = U_{6a3} = 8,16$ кВ).

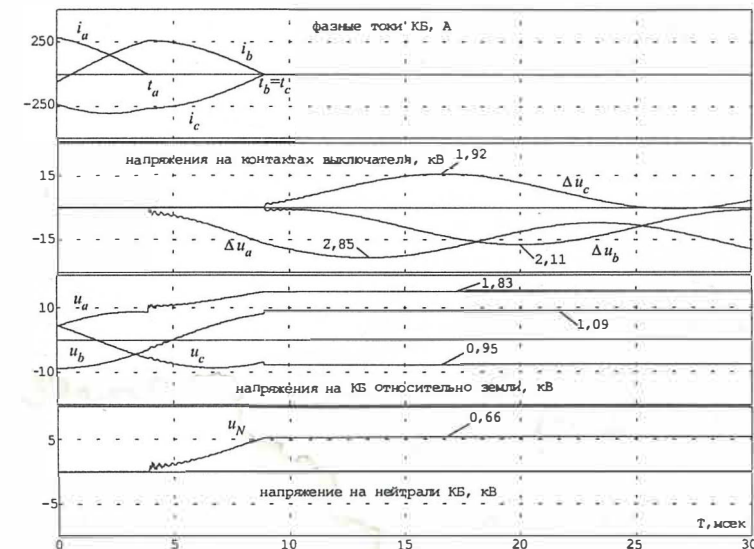


Рис. 4.4 Отключение конденсаторной батареи тремя фазами (t_a, t_b, t_c – моменты отключения фаз выключателя, $i_{a,b,c}$ – токи выключателя, $\Delta u_{a,b,c}$ – напряжения на контактах выключателя, $u_{a,b,c}$ – напряжения на КБ относительно земли, u_N – напряжение на нейтрали КБ). Напряжения даны в о.е., в долях амплитуды фазного напряжения сети 10 кВ ($E_{max} = U_{6a3} = 8,16$ кВ).

о.е., а напряжение на контактах выключателя 3,29 о.е.. Полученные результаты также весьма близки к экспериментальным данным, например, опубликованным в [42].

Отключение КБ всеми фазами в естественной последовательности переходов токов фаз через нулевые значения несколько снижает остающиеся напряжения на фазах КБ и на контактах выключателя, что можно видеть на рис.4.4. Здесь напряжение на отключенной фазе КБ остается равным 1,83 о.е., напряжение на контактах имеет максимальное значение 1,92 о.е.. Это объясняется тем, что напряжение на нейтрали КБ не достигает своего максимального значения (близкого к амплитуде фазной ЭДС), что, в свою очередь, происходит из-за того, что переход токов фаз „b“ и „с“ через нулевые значения (после фазы „a“) происходит за время меньше, чем 0.01 сек (через 90° или через 0.005 сек). Полное отключение КБ приводит к фиксации потенциала нейтрали и напряжений u_a, u_b, u_c на стороне КБ в этот момент (далее эти напряжения меняются только вследствие саморазряда КБ).

Как видно из приведенных осциллограмм, скорость восстановления напряжения на контактах выключателя даже с учетом реальных последовательных индуктивных элементов (индуктивности L питающей сети, токоограничивающих индуктивностей $L_{кб}$) весьма мала (переходное восстанавливающееся напряжение в основном содержит постоянную составляющую и основную гармонику сети – выражение (4.5)).

В принципе, как следует из рис. 4.3, возможность повторного зажигания дуги в первой отключаемой фазе „a“ все же имеется в том случае, если момент начала движения

