

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

**КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие

МОСКВА - 2009

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология
и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

**КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ**

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия для студентов
электротехнических специальностей

Москва - 2009

УДК 621.315.5

К-28

Касаткин Г.С., Федотов В.В. Контроль изоляции электротехнических устройств: Учебное пособие.- М.:МИИТ, 2009. – 56 с.

В учебном пособии рассмотрены изоляция и элементы конструкции различных электротехнических устройств: изоляторов силовых кабелей, конденсаторов и высоковольтных трансформаторов; описаны основные виды старения изоляции и возникающие в ней дефекты; приведены основные методы контроля изоляции электрооборудования

Рецензенты: д.т.н. Ю.Н. Львов ВНИИЭ
д.т.н. С.П. Власов МИИТ

**© Московский государственный
университет путей сообщения
(МИИТ), 2009**

Св. план 2009г., поз.35

Подписано к печати:
усл.-печ.л.
Заказ:

Формат: 60x84/16
Тираж 150 экз.

127994, Москва, ул.Образцова, д.9, стр.9
Типография МИИТа

1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

1.1. Изоляция и конструкция изоляторов

Диэлектрики, из которых изготавливаются изоляторы, должны обладать высокой механической прочностью, поскольку изоляторы, являясь элементом конструкции, несут значительную нагрузку. Изоляторы линий электропередачи, например, несут нагрузку от тяжения проводов, исчисляемую тоннами, а иногда и десятками тонн. Опорные изоляторы, на которых крепятся шины распределительных устройств, выдерживают громадные нагрузки от электродинамических сил, возникающих между шинами при коротких замыканиях.

Диэлектрики должны иметь высокую электрическую прочность, позволяющую создавать экономичные и надежные конструкции изоляторов.

Диэлектрики должны быть негигроскопичны и не должны изменять своих свойств под действием различных метеорологических факторов. При неблагоприятных условиях (дождь, увлажненные загрязнения) на поверхностях изоляторов, устанавливаемых на открытом воздухе (изоляторов наружной установки), могут возникать частичные электрические дуги. Под их действием поверхность может обугливаться и на ней могут появляться проводящие следы — треки, снижающие электрическую прочность изоляторов. Поэтому диэлектрики для изоляторов наружной установки должны обладать высокой трекинговой стойкостью.

Всем указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют глазурированный электротехнический фарфор и стекло, получившие широкое распространение, а также некоторые пластмассы.

Электрическая прочность фарфора в однородном поле при толщине образца 1,5 мм составляет 30—40 кВ/мм и уменьшается при увеличении толщины. Электрическая прочность стекла при тех же условиях — 45 кВ/мм.

Стекло по механической прочности не уступает фарфору и тоже лучше всего работает на сжатие. Стекланные подвесные изоляторы тарельчатого типа для линий электропередачи изготавливаются на нагрузки до 530 кН.

Изоляторы из закаленного стекла имеют ряд преимуществ перед фарфоровыми: технологический процесс их изготовления полностью автоматизирован; прозрачность стекла позволяет легко обнаружить

при внешнем осмотре мелкие трещины и другие внутренние дефекты; повреждение стекла приводит к разрушению диэлектрической части изолятора, которое легко обнаружить при осмотре линии электропередачи эксплуатационным персоналом.

Еще большими преимуществами по сравнению с изоляторами из стекла и фарфора обладают полимерные изоляторы. Применение полимерных материалов в устройствах контактной сети электрифицированных железных дорог является одним из направлений технического прогресса на железнодорожном транспорте. Полимерные изоляторы имеют следующие преимущества: технологичность, малая масса, компактность, простота монтажа, высокая механическая прочность к ударным воздействиям, большая долговечность, надежность и экономичность. Незаменимыми оказываются полимерные изолирующие материалы при монтаже контактных подвесок в искусственных сооружениях с ограниченными габаритами.

Полимерная изоляция контактной сети в большинстве случаев изготавливается комбинированной: одни материалы, например стеклопластиковые стержни, воспринимают механические нагрузки, а другие, в виде защитной оболочки, обеспечивают электрическую прочность.

Стеклопластики состоят из стеклянной арматуры (нитей, лент или тканей) и полимерного связующего на основе полиэфирных, эпоксидных, кремнийорганических и других синтетических смол. Полимерные связующие в стеклопластиках выполняют роль клеящей среды, объединяющей стеклянные волокна в монолитное изделие. На электрифицированных железных дорогах в полимерных изоляторах и изолирующих элементах используются стеклопластиковые стержни диаметром 14—55 мм.

Материал защитной оболочки полимерных стержневых изоляторов должен обладать высокой трекингоэрозионной стойкостью, дугостойкостью, устойчивостью к гидролизу, агрессивным средам и ультрафиолетовому облучению. Этим показателям удовлетворяет политэтрафторэтилен (фторопласт-4), кремнийорганические резины (эластомеры) и этиленпропиленовые материалы. В применяемых на электрифицированных железных дорогах полимерных изоляторах защитные оболочки в основном выполняются из кремнийорганической резины.

Для защиты стеклопластика от проникновения влаги и исключения частичных разрядов в пустотах, образующихся между составными частями изолятора при сборке, используют различные герметизирующие и клеящие материалы: эпоксидные компаунды, кремнийорганические пасты, вазелины, силиконовые компаунды холодного отверждения. Применение полимерных изоляторов на ЛЭП позволяет существенно уменьшить массу подвесных изоляторов и заменить гирлянду изоляторов одним.

Применяют изоляторы двух типов: линейные и аппаратные.

Линейные изоляторы применяются для подвески проводов в ЛЭП, контактной сети и гибких шин в открытых распределительных устройствах. По конструктивному исполнению изоляторы для ЛЭП делятся на штыревые и подвесные. Подвесные изоляторы делятся на тарельчатые и стержневые. Изоляторы для контактной сети делятся по назначению на подвесные, натяжные, фиксаторные и консольные и изолирующие элементы.

Подвесной стеклянный тарельчатый изолятор типа ПС 120-Б

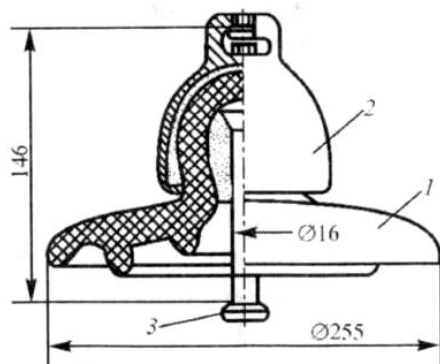


Рис.1

На рис.1 приведена конструкция стеклянного тарельчатого изолятора типа ПС 120-Б. Изолятор предназначен для изоляции и крепления к поддерживающим конструкциям проводов контактной сети и ВЛ. Условное обозначение расшифровывается следующим образом: П — подвесной, С — стеклянный, 120 — класс изолятора (механическая разрушающая сила при растяжении, кН), Б — модификация изолятора. Длина пути утечки 320 мм.

Основу изолятора составляет стеклянное тело — тарелка 1, средняя часть которой, вытянутая кверху, называется головкой. На головке крепится шапка 2 из ковкого чугуна, а в гнездо, расположенное внутри головки, заделывается стальной стержень 3. Механическое соединение изоляционного тела с металлической арматурой выполняется при помощи портландцемента.

При последовательном соединении таких изоляторов можно получить гирлянду на любое номинальное напряжение. Соединение изоляторов в гирлянду осуществляется путем введения утолщенной головки стержня в специальное ушко на шапке другого изолятора и закрепления его замком.

Ниже приведены основные типы, параметры и размеры линейных подвесных тарельчатых фарфоровых и стеклянных изоляторов согласно ГОСТ 27661-88* и примеры их исполнения.

Тип изолятора определяется классом, материалом изоляционной детали и ее конфигурацией.

Класс изолятора соответствует значению нормированной разрушающей механической (для стеклянных изоляторов) или электромеханической (для фарфоровых изоляторов) силы в килоньютонах и выбирается из ряда: 40, 60, 70, 80, 100, 120, 160, 190, 210, 240, 300, 400 и 530. Изоляционная деталь должна изготавливаться из электротехнического фарфора по ГОСТ 20419-83 или электроизоляционного стекла, подвергнутого закалке.

Варианты конфигураций изоляционной детали приведены на рис П 1.1а - П 1.1д (а - нормальное исполнение, б-д – специальное исполнение).

Условное обозначение типа изолятора состоит из букв и цифр, которые означают: первая - П – вид изолятора – подвесной; вторая - С-Ф - материал изоляционной детали: С - стекло, Ф – фарфор; третья – В, Д, К, С - условное обозначение конфигурации изоляционной детали (указаны на рис.2).

Цифры – 40, 70,...-класс изолятора; четвертая, следующая после цифр - А, Б, В, Г,... - индекс модернизации изолятора. Например, изолятор ПФС-70 - изолятор подвесной фарфоровый со сферической конфигурацией изоляционной детали и электромеханической разрушающей силой 70 кН.

Основные параметры и размеры некоторых типов линейных подвесных тарельчатых изоляторов приведены в табл. 1.

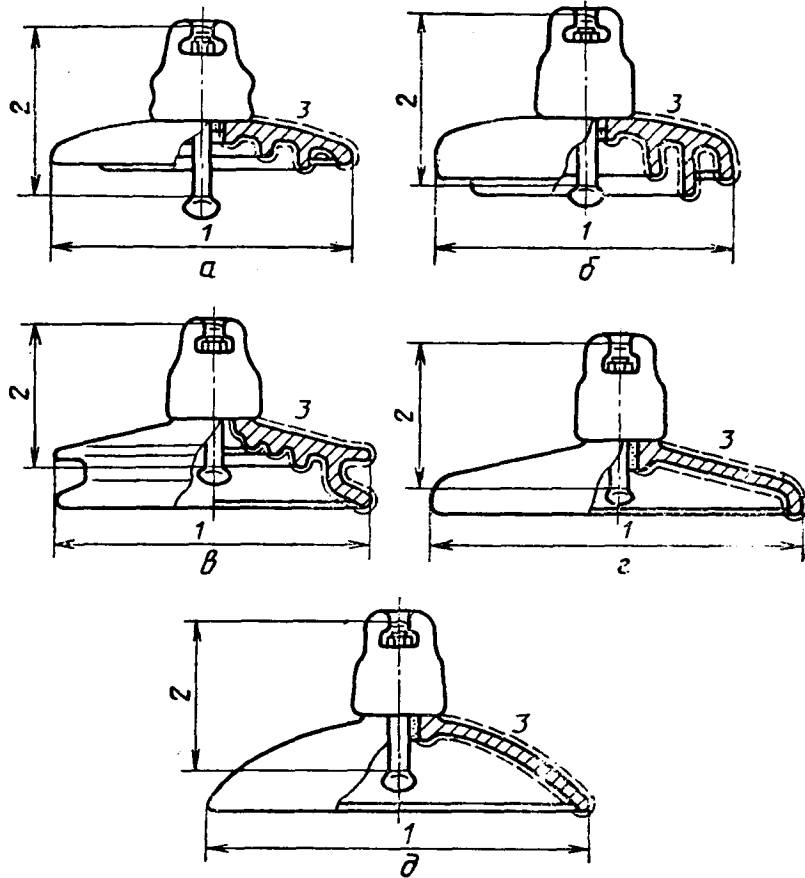
В таблице приняты следующие условные обозначения:

F - механическая (электромеханическая) разрушающая сила;

U_{пр} - пробивное напряжение промышленной частоты в изоляционной среде;

D - диаметр изоляционной детали;
H - строительная высота;

Конфигурация изоляционной детали



а - со слаборазвитой поверхностью изоляционной детали; б - с увеличенным вылетом ребра (В); в - двукрылая (Д); г - коническая (К); д - сферическая (С); 1- диаметр; 2 - строительная высота; 3 - длина пути утечки

Примечание. В скобках приведено условное обозначение конфигурации изоляционной детали. Изоляторы нормального исполнения буквы в условном обозначении не имеют.

Рис.2

$L_{ут}$ - длина пути утечки;

$U_{имп.пр}$ - выдерживаемое импульсное напряжение;

$U_{пр-м}$ выдерживаемое напряжение промышленной частоты под дождем;

m - масса.

Таблица 1

Основные параметры и размеры линейных подвесных тарельчатых фарфоровых и стеклянных изоляторов нормального исполнения (рис.1)

Тип изолятора	F , кН, не менее	$U_{пр-м}$, кВ, не менее	D , мм	H , мм	$L_{ут}$, мм	$U_{имп.пр}$, кВ	$U_{пр-м}$, кВ	m , кг
ПС40А	40	100	175	110	185	70	33	1,5
ПС70Д	70	130	255	127	303	100	40	3,5
ПФ70А	70	130	310	170	318	90	32	4,6
ПС70Е	70	130	255	127	303	100	40	3,4
ПФ70В	70	130	270	146	340	110	45	4,8
ПС120Б	120	130	255	146	320	100	40	4,2
ПС160В	160	130	280	146	370	110	45	6,3
ПС210В	210	130	300	170	370	110	45	7,3
ПС300В	300	130	320	195	385	130	50	10,0
ПС400Б	400	130	390	205	475	130	55	15,0

Далее приведены типы, параметры и размеры полимерных изоляторов устройств электрической тяги и примеры их исполнения.