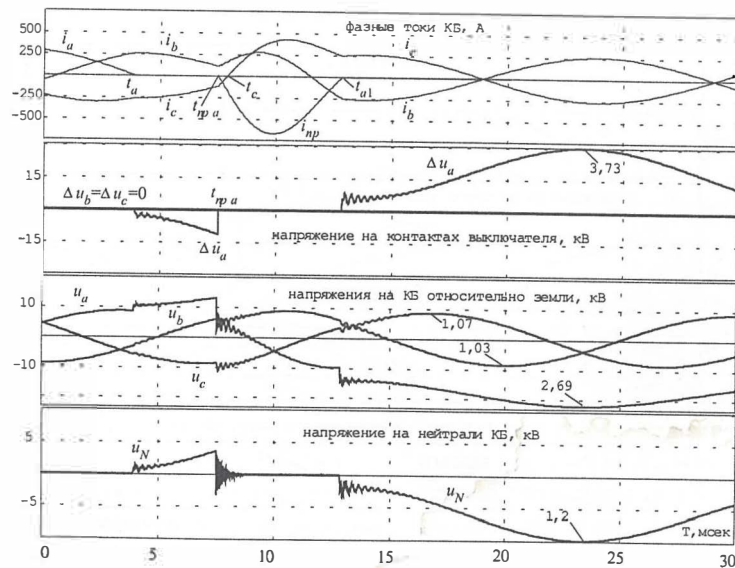


Рис.4.5 Отключение одной фазы конденсаторной батареи при однократном повторном зажигании дуги в первой отключаемой фазе (t_a - момент отключения первой фазы КБ, $t_{пра}$ - момент повторного зажигания дуги в фазе «а» выключателя, $t_{а1}$ - момент гашения тока пробоя фазы «а», $i_{a,b,c}$ - токи выключателя, $\Delta u_{a,b,c}$ - напряжения на контактах выключателя, $u_{a,b,c}$ - напряжения на КБ относительно земли, u_N - напряжение на нейтрали КБ). Напряжения даны в о.е., в долях амплитуды фазного напряжения сети 10 кВ ($E_{max} = U_{faz} = 8,16$ кВ).

контактов был весьма близок к моменту „ t_a “, когда межконтактное расстояние невелико и скорость восстановления диэлектрической прочности этого промежутка мала.

Так на рис. 4.5 показан процесс повторного зажигания дуги в момент времени $t_{пра}$, когда начало движения контактов $t_{откл}$ было весьма близко к моменту t_a , а скорость восстановления диэлектрической прочности 1,5 кВ/мсек. Второй и последующие пробои становятся практически невозможными ввиду того, что ток в выключателе содержит составляющую промышленной частоты и следующий переход тока через нуль $t_{а1}$ наступает уже при большом межконтактном расстоянии. Как видно из сравнения рис.4.3 и 4.5, возможный однократный пробой несколько увеличивает максимальное напряжение на КБ (2,69 о.е. по сравнению с 2,23 о.е. на рис. 4.3) и создает в момент пробоя высокочастотный ток, который может создать опасные перенапряжения на других элементах сети. Рассмотренный механизм, ведущий к повторному зажиганию дуги, практически невозможен в случае вакуумного выключателя, но может иметь место при коммутации элегазовых выключателей.

Относительно медленное нарастание электрической прочности межконтактного промежутка, свойственное элегазовым выключателям, все-таки может привести к значительным перенапряжениям даже при однократном пробое межконтактного промежутка выключателя. Так на рис. 4.6 показан процесс отключения всех трех фаз выключателя и повторный пробой в первой отключаемой фазе „a“ в момент $t_{пра}$, соответствующий максимальному напряжению на контактах $\Delta u_{a,max}$, при этом скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка не превышает 2кВ/мсек.