Полимерные изоляторы контактной сети электрических железных дорог маркируются следующим образом:

первая буква - назначение изолятора: П - подвесной, Н - натяжной, Ф - фиксаторный, К - консольный, О - опорный, Р - распорка и т.д;

вторая буква - конструкция изолятора: С - стержневой (в качестве силового элемента в изоляторе используется стеклопластиковый стержень), М - монолит (выполнен из одного полимерного изоляторного материала);

третья и четвертая (при ее наличии) буквы - материал защитного чехла (покрытия) стеклопластикового стержня или полимерного изоляционного материала: Ф - фторопласт, П - полиэтилен, К - кремнийорганическая резина, Ц - циклоалифатическая смола;

индексы у третьей и четвертой букв - вид защитного чехла: Т - трубка, Р - ребристый (наборные втулки, цельный ребристый

кожух, отформованные ребра), П - покрытие, выполненное окунанием стеклопластикового стержня и напылением на него трекингоустойкого полимерного материала;

цифра в числителе дроби (например, 70) - класс изолятора, соответствующий значению нормированной разрушающей силы в килоньютонах;

цифра в знаменателе дроби (например, 0,9) - длина пути утечки в метрах;

буквы после дроби - А, Б, В,... - индекс модификации изолятора.

Подвесной стержневой изолятор ПСКр70/ $L_{ут}$ -Д, используемый на контактной сети дорог переменного тока, изображен на рис.3.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

1 - оконцеватель;

2 - стеклопластиковый стержень;

3 - ребро из кремнийорганической резины.

Подвесной стержневой изолятор ПСКр70/0,43-3, используемый на контактной сети дорог постоянного тока, изображен на рис.4.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

1 - верхний оконцеватель из чугуна;

2 - стеклопластиковый стержень;

3-сплошная защитная цельнолитая оболочка куполообразной формы.

В табл. 2 и табл. 3 приведены технические требования (значения параметров по техническим условиям – ТУ) к подвесным полимерным изоляторам электрических ж.д. постоянного и переменного токов. Здесь же даны результаты их испытаний, а также для сравнения данные одиночного фарфорового изолятора и гирлянды фарфоровых изоляторов, которую может заменить один полимерный изолятор. В случае дорог постоянного тока (табл. 2) цифры даны для гирлянды из двух фарфоровых изоляторов, в случае дорог переменного тока (табл. 3) – для гирлянды из трёх (числитель дроби) и из четырёх (знаменатель дроби) фарфоровых изоляторов.

Условные обозначения параметров в табл. 2 и табл. 3 приняты такими, как в табл. 1.

Подвесной стержневой изолятор ПСКр70/ $L_{ут}$ -Д

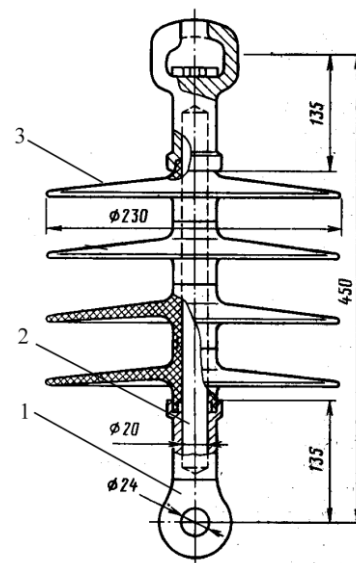


Рис.3

Подвесной стержневой изолятор ПСКр70/0,43-3

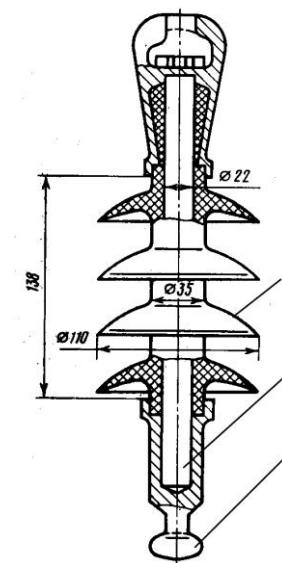


Рис.4

Таблица 2
Основные параметры и размеры некоторых типов полимерных изоляторов электрических ж.д. постоянного тока

Параметр	Значение параметра по ТУ	Значения параметра изолятора типа			
		ПФ-70	Гирлянда из двух изоляторов ПФ-70	ПСКр70/0,4 -А	ПСКр70/0,43-3
F , кН	70	70	70	138	122
H , мм	350	167	350	450	350
$L_{ут}$, мм	400	285	470	410	430
$U_{пр-}$, кВ	80	60	95	100	95
$U_{имп.пр}$, кВ	110	90	–	160	135
$U_{пр-м}$, кВ	50	32	70	83	55
m , кг	–	6,5	13	1,6	2,3

Т а б л и ц а 3

Основные параметры и размеры некоторых типов полимерных изоляторов электрических ж.д. переменного тока

Параметр	Значение параметра по ТУ	Значения параметра изолятора типа		
		Гирлянда из фарфоровых изоляторов	ПСКр70/0,82-Д	ПСКр70/0,82-В
F , кН	70	70/70	142	142
H , мм	400	500/660	450	500
$L_{\text{вт}}$, мм	750	1020/1300	820	820
$U_{\text{пр~}}$, кВ	130	129/150	155	155
$U_{\text{имп. пр}}$, кВ	—	—	270	270
$U_{\text{пр~м}}$, кВ	100	106/147	110	110
m , кг	—	15/20,3	3,12	3,02

Штыревой линейный изолятор типа ШФ-10Г

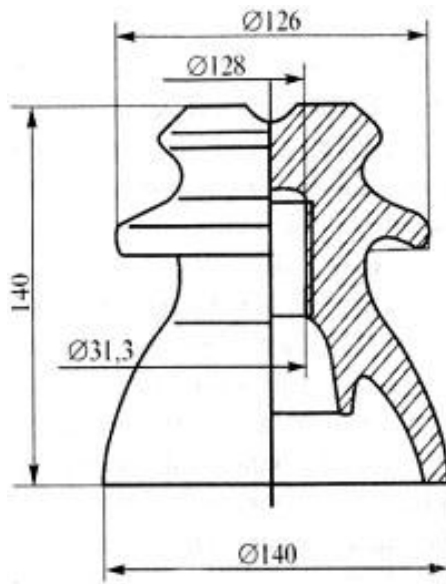


Рис.5

На рис.5 показана конструкция штыревого линейного изолятора для изоляции и крепления к поддерживающим конструкциям

проводов ВЛ напряжением до 10 кВ включительно. Условное обозначение расшифровывается следующим образом: Ш - штыревой, Ф - фарфоровый, 10 - класс изолятора (номинальное напряжение электроустановки, кВ), Г - конструктивное исполнение. Механическая разрушающая сила на изгиб 12,5 кН. Длина пути утечки 265 мм.

Провод крепится на верхней или боковой бороздке изолятора с помощью вязки или специальных зажимов. Изолятор навертывается на металлический штырь или крюк, расположенный на опоре. Гнездо с резьбой для навертывания штыря или крюка углублено в тело изолятора настолько, что верхняя часть штыря или крюка оказывается на уровне шейки изолятора. Этим достигается уменьшение изгибающего момента, действующего на тело изолятора.

Аппаратные изоляторы делятся на опорные и проходные. Опорные изоляторы используются в качестве жесткой опоры и служат для крепления токоведущих шин в закрытых распределительных устройствах, а также для крепления отдельных частей аппаратов.

Опорный изолятор типа ОФ для работы в помещении на напряжение 6 кВ

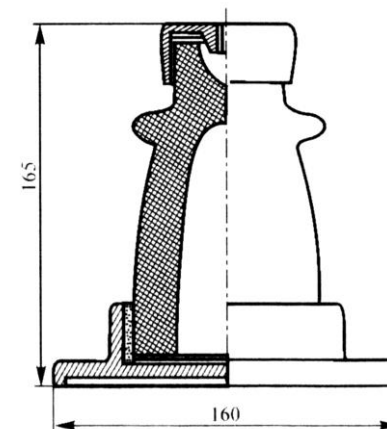


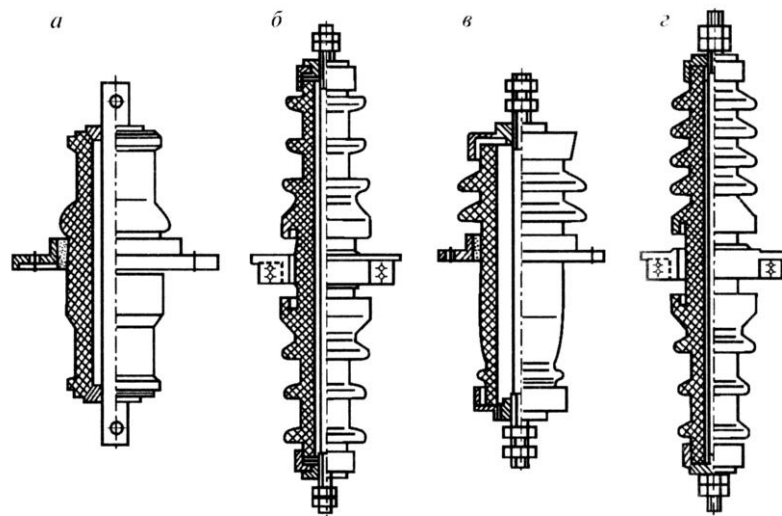
Рис.6

На рис.6 показан опорный фарфоровый изолятор типа ОФ на напряжение 6 кВ для работы внутри помещения. Обозначение

расшифровывается так: О - опорный, Н - нормального исполнения, Ш - штыревой. Материал в опорном изоляторе работает на изгиб.

Проходные изоляторы применяются для изоляции токоведущих частей при прохождении их через стены, потолки и корпуса распределительных устройств, выключателей, трансформаторов и иных электрических аппаратов, имеющих другой электрический потенциал по отношению к токоведущим частям.

Проходные изоляторы



a и *б* — для работы в помещении; *в* и *г* — для работы на открытом воздухе; *a* и *в* — на 6 кВ; *б* и *г* — на 35 кВ

Рис.7

Типичные конструкции проходных изоляторов на напряжения 6 и 35 кВ для работы в помещениях и на открытом воздухе показаны на рис.7. Они состоят из изоляционного фарфорового тела, токоведущего стержня и фланца, с помощью которого изолятор укрепляется на стене, перекрытии или ограждении. Проходные изоляторы, так же как изоляторы других типов, конструируют так, чтобы пробивное напряжение их внутренней изоляции превышало разрядное напряжение по поверхности. Проходные изоляторы на напряжение более 35 кВ имеют более сложную конструкцию и называются вводами.

1.2. Изоляция силовых кабелей

Основными элементами силовых кабелей являются проводники - жилы, изоляция по отношению к земле и между жилами, герметичная металлическая оболочка и защитные покровы.

Металлическая оболочка, выполняемая обычно из свинца или алюминия, предохраняет изоляцию главным образом от влаги и отчасти от механических повреждений. Защитные покровы включают броню из стальных проволок или лент и слои кабельной пряжи из джутового волокна, пропитанной битуминозными составами с антисептиками. Броня обеспечивает главную защиту оболочки кабеля и его изоляции от внешних механических воздействий, а джутовые покровы - защиту оболочки от коррозии.

Кабели в целом и все их элементы должны обладать достаточной гибкостью, чтобы их можно было наматывать на барабаны для транспортировки или хранения и изгибать при укладке по неровной трассе. Поэтому, в частности, жилы силовых кабелей выполняются из большого числа скрученных тонких проволок.

Кабели с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой

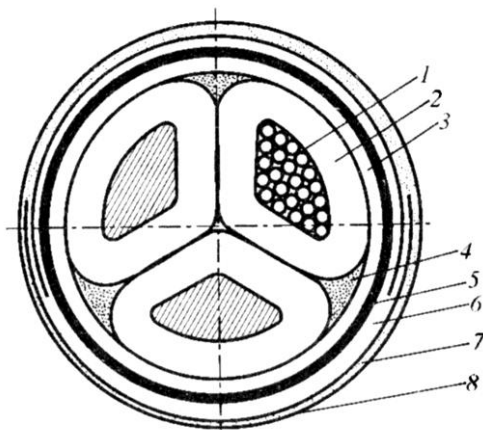
В этих кабелях для напряжений до 35 кВ наибольшее применение получили кабели с вязкой пропиткой, у которых ленточная бумажная изоляция пропитывается маслоканифольными или синтетическими нестекающими составами повышенной вязкости.

На рис.8 показан разрез трехжильного силового кабеля с секторными жилами и бумажной изоляцией с *вязкой пропиткой*. Секторная форма жил позволяет уменьшить наружный диаметр кабеля. Жилы кабеля выполняются из меди или алюминия. Изоляция состоит из двух частей — фазной и поясной. Между жилами кабеля находится двойная фазная изоляция, рассчитанная на линейное напряжение, а между каждой жилой и оболочкой — фазная и поясная. Зазоры между отдельными изолированными жилами заполняются низкокачественной изоляцией (бумажными жгутами). Наибольшее действующее значение рабочей напряженности в кабелях до 10 кВ не превышает значения 2 кВ/мм.

Кабели с нестекающими составами могут прокладываться с разностью уровней до 300 м. При этом не возникает опасности стекания пропитывающего состава в нижнюю часть кабеля и образования в его верхней части больших объемов обедненно пропитанной изоляции. Основной недостаток кабелей с вязкой пропиткой состоит в том, что в их изоляции неизбежно образуются газовые включения. Одна из причин — циклические нагревы и остывания при работе с периодически меняющейся нагрузкой. После

нескольких таких циклов при остывании оболочка из-за остаточной деформации сохраняет размеры, соответствующие нагретому состоянию, а изоляция уменьшается в объеме. В результате в изоляции образуются пустоты, которые постепенно заполняются газами, выделяющимися из изоляции. Наличие газовых включений снижает длительную электрическую прочность изоляции. Вследствие этого в кабелях с вязкой пропиткой рабочие напряженности имеют относительно невысокие значения. Такие кабели выпускаются нескольких типов с одной, двумя, тремя и четырьмя жилами. Ввиду указанных недостатков кабели с вязкой пропиткой применяют для напряжений до 35 кВ. Для больших напряжений до 500 кВ используются маслонаполненные кабели.

Трехжильный кабель с секторными жилами



1 - жила; 2 - фазная изоляция; 3 - поясная изоляция; 4 - наполнитель; 5 - оболочка; 6 - подушка под броней из пряжи, пропитанной битумом; 7 - броня из стальных лент; 8 - наружный защитный покров

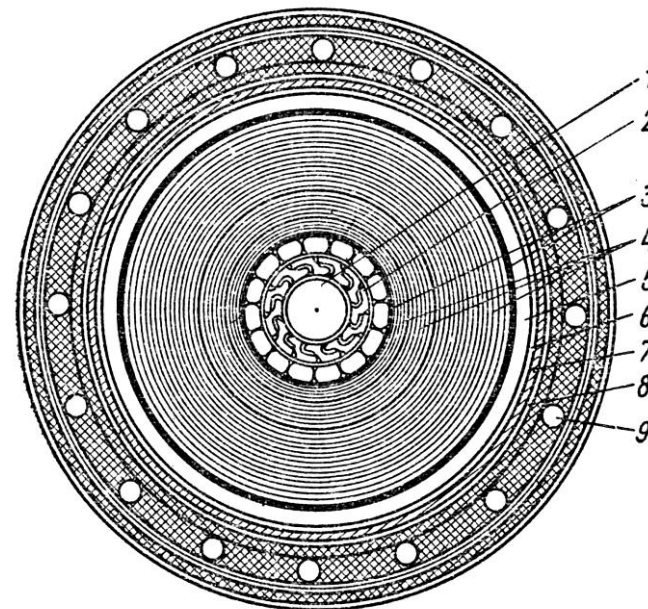
Рис.8

Маслонаполненные кабели

В таких кабелях ленточная бумажная изоляция пропитывается маловязким маслом, которое может перемещаться внутри жилы кабеля и находится под избыточным давлением. Вследствие этого исключается появление в изоляции газовых включений при изменениях температуры, и за счет этого длительная электрическая прочность повышается более чем в 3 раза по сравнению с прочностью изоляции, пропитанной вязкими составами.

Для поддержания неизменного давления масла в кабеле на трассе через каждые 1—2,5 км устанавливают баки давления, которые присоединяются к кабелю через специальные муфты. Чем больше давление масла, тем выше электрическая прочность кабеля, однако при этом усложняется упрочняющий покров кабеля.

Маслонаполненный кабель среднего давления 220 кВ



1 - маслопроводящий канал; 2 - жила из фасонных луженых проволок; 3 - экран по жиле и по изоляции из полупроводящей металлизированной бумаги; 4 - изоляция из бумаг разной толщины и плотности; 5 - свинцовая оболочка; 6 - ленты из пластика; 7 - медные усиливающие ленты; 8 - защитные покровы; 9 - стальные проволоки

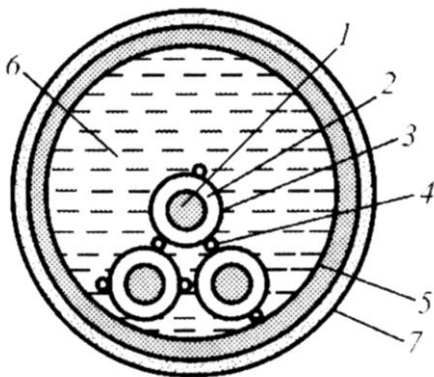
Рис.9

На рис.9 изображен однофазный кабель среднего давления на напряжение 220 кВ.

Маслонаполненные кабели высокого давления (около 1,5 МПа) выполняются в стальных трубах. Такие кабели выпускаются на напряжение до 500 кВ. Устройство такого кабеля показано на рис.10. В стальном трубопроводе, заполненном маловязким маслом, помещаются три круглые жилы с изоляцией, которая пропитана

вязким составом. Изоляция покрывается эластичным, герметически плотным слоем, который предотвращает контакт изоляции с маслом в трубе, а также увлажнение изоляции при транспортировке и монтаже. Эластичное покрытие свободно передает изоляции давление масла, заполняющего стальную трубу.

Маслонаполненный кабель высокого давления в стальной трубе



1 - жила; 2 - изоляция; 3 - герметизирующие покровы; 4- полукруглая проволока; 5 - стальная труба; 6 - масло; 7 - антикоррозийное покрытие

Рис.10

Преимущество кабелей в трубе состоит в том, что упрощается конструкция оболочки, воспринимающей давление масла. Однако увеличивается объем работ при прокладке кабельной линии за счет сварки стальных труб и наложения антикоррозионных покрытий. Кроме того, значительно возрастает объем масла, что усложняет систему поддержания избыточного давления. При эксплуатации маслонаполненных кабелей возникают проблемы контроля за состоянием изоляционного масла и защиты кабельной линии от коррозии. Разгерметизация маслонаполненных кабелей высокого давления сопровождается большими объемами вытекаемого кабельного масла, увлажнением изоляции кабеля и, как следствие, значительным объемом восстановительных работ. Поэтому при напряжениях до 220 кВ применяют газонаполненные кабели.

Газонаполненные кабели

В них вместо масла используют сухой очищенный азот при повышенном давлении.

Эти кабели имеют устройство примерно такое же, как и маслонаполненные, но в них используется изоляция с обедненной пропиткой. Преимущество таких кабелей состоит в том, что получается более простая система обеспечения повышенных давлений за счет использования баллонов со сжатым газом. Газонаполненные кабели могут укладываться на трассах с большим уклоном. Но вместе с тем в таких кабелях условия охлаждения хуже, поэтому рабочие токи меньше.

Применяются также кабели с *элегазовой изоляцией под давлением*. Они устроены следующим образом. В стальной трубе на распорках из твердого диэлектрика закреплена токоведущая жила (или три жилы). Линия собирается из таких труб и заполняется элегазом (шестифтористой серой FS₆) под давлением. Элегаз негорюч, обладает хорошей теплопроводностью и хорошей дугогасительной способностью. Особенно эффективны такие кабели при сверхвысоких напряжениях, где они могут оказаться экономически более выгодными, чем воздушные линии электропередачи.

В последнее время кабели с бумажно-масляной изоляцией и маслонаполненные кабели заменяются на кабели с полиэтиленовой изоляцией.

Кабели с полиэтиленовой изоляцией

Конструкция такого кабеля достаточно проста: токоведущая жила у кабелей до 3 кВ покрывается сплошным слоем полиэтилена, а кабели на напряжение 6 кВ и выше имеют дополнительно экраны из полупроводящего полиэтилена или поливинилхлорида поверх изоляции либо на изоляции и на жиле. Наличие таких экранов уменьшает влияние воздушных включений, возникающих на границе изоляции с жилой, и делает электрическое поле в изоляции более однородным. Выпускают также кабели с защитными покровами и броней, как у кабелей с вязкой пропиткой.

Преимущества полиэтиленовых кабелей по сравнению с кабелями с вязкой пропиткой состоят в том, что масса их меньше и не требуется (или упрощается) система оболочек, защищающих изоляцию от внешних воздействий. Однако нагревостойкость существующих изоляционных пластмасс существенно ниже, чем бумажной изоляции с вязкой пропиткой.

Динамика выпуска кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) и полиэтиленовой изоляцией (ПИ) на предприятиях СНГ такова.

Кабели на напряжение от 1 до 6 кВ: в 1997 г. с БПИ 25 %, с ПИ 75 %, 2002 г. с БПИ 0 %, с ПИ 100 %.

Кабели на напряжение 6—35 кВ: в 1997 г. с БПИ 99,7 %, с ПИ 0,3 %, в 2005 г. с БПИ 70 %, с ПИ 30 %.

Перспективным направлением кабельной промышленности является производство кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение до 500 кВ.

Для ввода больших мощностей в крупные города и промышленные центры разрабатываются и выпускаются кабели с охлаждением токоведущих жил до температуры жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (около 5 К). В первом случае (криорезистивные кабели) повышение пропускной способности достигается за счет значительного уменьшения активного сопротивления медных или алюминиевых жил и, следовательно, джоулевых потерь, что позволяет увеличить токовые нагрузки. В кабелях с жидким гелием используется эффект сверхпроводимости. Сверхпроводящий кабель на ток до 8 кА использован в колайдере, созданным учеными многих стран для проведения физических исследований.

1.3. Изоляция конденсаторов

Важнейшими характеристиками конденсаторов является их емкость C и удельная энергия W_0 .

Емкость C плоского конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{a}, \quad (1)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции;

ε_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a - толщина изоляции;

S - площадь электродов.

Удельная энергия W_0 :

$$W_0 = \frac{W}{V}, \quad (2)$$

где $W = \frac{CU^2}{2}$ - энергия, запасенная в конденсаторе;

U - напряжение между электродами конденсатора;

$V = a \cdot S$ - объем изоляции.

После подстановки в (2) формулы (1) и выражений для W и V получим:

$$W_0 = \frac{CU^2}{2aS} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2aS} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2a^2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (3)$$

где E - напряженность электрического поля в изоляции конденсатора.

Как видно из формул (1) и (3) для получения больших величин C и W_0 необходимо применять изоляцию с высоким значением ε . Для увеличения W_0 следует использовать изоляцию с высокой электрической прочностью (высоким значением рабочей напряженности E_p)

В силовых конденсаторах используется бумажно-масляная изоляция. Чаще всего изоляцию секций выполняют из 6 - 8 слоев конденсаторной бумаги типа КОН толщиной 10—15 мкм ($\text{tg}\delta = 0,003$). Внутренний объем конденсатора заполнен пропитывающим составом.

В качестве пропитки используют минеральные масла ($\varepsilon = 2,1—2,2$) и синтетические полярные жидкости на основе хлордифенила (ХД) ($\varepsilon = 4,8—5,5$). Конденсаторное масло отличается от трансформаторного более тщательной очисткой. У конденсаторной бумажной изоляции до 30 % объема занимают поры между волокнами и узкие щели между слоями бумаги. Поэтому относительная диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости сильно влияет на емкость конденсатора. При пропитке хлорированными жидкостями емкость конденсатора в два раза превосходит емкость при пропитке минеральным маслом. Рабочие напряженности в конденсаторах промышленной частоты составляют 12—14 кВ/мм при пропитке минеральными маслами и 15—20 кВ/мм при пропитке хлорированными жидкостями.

Недостатком синтетических жидкостей ХД является их большая чувствительность к загрязнениям. Кроме того, они токсичны и экологически опасны, так как отсутствует их биологическая деградация. Это делает необходимым централизованное уничтожение пробитых конденсаторов по специальной технологии.

Хорошие результаты дает применение комбинированной изоляции, в которой слои бумаги чередуются со слоями неполярной синтетической полимерной пленки. Такой пленкой может быть, например, полипропилен ($\varepsilon = 2,2 - 2,3$, $E_{пр} = 18$ кВ/мм, $\text{tg}\delta = 0,0004$, $\rho = 10^{15} - 10^{16}$ Ом-м). Для импульсных конденсаторов применяется

полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка, а в качестве пропитки касторовое масло. В комбинированной изоляции бумага между слоями пленки обеспечивает хорошую пропитку изоляции и отсутствие в ней газовых включений.

На рис.11 изображен **силовой конденсатор** рулонного типа. В герметизированном корпусе 1 расположены плоскопрессованные рулонные секции 2, стянутые между металлическими щеками 3 с помощью хомутов 4. Между секциями установлены изолирующие прокладки 5 из электрокартона. Изоляция 6 от корпуса выполнена из электрокартона или кабельной бумаги. Секция представляет собой спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевой фольги (рис.12), выполняющей роль электродов. В рулонных секциях обе поверхности электродов являются активными, вследствие чего сокращается расход металла на электроды. Отдельные секции (см. рис.11) соединяются перемычками 7 в параллельную, последовательную или смешанную схему в зависимости от рабочего напряжения и требуемой емкости. Конденсатор имеет два вывода 8.

Некоторым недостатком конденсаторов рулонного типа состоит в том, что в процессе опрессовки намотанных рулонов возможны порывы конденсаторной бумаги. В определенной мере этот недостаток устраняется за счет применения комбинированной изоляции. Полностью порывы изоляции устраняются в конденсаторах пакетного типа, в которых слои электрокартона чередуются со слоями алюминиевой фольги.

Силовые конденсаторы используются в установках переменного тока для повышения коэффициента мощности («косинусные конденсаторы»), для продольной компенсации в ЛЭП, в качестве конденсаторов связи и других целей. В установках постоянного тока они работают в схемах с инверторами.