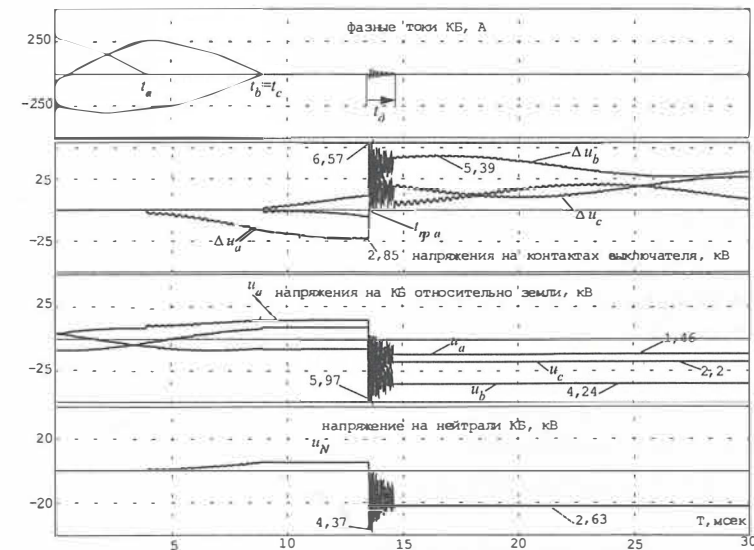


Рис. 4.6 Отключение конденсаторной батареи тремя фазами с однократным повторным пробоем в первой отключаемой фазе в момент максимума напряжения на контактах фазы «а» выключателя (t_a, t_b, t_c - моменты отключения фаз выключателя, t_a - время горения дуги, $i_{a,b,c}$ - токи выключателя, $\Delta u_{a,b,c}$ - напряжения на контактах выключателя, $u_{a,b,c}$ - напряжения на КБ относительно земли, u_N - напряжение на нейтрали КБ). Напряжения даны в о.е., в долях амплитуды фазного напряжения сети 10 кВ ($E_{max} = U_{faz} = 8,16$ кВ).

В данном примере время горения дуги после повторного пробоя (t_D – рис. 4.6) составило 1,2 мсек и ее гашение произошло при скорости подхода тока к нулю 0,5 А/мксек, что характерно для элегазовых выключателей. При этом возникают существенные перенапряжения на всех элементах сети. Так напряжение на нейтрали имеет пик 4,37 о.е., фазное напряжение на КБ относительно земли достигает 5,97 о.е., пик напряжения на контактах выключателя 6,57 о.е. Те же напряжения после гашения дуги в выключателе снижаются после затухания высокочастотных составляющих и не превышают $u_{N, \text{фаз. макс.}} = 4,2$, $\Delta u_{K, \text{ макс.}} = 5,39$, но остаются большими соответствующих значений до первого пробоя, то есть создают опасность для повторных пробоев и эскалации перенапряжений.

Заметим, что возможность пробоев и эскалации перенапряжений становится еще более реальной и опасной, если коммутация осуществляется при наличии в сети однофазного замыкания.

Как видно из рис. 4.6, если бы повторный пробой завершился более быстрым гашением тока (через 1-3 полуволны высокочастотного тока), что более свойственно вакуумным выключателям, то напряжение на нейтрали, на КБ и на контактах выключателя были бы значительно больше – они были бы равными максимальным отмеченным на рис. 4.6 значениям и потенциальная опасность многократных повторных пробоев возросла, следовательно, возросла бы опасность эскалации перенапряжений. Однако, здесь более важным является фактор более быстрого роста диэлектрической прочности межконтактного промежутка в вакуумном выключателе и поэтому следует считать, что он менее склонен к отключению КБ с единичными или повторными пробоям и, следовательно, менее склонен к эскалации перенапряжений, чем элегазовый. Дополнительным благоприятным обстоятельством применения вакуумных выключателей для коммутации конденсаторных батарей является малый контактный износ при коммутации больших переходных токов КБ вследствие низковольтной дуги между его контактами [43].