Более половины выпускаемых конденсаторов составляют керамические. Диэлектриком в них является керамика с высокой ϵ , что позволяет выполнять конденсаторы с меньшими габаритами и весом. Большая часть керамических материалов с высокой ϵ , имеет в качестве основной составной части диоксид титана TiO_2 . Одна из его модификаций — рутил имеет в направлении главной кристаллографической оси $\epsilon = 173$. Низкочастотная керамика имеет $\epsilon = 150 - 200$. Имеется полупроводниковая керамика с $\epsilon = 500$. Таким образом, керамические материалы по сравнению с полимерными пленками дают огромный выигрыш по значению ϵ . Низковольтные и высоковольтные керамические конденсаторы применяются в высокочастотной технике: в измерительных схемах и радиоаппаратуре.

Схематическое устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности

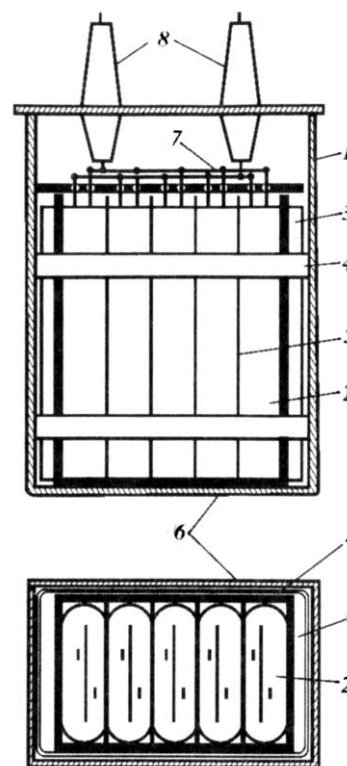
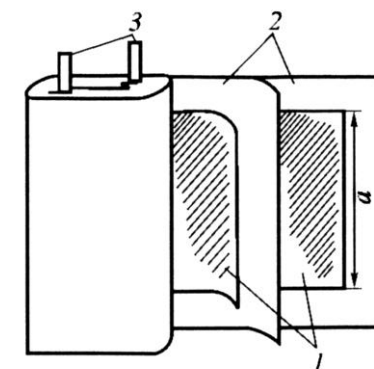


Рис.11

Плоскопрессованная рулонная секция



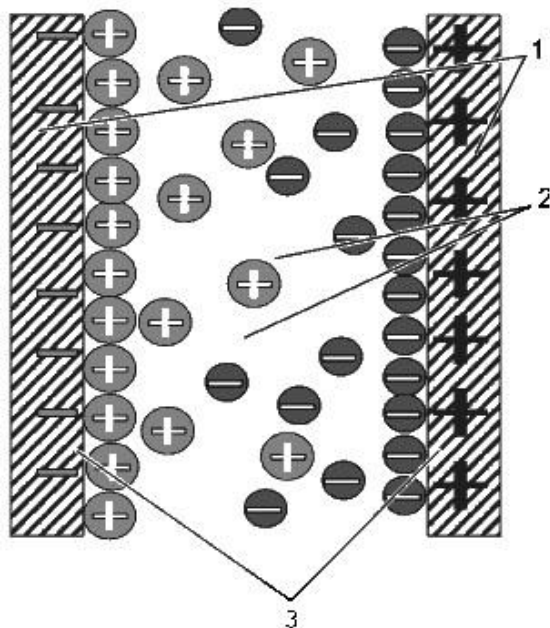
1-электроды из фольги;
2 - слои бумаги;
3 — выводы

Рис.12

В последние десятилетия в промышленности и устройствах электрической тяги находят применение **сверхёмкие электрохимические конденсаторы – суперконденсаторы.**

Электрохимические конденсаторы относятся к устройствам, накопление электрической энергии в которых происходит благодаря заряду двойного электрического слоя (ДЭС). Этот слой образован поверхностью проводника и слоем прилежащих к нему ионов электролита (см. рис.13).

Упрощенная схема электрохимического (двойнослойного) конденсатора



1— отрицательный и положительный электроды; 2 - ионы электролита; 3- область двойного электрического слоя

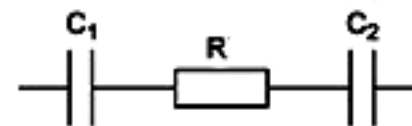
Рис.13

Двойной электрический слой можно рассматривать как конденсатор с двумя обкладками, емкость которого пропорциональна площади обкладок и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Благодаря тому, что расстояние a между заряженной поверхностью проводника (из которого изготавливаются электроды) и слоем ионов очень мало (измеряется ангстремами - 10^{-10} м), а величина поверхности S проводника (например, активированного угля) достигает 1500...2000 м²/г, емкость, как следует из формулы (1), получается очень большой и может составлять сотни и тысячи Фарад. Напряжение электрохимических конденсаторов (одного элемента) в большинстве случаев составляет 1,2...3 В. Оно ограничено величиной, при которой на электродах становится возможным процесс электролиза электролита (который зависит от природы электролита).

Типичная, наиболее часто применяющаяся конструкция конденсаторов с использованием двойного электрического слоя - так называемая «симметричная», в которой положительный и отрицательный электроды выполнены из одинакового материала, в большинстве случаев - активированного углерода, и имеют одинаковую емкость.

Принципиально электрохимический конденсатор представляет собой систему, состоящую из двух электродов, помещенных в электролит. В этом случае двойной электрический слой на поверхности каждого электрода является отдельным конденсатором. Между собой они соединены последовательно через проводник с ионной проводимостью (электролит).

Упрощенная эквивалентная электрическая схема такого конденсатора выглядит следующим образом:



Здесь C_1 - емкость двойного электрического слоя отрицательного электрода; C_2 - емкость двойного электрического слоя положительного электрода; R - эквивалентное последовательное сопротивление электролита и материалов электродов.

Принимая во внимание последовательное соединение емкостей, образованных двойными электрическими слоями на отрицательном и положительном электродах, емкость электрохимического конденсатора определяется из формулы:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2, \text{ тогда } C = (C_1 \cdot C_2) / (C_1 + C_2).$$

В случае симметричной конструкции, когда емкости, образованные двойными электрическими слоями обоих электродов, одинаковые, т.е. $C_1 = C_2$, емкость всего конденсатора C будет равна $C/2$.

Таким образом, при равных массах положительного и отрицательного электродов емкость симметричного конденсатора равна половине емкости одного электрода.

В электрохимических конденсаторах используют водные и органические электролиты. Водные электролиты более дешевые, просты в обращении, не загрязняют окружающую среду. Органические электролиты позволяют увеличить рабочее напряжение конденсатора и, соответственно, удельную запасаемую энергию,

однако являются дорогими, сложными при использовании в процессе производства, часто небезопасными в экологическом отношении.

При повышении напряжения выше допустимого в электрохимических конденсаторах электрического пробоя не происходит, что выгодно отличает их от традиционных конденсаторов, но начинается процесс разложения электролита. В случае неводного электролита работа при повышенном напряжении приводит к снижению характеристик конденсатора.

Суперконденсаторы имеют большой срок службы, обусловленный отсутствием химических процессов, которые в обычных аккумуляторах приводят к постепенному снижению их характеристик. В процессе эксплуатации и хранения электрохимические конденсаторы не требуют обслуживания, работоспособны в широком интервале температур. Энергия, запасаемая суперконденсаторами, может достигать 50...60 Дж/г, а мощность - 3...5 кВт/кг.

В настоящее время суперконденсаторы классифицируют на группы «низковольтные» и «высоковольтные». Все известные сегодня суперконденсаторы (в виде коммерческого продукта и в виде образцов новых разработок) используют электрохимические системы, которые обеспечивают несколько вольт напряжения на один элемент. Поэтому, так называемые «высоковольтные» суперконденсаторы - это лишь результат технологии и конструктивного исполнения, которые предусматривают последовательное соединение многих суперконденсаторных элементов для получения более высокого рабочего напряжения.

Использование суперконденсаторов наиболее эффективно тогда, когда требуются отдача большой мощности и, особенно, накопление энергии за относительно короткий промежуток времени ~ 0,1,10 сек., например:

- бортовой источник импульсной мощности для разгона электротранспорта и гибридного транспорта за счет регенерации энергии, накапливаемой при торможении;
- пуск двигателей автотракторной и стационарной техники, локомотивов, судов и т.д. в любых климатических условиях или разряженной аккумуляторной батареи (АБ);
- импульсное энергопотребление и/или импульсная отдача мощности в нагрузку технического и технологического оборудования, такого как различные электроприводы, рентгеновские аппараты, аппараты точечной сварки;

- системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей (вычислительная техника, системы управления и связи, непрерывные производства и др.);

- буферный накопитель энергии для снятия пиковых нагрузок электрических подстанций, прямых преобразователей энергии (топливных элементов, ветро- и гидрогенераторов, солнечных батарей и т.п.);

- взамен аккумуляторов в электротранспортных средствах с заданным маршрутом в закрытых помещениях (цехах, складах, теплицах, птицефабриках, животноводческих фермах и т.п. и экологических зонах).

Таблица 4

Технические характеристики ИКЭ

Тип ИКЭ, кДж/В	U, В	C, Ф	P _{max} , кВт	I _{max} , А	Объем, дм ³	Вес, кг	Применение
25/14	14	255	16,3	2300	11,4	27,0	Пуск ДВС автотракторной и железнодорожной техники (дрезин; дизелей путевых машин, рефрижераторных вагонов).
40/28	28	100	39,2	2800	15,0	32,0	
60/28	28	160	65,3	4600	18,7	38,0	
90/200	200	4,50	50,0	500	22,9	36	Гибридный транспорт, электротранспорт, источники бесперебойного питания.
85/270	270	2,50	67,5	500	27,4	52	
90/300	300	2,00	75,0	500	23,7	38,0	
115/300	300	2,50	75,0	500	27,5	53	
40/64	64	23,0	93,8	2125	17,2	38,0	Конденсаторная система пуска дизелей магистральных и маневровых тепловозов.
40/96	96	8,50	86,4	1300	16,2	34,0	

Начинается внедрение суперконденсаторов в тяговых сетях метрополитенов. Их применение позволит экономить электроэнергию за счет энергии торможения поездов, а затем повторного ее использования.

Накопители электроэнергии — суперконденсаторы на тяговой подстанции



Рис.14

Суперконденсаторы на электроподвижном составе

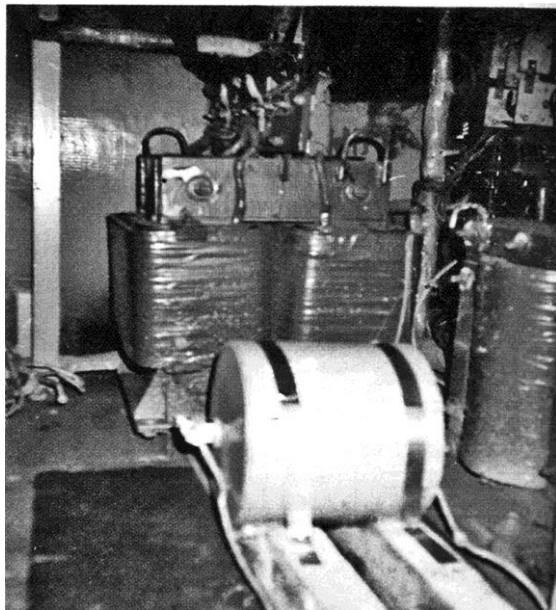


Рис.15

В табл.4 приведены параметры импульсных энергоемких конденсаторов (ИКЭ), выпускаемых отечественной фирмой «Эконд».

Для систем питания цепей управления тяговыми подстанциями предложены варианты с применением суперконденсаторов (рис.14), позволяющие применять аккумуляторы в 2—3 раза меньшей энергоемкости, повышающие срок службы и надежность всей системы питания не менее чем в два раза. Разработаны и предложены схемы их применения и для электроподвижного состава (рис.15). Ведутся работы по обеспечению проезда нейтральных вставок без сброса тяги при вождении поездов повышенной массы электровозами переменного тока с применением накопителей энергии. Одновременно решаются вопросы повышения надежности и экономичности электроснабжения, качества потребляемой и рекуперированной энергии.

Перспективным решением, позволяющим получить значительную экономию для железной дороги, станет возможное использование накопителей энергии для вывода поездов с обесточенного перегона или станционных путей. Это не только повышает надежность работы железнодорожного транспорта, но и дает большой экономический эффект за счет снижения эксплуатационных расходов на обслуживание контактной сети, позволяя упростить схемы секционирования и убрать контактную подвеску с боковых путей, составляющую ныне значительную часть развернутой длины контактной сети. Это может также высвободить до 4 тыс. человек, занятых на обслуживании и ремонте контактной сети.

1.4. Изоляция силовых трансформаторов

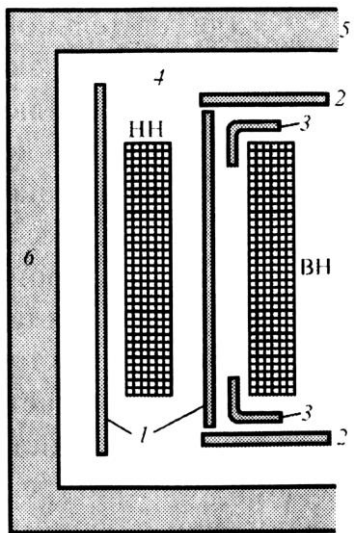
Воздушные промежутки между вводами по их поверхностям на землю составляют *внешнюю изоляцию*, а все изоляционные участки внутри бака — *внутреннюю изоляцию* трансформатора. В свою очередь внутренняя изоляция подразделяется на *главную* и *продольную*. К главной изоляции относится изоляция обмоток относительно земли и между разными обмотками. К продольной изоляции относится изоляция между разными точками одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

В современных силовых трансформаторах в качестве главной изоляции используется преимущественно маслобарьерная изоляция. Барьеры изготавливаются из электрокартона и располагаются перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В трансформаторах электрическое поле имеет сложную конфигурацию, поэтому приходится применять комбинацию барьеров равной формы. В основном применяют три типа барьеров (рис.16) цилиндрический

барьер 1, плоскую шайбу 2 и угловую шайбу 3. Количество барьеров зависит от номинального напряжения. В ряде случаев цилиндрический барьер выполняется из бакелита.

В качестве жидкого диэлектрика используется нефтяное трансформаторное масло. Масло в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, повышает электрическую прочность изоляции и, во-вторых, улучшает условия охлаждения. Масло отводит теплоту потерь от обмоток и магнитопровода трансформатора в 25—30 раз интенсивнее, чем воздух (при свободной конвекции).

Схема главной изоляции обмоток силового трансформатора:



- 1 - цилиндрический барьер;
- 2 - плоская шайба; 3 - угловая шайба; 4 - масло; 5 - яромо;
- 6 - стержень

Рис.16

Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной. Продольная изоляция обмоток силовых высоковольтных трансформаторов состоит из двух основных элементов (рис.17): витковой

изоляции (изоляции между проводниками двух соседних, прилегающих друг к другу витков одной катушки) и катушечной изоляции (изоляции между проводниками двух соседних катушек, разделенных масляным каналом). Витковая изоляция представляет собой бумажно-масляную изоляцию, в которой слои кабельной бумаги накладываются на провод обмотки вполнахлеста. Изоляция между катушками состоит из масляного канала шириной от 8 до 30 мм и бумажной изоляции провода, которая усиливается в случае необходимости дополнительной подмоткой бумаги, охватывающей все витки катушки.

2. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И ЕЕ ДЕФЕКТЫ

В эксплуатации на внутреннюю изоляцию электрооборудования воздействуют электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. Они неизбежно вызывают в изоляции сложные процессы, следствием которых является постепенное ухудшение свойств, именуемое старением. Как правило, изменения свойств изоляции носят необратимый характер и завершаются пробоем. В отдельных случаях последствия старения могут быть устранены путем восстановительного ремонта изоляции.

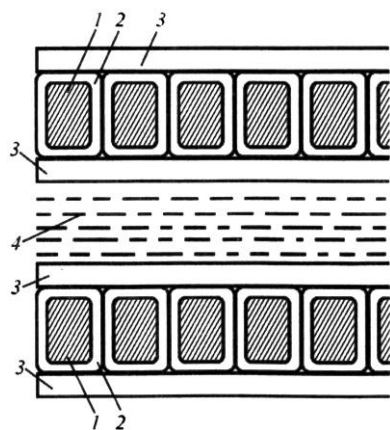
Практическое значение процессов старения состоит в том, что они ограничивают сроки службы изоляционных конструкций. В связи с этим при разработке и изготовлении оборудования высокого напряжения, а также при организации его эксплуатации должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции до такого уровня, при котором обеспечивается требуемый срок службы изоляционных конструкций (обычно 20—30 лет и более).

Различают электрическое, тепловое и механическое старение изоляции. Кроме того, старение внутренней изоляции может быть обусловлено проникновением в нее из окружающей среды загрязнений, в частности влаги.

Электрическое старение может происходить при напряженностях электрического поля во много раз (5—20) меньше пробивных значений. С увеличением напряжения, приложенного к изоляции, темпы электрического старения возрастают, а срок службы соответственно уменьшается.

Интенсивность процесса электрического старения любой изоляционной конструкции зависит не только от значения воздействующего напряжения, но и от ряда факторов, не поддающихся контролю, например от количества, размеров и расположения микронеровностей на поверхностях электродов.

Продольная изоляция силового трансформатора



- 1 - провод обмотки; 2 - витковая изоляция; 3 - катушечная изоляция; 4 - межкатушечная изоляция — масло

Рис.17

При рабочих температурах (90—180 °С) в этих материалах возникают или резко ускоряются химические реакции, которые изменяют структуру материалов и вызывают ухудшение свойств всей изоляции в целом. Эти процессы именуют *тепловым старением*. Твердые диэлектрические материалы в процессе теплового старения постепенно снижают механическую прочность. Это приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем уже к пробую.

В жидких диэлектриках в результате теплового старения образуются газообразные, жидкие и твердые продукты реакций. По мере накопления этих продуктов, загрязняющих изоляцию, проводимость и диэлектрические потери растут, а электрическая прочность снижается.

Темпы теплового старения внутренней изоляции определяются скоростями химических реакций, зависящими от температуры. Обычно полагают, что срок службы при тепловом старении обратно пропорционален скорости химических реакций.

Внутренняя изоляция или ее отдельные элементы из твердых диэлектрических материалов обычно подвергаются в эксплуатации значительным статическим и динамическим ударным механическим нагрузкам. Под действием этих механических нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб, вибрация и т. д.) в диэлектрике образуются и постепенно увеличиваются микротрещины. Когда количество и размеры микротрещин достигают некоторых критических значений, наступает механическое разрушение материала. Однако кроме механического разрушения диэлектрика наличие микротрещин приводит к преждевременному пробую изоляции, так как наличие трещин существенно снижает электрическую прочность диэлектрика.

В процессе эксплуатации во внутреннюю изоляцию электроустановок может попадать влага. Она может попадать из окружающего воздуха или образоваться в самой изоляции в результате термоокислительных процессов.

Появление влаги в изоляции (адсорбция влаги) приводит к резкому снижению сопротивления утечки, так как во влаге содержатся растворенные и диссоциированные примеси, т. е. свободные ионы. Уменьшение сопротивления утечки опасно тем, что приводит к росту диэлектрических потерь. Вследствие этого снижается напряжение теплового пробоя и, кроме того, происходит дополнительный нагрев изоляции, что влечет за собой ускорение темпов теплового старения. Например, если при влагосодержании 0,3 %, бумажная изоляция считается хорошо высушенной и имеет полный срок службы, то при влагосодержании 1,5 % старение начинает ускоряться, а при

влагосодержании более 3,3 % процессы старения и окисления становятся опасными для изоляции.

Вода — сильнополярный диэлектрик, ее относительная диэлектрическая проницаемость равна 80, т. е. во много раз больше, чем у диэлектрических материалов, используемых во внутренней изоляции. В связи с этим сильное увлажнение может влиять на диэлектрическую проницаемость увлажненных слоев. При неравномерном увлажнении *это обстоятельство может привести к искажению электрического поля* в изоляции и снижению пробивного напряжения.

Увлажнение в принципе — процесс обратимый, т. е. адсорбированная влага может быть удалена из изоляции путем сушки. Однако сушка требует затрат времени и энергии.

3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

Контроль изоляции по величине $\text{tg}\delta$

Контроль качества изоляции по величине диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) является одним из самых эффективных и распространенных. Он позволяет определить такие дефекты изоляции, как наличие в ней газовых (воздушных) включений, её увлажнение и т.п.

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) - одна из основных электрических характеристик изоляционного материала, работающего на переменном напряжении.

На рис.18 изображена схема замещения изоляционного материала (диэлектрика), а на рис.19 - векторная диаграмма, соответствующая этой схеме.

На рис.18 приняты следующие обозначения:

C_2 - геометрическая емкость, определяемая размерами диэлектрика и обусловленная мгновенными видами поляризации (электронной и ионной). Эти виды поляризации завершаются за время, не большее 10^{-10} с и не сопровождаются потерями энергии;

i_2 - емкостный ток (ток смещения), обусловленный ограниченным смещением электронов и ионов при прохождении мгновенных видов поляризации;

C_{abc} - емкость, связанная с замедленными видами поляризации (основные из которых: дипольно-релаксационная, вызванная ориентацией дипольных молекул по силовым линиям электрического поля; структурная, заключающаяся в накоплении зарядов различных знаков на границах различных структур (слоев) неоднородного диэлектрика).

Схема замещения изоляционного материала (диэлектрика)

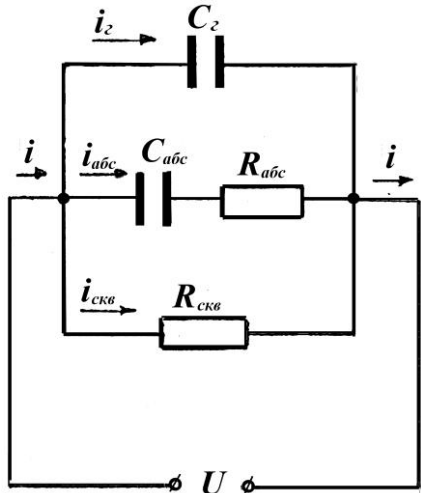


Рис.18

Векторная диаграмма, соответствующая схеме замещения

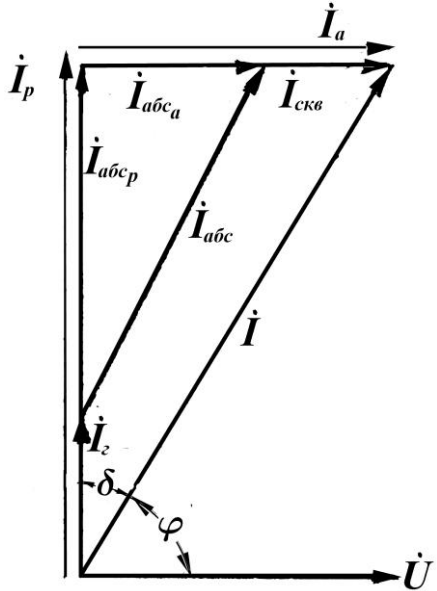


Рис.19

i_{abc} - ток абсорбции (ток, вызванный смещением зарядов при прохождении замедленных видов поляризации);

R_{abc} - сопротивление току абсорбции, указывающее на наличие потерь энергии за счет замедленных видов поляризации;

$i_{скв}$ - сквозной ток проводимости;

$R_{скв}$ - сопротивление сквозному току.

Мерой степени поляризации является относительная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (4)$$

где C - емкость конденсатора с данным диэлектриком;

C_0 - емкость таких же размеров вакуумного конденсатора.

То есть ε определяет способность диэлектрика к созданию электрической емкости. Для различных изоляционных материалов ε может принимать значения от 1 до десятков тысяч. Как следует из векторной диаграммы (рис.19) мощность потерь (активные потери) на переменном напряжении

$$P_{\sim} = UI \cos \varphi = UI_a, \quad (5)$$

где I_a - полный активный ток, представляющий сумму тока $I_{скв}$ и активной составляющей тока абсорбции $I_{abc\ a}$.

$$I_a = I_p \operatorname{tg} \delta, \quad (6)$$

где I_p - полный реактивный (емкостной) ток, равный сумме тока I_2 и реактивной составляющей тока абсорбции $I_{abc\ p}$;

δ - угол, дополняющий угол φ до 90° и именуемый углом диэлектрических потерь.

$$I_p = \omega C U, \quad (7)$$

где ω - угловая частота, равная $2\pi f$;

C - полная, (физическая) емкость изоляции. После подстановки выражений (6) и (7) в выражение (5) оно принимает вид

$$P_{\sim} = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (8)$$

$\operatorname{tg} \delta$ - характеризует потери в изоляции и является, наряду с ε , одной из основных электрических характеристик изоляционного

материала. Значения $\operatorname{tg}\delta$ и ε даются в справочных данных на любой изоляционный материал.

Для качественной изоляции величина $\operatorname{tg}\delta \leq (0,001 \div 0,01)$.

С целью оценки качества изоляции высоковольтных устройств измеряют величину $\operatorname{tg}\delta$ при изготовлении устройства и через определенные промежутки времени в процессе его эксплуатации и производят сравнение с установленными значениями $\operatorname{tg}\delta$.

Кроме того при профилактических испытаниях определяют зависимость $\operatorname{tg}\delta = f(U)$ обычно в интервале $(0,5 \div 1,5) U_{\text{раб ном}}$ (номинального рабочего напряжения устройства). При этом могут быть получены два вида зависимостей (1) или (2) (рис.20).

Зависимость $\operatorname{tg}\delta = f(U)$

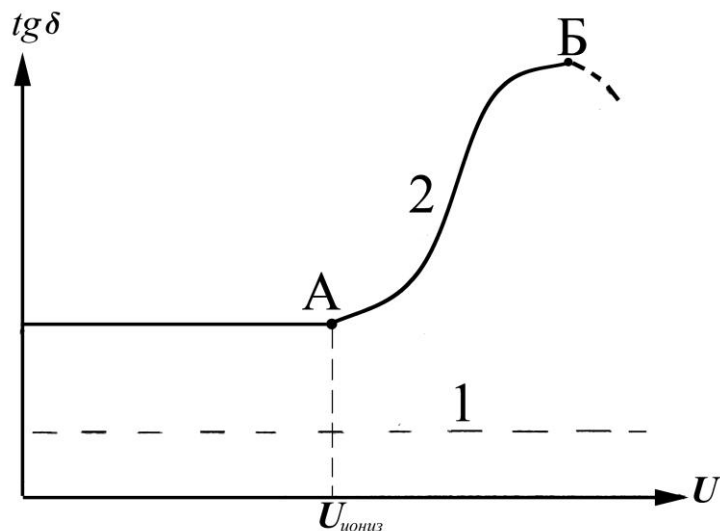


Рис.20

Зависимость вида 1 соответствует качественной однородной изоляции. Наличие излома кривой 2 (точка А) при напряжении ионизации - $U_{\text{иониз}}$ указывает на присутствие в изоляции газовых (воздушных) включений, в которых начинается процесс ионизации при напряжении $U_{\text{иониз}}$. При этом быстро растёт сквозной ток $i_{\text{скв}}$ через изоляцию, а, следовательно, и потери в ней. При напряжении, соответствующем точке Б, газовые (воздушные) включения в

изоляции полностью ионизированы и потери в ней достигают максимума. Работа высоковольтного устройства, в изоляции которого резко выросли потери недопустима, так как в дальнейшем может наступить пробой изоляции и выход из строя высоковольтного устройства. Определение ε и $\operatorname{tg}\delta$ изоляции на промышленной частоте обычно производят с помощью моста переменного тока.