ВЫВОДЫ

1. Токи среза современных вакуумных и элегазовых выключателей примерно сопоставимы, а, следовательно, максимальные перенапряжения, создаваемые ими в процессе отключения малых токов ненагруженных трансформаторов не могут отличаться в значительной степени.
2. Объем экспериментальных данных по скорости восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка элегазовых выключателей после отключения ими малых индуктивных и емкостных токов явно недостаточен (по сравнению с таковым для вакуумных выключателей). Некоторая уверенность есть только в том, что она ниже, чем у вакуумных выключателей. Неизвестна также способность элегазовых выключателей гасить высокочастотные токи, сопровождающие переходный процесс отключения малых индуктивных токов нагрузки при повторных зажиганиях дуги в выключателе. Поэтому можно предположить, что, как правило, процесс отключения малых индуктивных токов элегазовыми выключателями будет сопровождаться меньшим числом повторных зажиганий, чем это имеет место в подобном случае при работе вакуумного выключателя.
3. Вследствие более высокой скорости восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка вакуумные выключатели имеют несомненное преимущество перед элегазовыми при отключении ими ненагруженных линий (воздушных и кабельных) и мощных конденсаторных батарей.
4. Для изоляции высоковольтных двигателей, с очень малой вероятностью может быть опасной коммутация отключения заторможенного электродвигателя, при которой возникают повторные зажигания дуги в выключателе. С большей вероятностью опасные воздействия на изоляцию электродвигателей (не зависящие от типа выключателя) имеют место при коммутации включения (нормальный пуск, автоматический ввод резерва, автоматическое повторное включение), а также при срезе напряжения, вызванном однофазными, двойными и многофазными пробоями изоляции в сети.
5. Принудительное ограничение перенапряжений, воздействующих на изоляцию высоковольтных электродвигателей необходимо при использовании выключателей любого типа: элегазовых, вакуумных и даже маломасляных. Наиболее совершенными аппаратами, которые могут применяться для этой цели, являются ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ КО ВТОРОЙ ЧАСТИ

1. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986 г.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е, Москва, 1996г.
3. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. (IEE std 142-1991), Published by the IEEE inc., NJ, 1992.
4. Gary N. Wang, William M. Moffart, Laslie J. Vegh, Frank J. Veicht. High-resistance grounding and selective ground fault protection for a major industrial facility. IEEE Trans. on IA, vol. IA-20, № 4, 1984.
5. Васюра Ю. Ф., Гамилко В. А.; Евдокунин Г. А., Утегулов Н. И. Защита от перенапряжений в сетях 6-10 кВ. Электротехника, № 5/6, 1994.
6. Методы расчета на ЭВМ электромагнитных переходных процессов в ферромагнитных устройствах с произвольной структурой магнитной и электрической цепей / Г. А. Евдокунин, Е. В. Коршунов, В. А. Сеппинг, Я. Я. Ярвик // Электротехника, 1991, № 2.
7. Бики М. А., Бродовой Е. Н., Брянцев А. М., Лейтес Л. В., Лурье А. И., Чижевский Ю. Л. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах. Электротехника, № 6, 1994, с. 1-10.
8. Interruption of small inductive currents: Chapter 3, Part A. Electra, № 75, 1981, p. 16-17.
9. I. Kano, T. Hakamada, Y. Kurosawa. Switching surge phenomena in induction motor windings and their endurance. Hitachi Review, vol 24, № 5, 1975, p. 225-232.
10. N. Ueno, H. Toya, Y. Murai. Monte-Carlo simulation of overvoltage generation in the inductive current interruption by vacuum interrupters. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, № 3, March 1984, p. 498-504.
11. E. Colombo, G. Costa, I. Piccarreta. Results of an investigation on the overvoltages due to a vacuum circuit breaker when switching an H.V. motor. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, № 1, Jan 1988, p. 205-213.
12. S.H.Telander, M.R.Wilhelm, K.B.Stump. Surge limiters for vacuum circuit breaker switchgear. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.2, № 1, January 1987.
13. A.N.Greenwood, D.R.Kurtz, J.C.Sofianek. A guide to the application of vacuum circuit breakers. IEEE Transaction on Power Application and Systems, Vol. 90, № 3, 1971.
14. K.Yokokura, S.Masuda, H.Nishikava. Multiple restriking voltage effect in a vacuum circuit breaker on motor insulation. "IEEE Trans. on PAS", Vol. PAS-100, № 4, April 1981.
15. A.T.Roguski. Experimental investigation of the dielectric recovery strength between the separating contacts of vacuum circuit breakers. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, № 2, April 1989.
16. J.F.Perkins, D.Bhasavanich. Vacuum switchgear application study with reference to switching surge protection. IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 19, № 5, September 1983, p. 879-888.
17. J.D.Gibbs, D.Koch, Dr. P.Malkin, K.J.Cornick. Comparison of performance of switching technologies on E CIGRE motor simulation circuit. "IEEE Transaction on Power Delivery", Vol. 4, № 3, July 1989.
18. Y. Matsui, T. Yokoyama, E. Umeya. Reignition current interruption characteristics of the vacuum interrupters. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, № 4, Oct 1988, p. 1672-1677.

19. R.L.Naclen. Transient surges and motor protection. IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-15, № 6, Nov/Dec 1979.
20. Impulse voltage strength of AC rotating machines /IEEE Working Group progress report/. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS - 100, № 8, Aug 1981.
21. I.E.Harder. Metal oxide arrester ratings for rotating machine protection. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS - 104, № 9, Sept 1983.
22. Васюра Ю.Ф., Гавриков В.И., Евдокунин Г.А.. Коммутационные перенапряжения на высоковольтных двигателях собственных нужд электростанций. Электротехника, № 12, 1984.
23. Васюра Ю.Ф., Евдокунин Г.А.. Коммутационные перенапряжения при самозапуске высоковольтных двигателей. Электротехника, № 9, 1985.
24. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А.. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. Электричество, №12, 1998.
25. Базуткин В.В., Евдокунин Г.А., Халилов Ф.Х., Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями. Электричество, № 2, 1994.
26. Беляков Н.Н. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями. Электрические станции, № 9, 1994.21. Васюра Ю.Ф., Гамилко В.А., Евдокунин Г.А., Утегулов Н.И. Защита от перенапряжений в сетях 6-10 кВ. Электротехника, № 5/6, 1994.
27. Кузьмичева К.И., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л.. Ограничение перенапряжений при отключении вакуумными выключателями пусковых токов электродвигателей с помощью ОПН. Электрические станции, №4, 1996.
28. Евдокунин Г.А., Поляков В.С., Подпоркин Г.В., Таджибаев А.И., Халилов Ф.Х.. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. Петербургский энергетический институт повышения квалификации, 1997.
29. Васюра Ю.Ф., Вильнер А.В., Виткин А.Л., Евдокунин Г.А., Новоселов Н.А., Розет В.Е. Защита сети собственных нужд электростанций нелинейными ограничителями перенапряжений. Электрические станции, № 4, 1989, с. 32-35.
30. Surge arrester selection guide. ABB HV Switchgear AB.
31. Нормы испытаний электрооборудования. Изд. пятое. М.: Атомиздат, 1978.
32. P.A.Zotos. Motor failures due to steep fronted switching surges: The need for surge protection — user "s experience. IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 30, № 6, Nov 1994.
33. Interruption of small inductive currents: Chapter 5: Switching of unloaded transformers, Part 2, Electra, № 134, 1991, p. 29, 34.
34. Interruption of small inductive currents: Chapter 5: Switching of unloaded transformers, Part 1, Electra, № 133, 1991.
35. P.G. Slade. Vacuum Interrupters: The New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, № 6, Nov/Dec 1997.
36. D.L. Swindler. A Comparison of Vacuum and SF₆ Technologies at 5-38 kV. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, № 5, Sept/Oct 1984.
37. J.D. Gibbs, D.Koch, Dr. P.Malkin, K.J.Cornick. Investigations of Prestriking and Current Chopping in Medium Voltage SF₆ Rotating Arc and Vacuum Switchgear. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, № 1, Jan. 1989.

38. J.Kosmac, P.Zunko. A Statistical Vacuum Circuit Breaker Model for simulation of Transient Overvoltages. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, № 1, Jan. 1995.
39. A.T.Roguski. Laboratory Test Circuits for Predicting Overvoltages When Interrupting Small Inductive Currents with an SF₆ Circuit Breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, № 3, May/June 1980.
40. Capacitive current switching - state of art. Electra, № 155, 1994.
41. Shunt capacitor bank switching. Stresses and test methods (first part). Electra, № 182, 1999.
42. H. Nishikawa, K. Yokokura, S. Matsuda. A method of evaluating a circuit breaker for a capacitor bank and suppression of restriking overvoltages. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, № 6, June 1983.
43. K. Yokokura, S. Matsuda, K. Atsumi, Capacitor switching capability of vacuum interrupters with CuW contact material. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, № 2, April 1995.



ISBN 5-93076-049-7



9 785930 760491