Принципиальная схема такого моста изображена на рис.21.

Здесь: C_x - емкость изоляции объекта измерения;

C_N - образцовый воздушный конденсатор (без потерь);

R_3 - переменное, образцовое, безиндуктивное сопротивление в виде декадного магазина;

C_4 - магазин образцовой переменной емкости с малыми потерями;

R_4 - образцовый резистор;

НИ - нулевой индикатор.

Принципиальная схема моста переменного тока

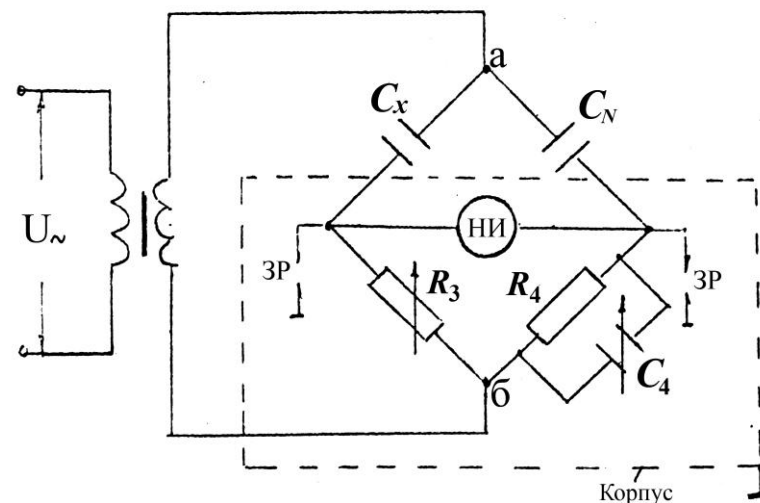


Рис.21

Мостовая схема рис.21, в которой заземлена точка "б" называется нормальной схемой. Измерения по этой схеме производятся когда оба

электрода испытуемого объекта (C_x) изолированы от земли. Мостовая схема рис.21, в которой заземлена точка "а" называется перевернутой. Измерения по ней производятся при наличии "глухого" заземления одного из электродов испытуемого объекта (оболочка кабеля, корпус трансформатора и т.п.)

Ряд заводских высоковольтных мостов переменного тока допускают работу по обеим схемам, а некоторые могут работать только по нормальной схеме.

В заводских мостах ряд элементов схемы помещается в специальной корпус (пунктир на рис.21), который надежно заземляется для обеспечения безопасной работы с мостом. Для защиты от перенапряжений при возможных пробоях изоляции испытуемого объекта (C_x) устанавливаются разрядники ЗР (см. рис.21)

Определение C_x и $\text{tg}\delta$ производится в момент равновесия моста, определяемый по нулевому показанию индикатора НИ.

При равновесии моста переменного тока произведения комплексных сопротивлений его противоположных плеч равны:

$$Z_x Z_4 = Z_N Z_3, \quad (9)$$

где $Z_x = R_x - j \frac{1}{\omega C_x}; \quad (10)$

$$Z_4 = \frac{R_4 \left(-\frac{1}{j\omega C_4} \right)}{R_4 - \frac{1}{j\omega C_4}}; \quad (11)$$

$$Z_N = -\frac{1}{j\omega C_4}; \quad (12)$$

$$Z_3 = R_3. \quad (13)$$

После подстановки выражений (10) - (13) в выражение (9) и его преобразований получим:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}, \quad (14)$$

$$\text{tg}\delta = \omega C_4 R_4. \quad (15)$$

Если взять $R_4 = \frac{10000}{\pi} = 3184 \text{ Ом}$, то при $2\pi f = 100\pi$

$$\text{tg}\delta = \omega C_4 R_4 = \frac{100\pi \cdot 10000}{\pi} C_4 = C_4 \cdot 10^6. \quad (16)$$

При подстановке емкости C_4 в микрофарадах (10^{-6} Ф) $\text{tg}\delta$ численно равняется емкости C_4 ($\text{tg}\delta = C_4$, мкФ).

Величина \mathcal{E} рассчитывается в случае C_x , имеющей форму плоского конденсатора, по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_x a}{\varepsilon_0 S}, \quad (17)$$

где S - площадь электродов конденсатора;

a - толщина изоляции;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая постоянная.

В случае цилиндрической формы C_x значение \mathcal{E} рассчитывается согласно выражению:

$$\mathcal{E} = \frac{C_x \ln \frac{r_H}{r_B}}{2\pi l \varepsilon_0}, \quad (18)$$

где r_H и r_B - наружный и внутренний радиусы изоляции объекта, м;

l - длина объекта, м.

Контроль изоляции по величине сопротивления и коэффициента абсорбции

В процессе эксплуатации высоковольтного устройства сопротивление его изоляции может понизиться из-за ряда дефектов в ней (увлажнение части или всего объема изоляции, загрязнение и т.п.) Периодические измерения величины сопротивления изоляции и сравнение полученных результатов с нормами, установленными для испытуемой изоляции, позволяют своевременно обнаружить развитие в ней дефектов.

Определение сопротивления изоляции (R) производится на постоянном напряжении.

В момент подачи постоянного напряжения на изоляцию испытуемого объекта протекающий через неё ток i состоит из суммы трех токов: i_2 , i_{abc} и i_{ckg} (см. рис.18). Емкостный ток i_2 , обусловленный мгновенными видами поляризации, невелик и прекратится практически мгновенно через время $t \leq 10^{-10}$ с. Ток абсорбции i_{abc} , вызванный замедленными видами поляризации, изменяется во времени по закону:

$$i_{abc} = \frac{U}{R_{abc}} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (19)$$

где $\tau = R_{abc} C_{abc}$ - постоянная времени замедленных видов поляризации.

Как показывает практика i_{abc} уменьшается до нуля через время $t \leq 60$ с.

Сквозной (объемный) ток проводимости $i_{скв}$ при неизменной величине приложенного постоянного напряжения U не зависит от времени t , а его значение равно:

$$i_{скв} = \frac{U}{R_{скв}}, \quad (20)$$

Примерный вид зависимости тока i , протекающего через изоляцию, от времени изображен на рис.22. Ток i_2 здесь не показан, так как он мал и скоротечен.

Зависимость тока i , протекающего через изоляцию от времени

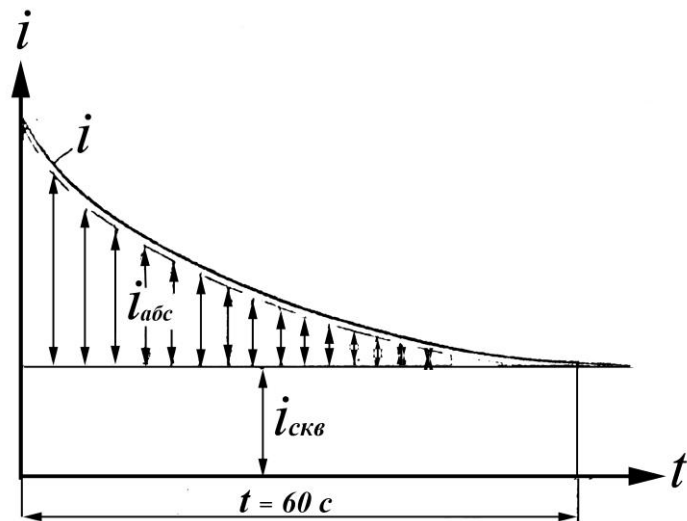


Рис. 22

Через время $t \leq 60$ с ток абсорбции i_{abc} спадает до нуля и ток i через изоляцию достигает установившегося значения $i = i_{скв}$.

Сопротивление изоляции R изменяется во времени обратно пропорционально изменению тока i , т.е. увеличивается за время $t \leq 60$ с до установившегося значения $R = R_{скв}$.

Изменение R и i во времени зависит от качества изоляции. Чем более увлажнена изоляция, тем меньше это изменение. На рис.23 показаны зависимости изменения во времени R сухой (кривая 1) и увлажненной (кривая 2) изоляции высоковольтных устройств.

С целью оценки качества изоляции этих устройств при её профилактических испытаниях, помимо установившихся значений сопротивлений изоляции R - через $t > 60$ с после включения напряжения, измеряют значение сопротивлений R Для $t = 15$ с и $t = 60$ с ($R_{t=15}$ и $R_{t=60}$ - рис.23). Затем определяют коэффициент абсорбции:

$$K_{abc} = \frac{R_{t=60}}{R_{t=15}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (21)$$

Изменение во времени сопротивления изоляции высоковольтных устройств

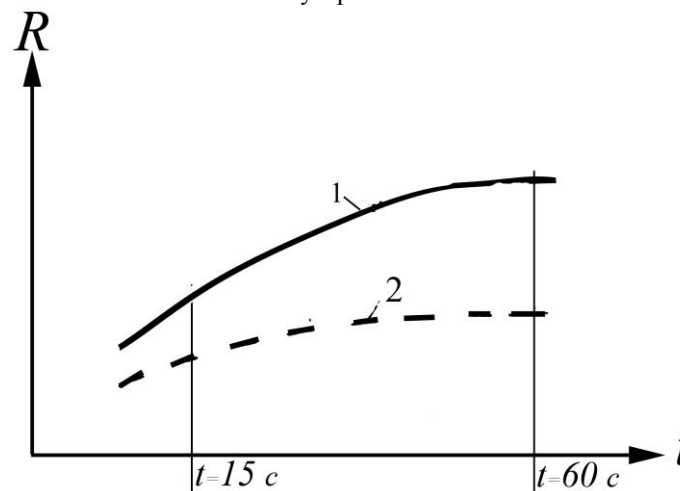


Рис.23

На основании опыта эксплуатации изоляцию принято считать, сухой, если $K_{abc} \geq 1,3$. При увлажнении изоляции K_{abc} приближается к единице.

Коэффициент абсорбции является достоверным показателем степени увлажнения изоляции при температурах $T \leq 35^\circ \text{C}$. При больших величинах T независимо от качества изоляции K_{abc} приближается к единице.

Измерение сопротивления изоляции осуществляется на постоянном напряжении с помощью электромеханических мегомметров с ручным приводом генератора и электронных мегомметров. Напряжение, вырабатываемое генераторами при вращении рукоятки ручного привода, может быть у различных моделей этих мегомметров 500, 1000, 2500 и 5000 В. Измерительный механизм мегомметра - логометр магнитоэлектрической системы. Угол отклонения подвижной системы прибора пропорционален отношению токов, протекающих по двум его измерительным рамкам. Схема включения рамок такова, что отношение токов рамок пропорционально измеряемому сопротивлению изоляции. Выбор модели мегомметра с ручным приводом (с нужной величиной напряжения генератора) производится в соответствии с величиной рабочего напряжения высоковольтного устройства, сопротивление изоляции которого измеряется.

Контроль изоляции по емкостным характеристикам

Для контроля увлажнения изоляции высоковольтных устройств используют зависимости емкости изоляции от частоты и температуры.

В первом случае эта зависимость обусловлена тем, что полярные молекулы воды ($\epsilon = 80$), проникшие в изоляцию, приводят к усилению внутрислойной поляризации - замедленного вида поляризации, требующего для своего завершения определенного времени. Общая ёмкость изоляции при этом возрастает. С повышением частоты процесс замедленной поляризации не успевает завершиться и поэтому емкость увлажненной изоляции уменьшается сильнее по сравнению с емкостью аналогичной сухой изоляции. На рис.24 показаны зависимости изменения емкости C сухой (кривая 1) и увлажненной (кривая 2) изоляции высоковольтных устройств от частоты приложенного напряжения.

Для оценки состояния изоляции этих устройств производят измерения её емкости при низкой частоте $f_1=2 \text{ Гц}$ ($C_f=2 \text{ Гц}$) и при более высокой частоте $f_2=50 \text{ Гц}$ ($C_f=50 \text{ Гц}$). Как показывает практика, замедленная поляризация при $f_2=50 \text{ Гц}$ не успевает завершаться. Поэтому для увлажненной изоляции отношение

$$\frac{C_{f_1=2 \text{ Гц}}}{C_{f_2=50 \text{ Гц}}} = \frac{C_2}{C_{50}} \geq 1,2$$

Зависимость изменения емкости изоляции высоковольтных устройств от частоты приложенного напряжения

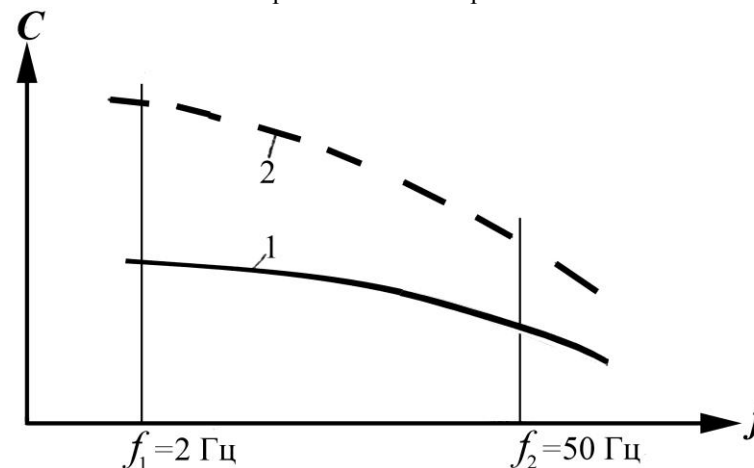


Рис.24

Для сухой изоляции отношение C_2/C_{50} близко к единице и меньше 1,2.

Измерение емкости изоляции на указанных частотах производится по методу её заряда-разряда. Принципиальная схема приборов, реализующих этот метод, изображена на рис.25.

Схема для измерения емкости изоляции на частотах $f_1=2$ и $f_2=50 \text{ Гц}$

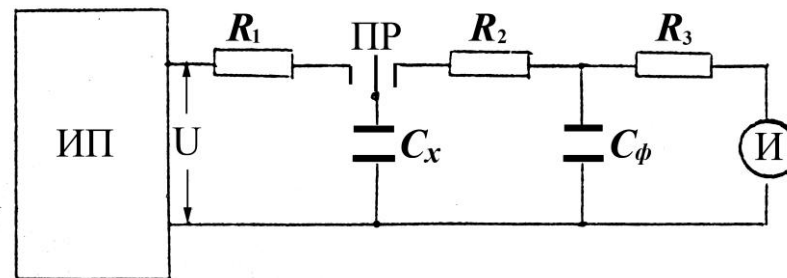


Рис.25

Прибор состоит из стабилизированного источника питания **ИП**, поляризованного реле **ПР**, резисторов R_1, R_2, R_3 емкости C_ϕ и магнитоэлектрического индикатора **И**. Емкость изоляции C_x испытуемого объекта попеременно то заряжается через ограничивающий резистор R_1 , то разряжается через магнитоэлектрический индикатор **И**, снабженный фильтром « $R_2 - R_3 - C_\phi$ ». Переключение конденсатора C_x с заряда на разряд осуществлялся контактами поляризованного реле, катушка которого питается от мульти-вibratorа. Последний имеет две фиксированные частоты, переключения 2 Гц и 50 Гц. Если емкость C_x заряжается до напряжения U и полностью разряжается через индикатор **И**, то количество электричества Q , прошедшее через прибор **И** за один цикл переключения.

$$Q = C_x U \quad (22)$$

Так как количество таких циклов в секунду равно f , то

$$C_x U f = Q f = I_{cp} = I_{и}, \quad (23)$$

где $I_{cp} = I_{и}$ - среднее значение тока, измеряемое индикатором **И**. Т.е. $I_{cp}(I_{и})$ пропорционально C_x , а отношение токов $I_{и}$ при частотах 2 Гц и 50 Гц

$$\frac{I_{и2}}{I_{и50}} = \frac{C_2 \cdot 2}{C_{50} \cdot 50} \quad (24)$$

Измеряя с помощью индикатора эти токи, находят искомое отношение

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{I_{и2} \cdot 50}{I_{и50} \cdot 2} \quad (25)$$

Описанный принцип измерения положен в основу различных моделей приборов ПКВ (приборов контроля влажности) и ПЕКИ (приборов емкостного контроля изоляции). В последних стрелочный индикатор заменен цифровым.

Нагрев увлажненной изоляции приводит к увеличению её емкости, которое обусловлено повышением подвижности полярных молекул и ионов и ускорением процесса замедленной поляризации. Зависимость емкости изоляции от температуры T в диапазоне от 20°C до 80°C также может быть использована для контроля влажности изоляции.

У сухой изоляции нагрев с температуры $T = 20^\circ\text{C}$ до $T = 80^\circ\text{C}$ приводит к увеличению емкости при частоте 50 Гц на 10 ÷ 20%. Т.е. отношение емкости изоляции, находящейся в нагретом состоянии при $T = 80^\circ\text{C} - C_{80} (C_H)$, к емкости в холодном состоянии $C_{20} (C_{хол})$:

$$\frac{C_{80}}{C_{20}} = \frac{C_H}{C_{хол}} \leq 1,2$$

Для увлажненной изоляции это отношение больше 1,2 и может возрасти до 1,8 ÷ 2.

Верхняя граничная температура T выбирается $\leq 80^\circ\text{C}$. Поскольку, как показывает практика, при больших температурах усиленное тепловое хаотическое движение молекул затрудняет процесс поляризации, что приводит к снижению ϵ и емкости изоляции и затрудняет достоверную оценку её состояния.

При определении степени увлажнения объектов, находящихся в эксплуатации в нагретом состоянии, например, изоляция трансформаторов, электродвигателей и т.п., производят измерение емкости C_H сразу после их отключения, а затем после их охлаждения - $C_{хол}$.

Измерения обычно производят с помощью мостов переменного тока.

Контроль изоляции по методу индикации частичных разрядов

При наличии газовых включений в изоляции высоковольтных устройств в этих включениях возникают ионизационные процессы и, как следствие, частичные разряды. Последние сопровождаются высокочастотными колебаниями напряжения. Амплитуда этих колебаний пропорциональна интенсивности частичных разрядов.

Спектр высокочастотных колебаний при частичных разрядах очень широк от нескольких килогерц до 1-2 МГц, но наибольшая интенсивность колебаний на частотах порядка десятка килогерц. Подлежащие выявлению в эксплуатационных условиях частичные разряды имеют, как правило, большую интенсивность. Однако, возможность выявления дефектов изоляции затрудняется внешними помехами, основными, источниками которых являются коронные разряды, работа соседних электроустановок, линий связи, радиостанций и т.п. Коронные разряды, как и частичные, имеют очень широкий частотный спектр, поэтому различить эти разряды можно только при высокой интенсивности частичных разрядов на фоне коронных. Частота помех от работы электроустановок обычно не превышает 3-5 кГц., а от работы устройств связи и радиостанций - свыше 50 кГц. Для отстройки от этих помех индикатор частичных разрядов (ИЧР) должен иметь полосу пропускания (Δf) $5 \text{ кГц} < \Delta f < 50 \text{ кГц}$. Блок-схема одного из вариантов ИЧР изображена на рис.26.

Блок-схема одного из вариантов ИЧР

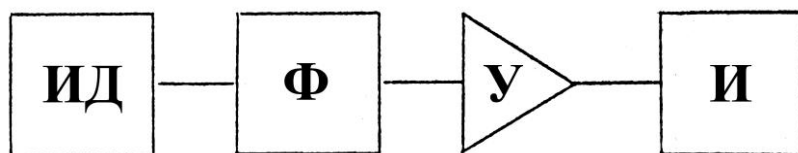


Рис.26

Индуктивный датчик ИД представляет собой высокочастотный трансформатор тока, устанавливаемый на шинах заземления высоковольтных устройств (трансформаторов и т.п.) или нулевых выводов (нейтралей). Измерительным элементом датчика является катушка индуктивности - вторичная обмотка трансформатора тока, намотанная на ферритовом кольцевом сердечнике. Первичной обмоткой является шина с измеряемым током, на которую одевается датчик. Сердечник датчика разъемный и состоит из двух полуколец (1 и 2), заключенных в кожухи (рис.27).

Индуктивный датчик

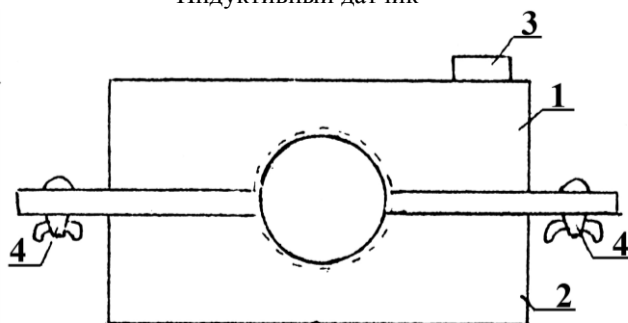


Рис.27

Обмотка расположена на одном (верхнем), полукольце (1), на кожухе которого установлен, разъем 3 для присоединения кабеля. Для установки датчика отвинчиваются гайки 4, шина заземления помещается в центральное отверстие, а затем полукольца стягиваются гайками. Фильтр (Ф) индикатора настраивается на узкую полосу частот $(\Delta f) 5 \text{ кГц} < \Delta f < 50 \text{ кГц}$.

Выходной сигнал после фильтра усиливается усилителем (У) и измеряется выходным индикатором (И). В качестве последнего наибольшее распространение получили малогабаритные электронные

осциллографы (С1-49, С1-55 или аналогичные). По уровню колебаний сигнала на экране осциллографа судят об интенсивности частичных разрядов и, следовательно, о наличии дефектов в изоляции испытуемого объекта.

Определение с помощью ИЧР частичных разрядов в изоляции высоковольтных устройств проводится без вывода их из работы, т.е. непосредственно под рабочим напряжением. Контроль изоляции с помощью ИЧР проводится достаточно широко в высоковольтных устройствах энергосистем. Значительно реже он применяется на электрических ж.д., так как при измерениях частичных разрядов очень сложно отстроиться от помех, создаваемых работающим оборудованием устройств электрической тяги (преобразовательными агрегатами тяговых подстанций и т.п.).

Контроль качества изоляции и диагностика состояния маслонаполненных аппаратов по методу АРГ

Этот метод является наиболее чувствительным и достоверным современным методом определения дефектов в работающем маслонаполненном аппарате (трансформаторе, генераторе и т.п.) на ранней стадии их развития. Многие дефекты в изоляции маслонаполненных аппаратов, а также такие повреждения в них, как дуговые процессы, разряды, сильные нагревы и т.п., сопровождаются выделением газов, которые затем растворяются в масле. Причем, определенному виду дефекта или повреждения соответствует свой, характерный для него спектр газов. Хотя изоляция маслонаполненных аппаратов представляет собой сочетание разнообразных материалов, число газов, выделяющихся при дефектах и повреждениях относительно невелико. Как показывает практика дефекты и повреждения могут быть обнаружены по 7 "ключевым" газам, содержащимся в масле аппарата. Это водород (H_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), окись углерода (CO) и двуокись углерода (CO_2). На основании опыта эксплуатации и диагностики высоковольтных трансформаторов установлено, что водород преобладает в спектре газов при дефектах электрического характера (частичные, искровые и дуговые разряды), ацетилен - при искрении, электрической дуге и нагреве выше $700^\circ C$, этан - при термическом разложении масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур до $300^\circ C$, этилен - при высокотемпературном нагреве (свыше $300^\circ C$) масла и бумажно-масляной изоляции, окись и двуокись углерода - при тепловом старении бумажной изоляции.

Эти газы могут присутствовать и при нормальной работе маслонаполненного аппарата, но их концентрации в этом случае зна-

чительно ниже концентраций газов, образующихся при появлении и развитии дефекта.

Для каждого типа маслонаполненного аппарата на основании опыта эксплуатации установлены предельные (граничные) концентрации указанных выше 7 "ключевых" газов, превышение которых указывает на наличие развивающегося в аппарате дефекта. В табл. 5 приведены значения граничных концентраций газов, растворенных в масле высоковольтных трансформаторов.

Таблица 5

Граничные концентрации растворенных в масле газов

Рабочее напряжение трансформатора	Концентрация газов, % об.						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
110- 500 кВ	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,02	0,6
750 кВ	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,02	0,3

При обнаружении в масле контролируемого высоковольтного аппарата высоких концентраций одного или нескольких газов, превышающих их граничные значения, такой аппарат берется под усиленный контроль - периодичность измерений примерно один раз в месяц (периодичность обычного контроля - один раз в шесть месяцев).

По итогам измерений рассчитывают отношения концентраций трех пар газов, содержащихся в масле аппарата:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_4}{C_2H_6}.$$

Затем на основании рекомендаций, выработанных международной электротехнической комиссией (МЭК), в соответствии с полученными значениями определяют вид дефекта. Эти рекомендации сведены в специальную таблицу, в которой различным значениям отношений концентраций газов и комбинаций этих значений соответствует определенный вид дефекта.

Так, согласно этим рекомендациям для высоковольтных трансформаторов состояние их считается нормальным при следующих значениях отношений пар газов:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1; \frac{CH_4}{H_2} = 0,1-1; \frac{C_2H_4}{C_2H_6} < 0,1.$$

Если $\frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1; \frac{CH_4}{H_2} < 0,1; \frac{C_2H_4}{C_2H_6} < 1,$ то в твердой изоляции

контролируемого трансформатора имеют место частичные разряды, вызванные плохой пропиткой изоляции или её сильным увлажнением.

Аналогично по данным таблицам МЭК могут быть определены и другие виды возможных дефектов. Для определения степени опасности развития дефекта или повреждения маслонаполненного аппарата и своевременного вывода его из эксплуатации в ремонт рассчитывается относительная скорость ν роста концентрации газов, превысивших граничные значения.

Расчет величин ν производится по итогам учащенного контроля на основании выражения:

$$\nu = \frac{A_{t_2} - A_{t_1}}{A_{t_1} (t_2 - t_1)} \cdot 100, \%/\text{мес}, \quad (26)$$

где A_{t_1} и A_{t_2} - концентрация соответствующего газа в начале

t_1 и в конце t_2 времени между анализами.

Если полученные значения $\nu \geq 10\%$ в месяц, то в контролируемом аппарате имеется быстро развивающийся дефект. Такой аппарат должен быть выведен из эксплуатации для проведения последующих испытаний и ремонта.

Метод АРГ включает: отбор проб масла из работающего аппарата, доставку пробы в лабораторию, выделение растворенных в масле газов из взятой пробы, определение состава газов и их концентрации с помощью газового анализатора - хроматографа.

Упрощенная принципиальная схема последнего изображена на рис.28.

Прибор включает две газовые колонки **К₁** и **К₂**, измерительный мост **И** (пунктир на схеме), усилитель **У** и регистрирующее устройство **РУ** (обычно координатный самописец). Газовая колонка **К₂** заполняется специальным порошком - сорбентом, частично поглощающим газы. Два плеча измерительного моста **Р₁** и **Р₂** представляют собой чувствительные терморезисторы, сопротивление которых резко изменяется при изменении температуры. В качестве терморезисторов обычно используются спирали из вольфрама. Эти спирали, а также другие резисторы плеч моста нагреваются током величиной до 150 мА от источника постоянного напряжения **U**, подключенного к диагонали **АВ**.

Перед измерением состава анализируемой газовой смеси производится предварительная настройка прибора. С этой целью в обе

Упрощенная принципиальная схема газового анализатора - хроматографа

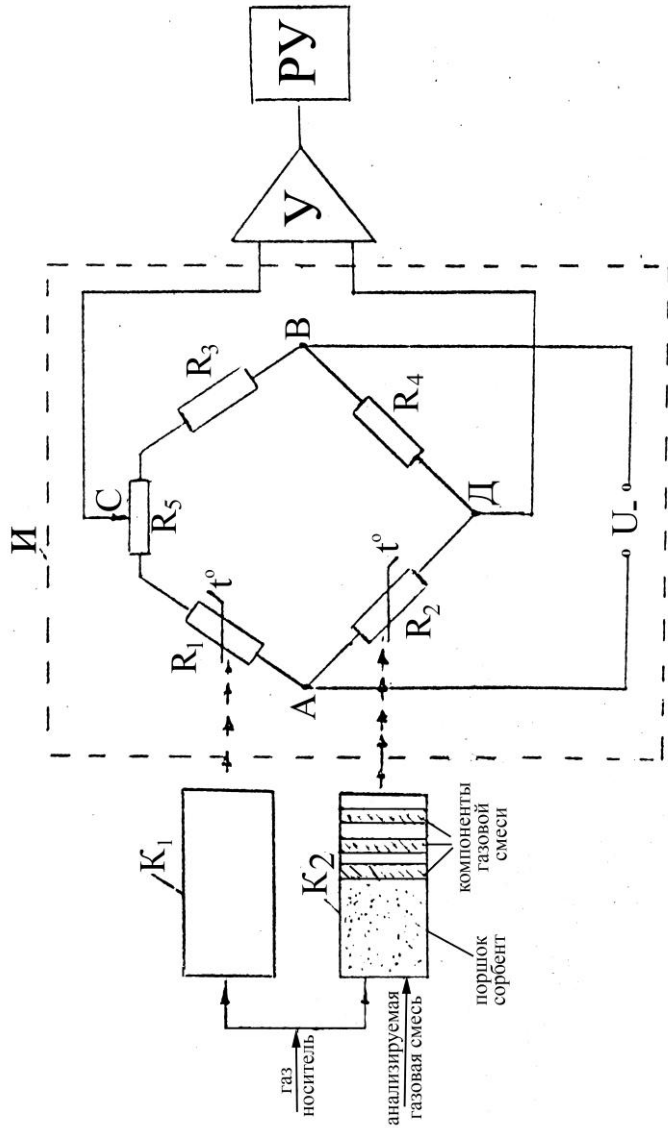


Рис.28

газовые колонки вводится газ носитель (обычно гелий, аргон или азот). Пройдя через колонки этот газ продувает оба терморезистора R_1 и R_2 моста, в одинаковой мере снижая их сопротивления. С помощью подстроечного резистора добиваются полного баланса моста - отсутствия выходного сигнала в его диагонали CD . Самописец при этом рисует горизонтальную нулевую линию.

На этапе измерения в колонку K_2 , помимо газа носителя, вводят анализируемую газовую смесь. Так как коэффициент поглощения (адсорбции) порошком - сорбентом каждого газа анализируемой смеси разный, то в колонке K_2 происходит разделение смеси на газовые компоненты. Газ, имеющий наименьший коэффициент поглощения, выходит из колонки первым, а больший - последним. То есть происходит разделение компонентов газовой смеси по времени выхода. Каждый из выделенных газов имеет разную теплопроводность и отличную от теплопроводности газа-носителя. Поэтому при прохождении каждого газа через терморезистор его сопротивление изменяется, мост разбалансируется, а регистрирующее устройство $ПУ$ фиксирует очередной сигнал. Примерный вид этих сигналов изображен на рис.29.

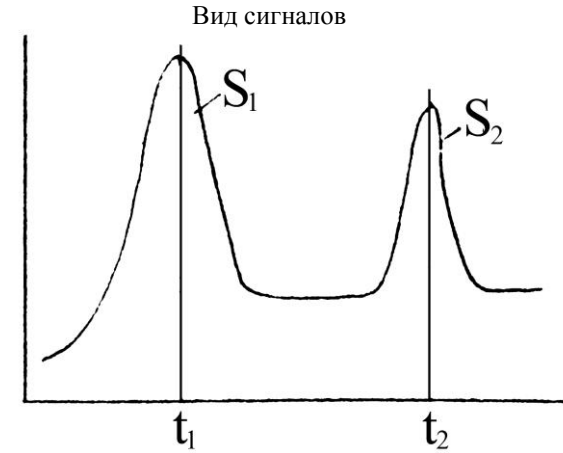


Рис.29

Здесь t_1 и t_2 времена выхода соответствующего газа из колонки K_2 . Площади S_1 и S_2 этих кривых пропорциональны массе соответствующего газа и значениям их концентраций.

Особая ценность метода АРГ состоит в его высокой чувствительности. По этому методу могут быть обнаружены газы с объёмными концентрациями $10^{-4}\%$ об., благодаря чему дефекты могут быть выявлены на самых ранних стадиях их развития.

Контроль изоляции по величине возвратного напряжения ($U_{\text{возвр}}$)

В процессе старения изоляции возрастает её вязкость, что приводит к уменьшению тока абсорбции ($i_{\text{абс}}$). Следовательно по $i_{\text{абс}}$ можно судить о состоянии изоляции и степени её старения. На рис.30 изображена принципиальная схема для измерения параметров изоляции.

Принципиальная схема устройства для измерения параметров изоляции

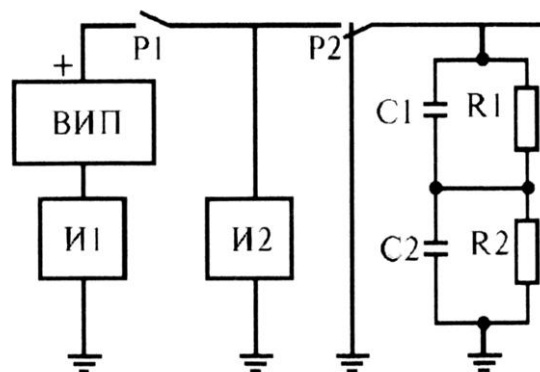


Рис.30

Устройство содержит: высоковольтный стабилизированный источник питания **ВИП** с выходным напряжением 1000 В, измеритель тока **И1**, измеритель напряжения **И2** и два высоковольтных реле **P1** и **P2**, управляемых микропроцессорным контроллером. Схема замещения неоднородной изоляции тягового двигателя представлена в виде двух конденсаторов **C1** и **C2**, зашунтированных резисторами **R1** и **R2**.

Устройство работает следующим образом. Сначала оба реле **P1** и **P2** обесточены, и объект измерения разряжается на землю в течение одной минуты. Затем включаются оба реле, и в течение одной минуты объект испытания заряжается от высоковольтного источника питания. Во время заряда измерителем **И1** измеряется ток утечки, а измерителем **И2** — напряжение на изоляции. Далее автоматически рассчитывается сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции.

Чтобы измерить возвратное напряжение, предварительно заряженную изоляцию кратковременно (в течение 5 с) разряжают на землю (оба реле выключены). Затем реле **P2** включается, а реле **P1** остается выключенным, и напряжение измеряется измерителем **И2** в течение 1 мин. Это напряжение называют возвратным.

По величине возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции. Как показали исследования, наиболее информативным является возвратное напряжение, измеренное на 30-й секунде после начала измерения, которое обозначают $U_{\text{в30}}$.

Если значение возвратного напряжения не менее 80 В, то свойства такой изоляцией можно восстановить средним ремонтом, т. е. пропиткой изоляции и ее сушкой, что позволяет экономить дефицитные обмоточные и изоляционные материалы, требуемые при капитальном ремонте и продляет срок службы тягового электродвигателя до следующего ремонта.

Контроль изоляции повышенным напряжением

Испытания изоляции повышенным напряжением позволяют выявить многие дефекты, особенно сосредоточенные, не обнаруживаемые иными методами. При этом дефектная изоляция пробивается. Вместе с тем приложение чрезмерно высокого напряжения или излишне большая его выдержка может вызвать появление повреждений даже в исправной изоляции. Поэтому, во-первых, профилактические и послеремонтные испытания изоляции повышенным напряжением производятся после контроля ее состояния неразрушающими методами, рассмотренными выше, и, во-вторых, значение испытательного напряжения берется на 10—15 % ниже значения испытательного напряжения для изоляции нового выпускаемого заводом электрооборудования.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если не наблюдалось пробоя или частичных повреждений изоляции, обнаруживаемых по выделению газа, дыма, по звуку и другим признакам.

Испытания проводятся в течение времени, за которое в дефектной изоляции успевают развиваться частичные разряды или даже полный пробой. Практикой установлено, что для этого достаточно 1 мин, и это время указано в нормах на профилактические испытания.

Существенным недостатком испытаний переменным напряжением является необходимость применения мощной испытательной аппаратуры, если емкость объекта велика.

Испытания повышенным постоянным напряжением применяются в основном для испытания объектов большой емкости (кабелей, конденсаторов). Проходящий при этом через изоляцию ток мал и

4.3.11. По данным табл. 4.1 построить зависимость $\text{tg}\delta = f(U)$ и сделать заключение о качестве испытанной изоляции.

Задание 2. Измерение сопротивления и коэффициента абсорбции изоляции.

4.3.12. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями, изложенными на страницах 38 – 41 данного пособия и инструкцией по эксплуатации омметра, используемого в данной работе.

4.3.13. Подключить в соответствии с инструкцией электроды испытываемого объекта к клеммам омметра.

4.3.14. Измерить величины сопротивлений изоляции через 15 с (R_{15}) и 60 с (R_{60}) после подачи напряжения омметра на объект.

4.3.15. Рассчитать на основании выражения (21) величину коэффициента абсорбции $K_{абс}$.

4.3.16. Результаты измерений и расчетов свести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений сопротивления изоляции

Тип изоляции	R_{15} , Ом	R_{60} , Ом	$K_{абс}$

4.3.17. На основании данных табл. 4.2 сделать заключение о качестве испытанной изоляции.

4.4. Контрольные вопросы

4.4.1. Чем вызываются диэлектрические потери в изоляции электротехнических устройств?

4.4.2. Как влияет величина приложенного напряжения на значения $\text{tg}\delta$ однородной и неоднородной изоляции?

4.4.3. Какой процесс приводит к росту $\text{tg}\delta$ в неоднородной изоляции?

4.4.4. Как оценивается качество изоляции по величине $\text{tg}\delta$?

4.4.5. В каких случаях применяются "нормальная" и "перевернутая" схемы измерительного моста переменного тока?

4.4.6. Как изменяются во времени ток и сопротивление изоляции при подаче на неё постоянного напряжения?

4.4.7. Что такое коэффициент абсорбции и как по его величине оценить качество испытываемой изоляции?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. - 280 с
2. Касаткин Г.С., Липатов Н.Н., Федотов В.В. Исследование влияния ёмкостей изоляции на токи и напряжения в высоковольтных конструкциях: Методические указания к лабораторным работам. - М.: МИИТ, 2000. – 24с.
3. Касаткин Г.С. Контроль изоляции высоковольтных устройств: Методические указания к лабораторной работе. - М.: МИИТ, 1994. – 32с.
4. Базуткин В. В. и др. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов/ В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталъ; Под общ. ред. В. П. Ларионова. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 464 с: ил.
5. Потапов В.Д. и др. Полимерные материалы в устройствах контактной сети. -М.: Транспорт. 1988. -224с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.....3	
1.1. Изоляция и конструкция изоляторов	3
1.2. Изоляция силовых кабелей	14
1.3. Изоляция конденсаторов	19
1.4. Изоляция силовых трансформаторов.....	28
2. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И ЕЕ ДЕФЕКТЫ.....	30
3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ.....	32
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «Контроль изоляции электро- технических устройств»	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	56