

Мороз Н. К.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ




«Инфра-Инженерия»

УДК 621.31
ББК 31.23+32.843
М80

Мороз, Н. К.

М80 Электротехническое материаловедение : учебник / Н. К. Мороз. –
Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 148 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0390-0

Рассмотрены основные свойства наиболее применяемых в электротехнической промышленности материалов – диэлектрических, магнитных, проводниковых и полупроводниковых. Показана физическая симметрия свойств диэлектрических и магнитных материалов, исследован характер их взаимодействия с электрическим и магнитным полем. Изложены основные процессы, происходящие в материалах при воздействии тех или иных факторов, в частности нетрадиционного электроосмотического метода сушки и влагозащиты изоляции электрических машин и трансформаторов. Приведены сведения о сверхпроводниках и перспективах их использования.

Для студентов электротехнических и энергетических вузов, а также инженеров различных электротехнических специальностей.

УДК 621.31
ББК 31.23+32.843

ISBN 978-5-9729-0390-0

© Мороз Н. К., 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Роль симметрии в окружающем мире	6
ГЛАВА 1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	8
§ 1.1. Общие свойства диэлектриков	9
1.1.1. Поляризация диэлектриков	9
1.1.2. Основные виды поляризации диэлектриков	11
1.1.3. Проводимость диэлектриков	15
1.1.4. Внешние факторы, влияющие на удельное сопротивление диэлектриков	17
1.1.5. Сопротивление изоляции.	17
1.1.6. Потери энергии в диэлектрике	18
1.1.7. Угол потерь диэлектрика	19
1.1.8. Факторы, влияющие на угол потерь диэлектриков	21
1.1.9. Электрическая прочность диэлектриков.....	21
1.1.10. Пробой газообразных диэлектриков.....	22
1.1.11. Пробой жидких диэлектриков	24
1.1.12. Пробой твердых диэлектриков	25
1.1.13. Старение диэлектриков в электрическом поле	26
1.1.14. Электретное состояние диэлектриков	28
1.1.15. Пьезоэлектрический эффект в диэлектриках.....	29
§ 1.2. Неэлектрические свойства диэлектриков.....	30
1.2.1. Механические свойства диэлектриков.....	30
1.2.2. Физические свойства диэлектриков.....	31
1.2.3. Методы влагозащиты изоляции.....	32
1.2.4. Тепловые свойства диэлектриков.....	33
1.2.5. Влияние излучений высокой энергии на свойства диэлектриков.....	34
§ 1.3. Диэлектрики, применяемые в электротехнике.....	35
1.3.1. Классификация диэлектриков.....	35
1.3.2. Органические диэлектрики	37
1.3.2.1. Органические диэлектрики вспомогательного назначения	37
1.3.2.2. Волокнистые органические диэлектрик	42
1.3.2.3. Пластические массы	44
1.3.3. Неорганические диэлектрики	48
1.3.4. Фторорганические и кремнийорганические диэлектрики	52
§ 1.4. Электрические конденсаторы	52
1.4.1. Классификация конденсаторов	54
1.4.2. Силовые конденсаторы.....	55
§ 1.5. Симметрия свойств диэлектрических и магнитных материалов	55
ГЛАВА 2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	61
§ 2.1. Общие свойства магнитных материалов.....	61
§ 2.2. Классификация магнитных материалов.....	69
2.2.1. Магнитомягкие материалы.....	69
2.2.2. Магнитотвердые материалы.....	76
§ 2.3. Немагнитные материалы на основе железа.....	80

§ 2.4. Магнитострикционный эффект в магнитных материалах	80
ГЛАВА 3. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	82
§ 3.1. Основные свойства проводников	82
§ 3.2. Материалы высокой проводимости	85
§ 3.3. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов	90
§ 3.4. Биметаллы	90
§ 3.5. Металлокерамические материалы, или керметы	91
§ 3.6. Сопротивление проводников на высоких частотах	92
§ 3.7. Сопротивление тонких металлических пленок.....	94
§ 3.8. Проводниковые материалы высокого сопротивления	95
§ 3.9. Углерод как проводниковый материал	98
§ 3.10. Тензометрические сплавы	99
§ 3.11. Контактные явления и термоэлектродвижущая сила.....	100
§ 3.12. Температурный коэффициент линейного расширения проводников...	101
§ 3.13. Припои.....	101
§ 3.14. Флюсы	102
§ 3.15. Сверхпроводимость металлических проводников	102
§ 3.16. Практическое использование явления сверхпроводимости	108
§ 3.17. Провода и кабели	109
ГЛАВА 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	112
§ 4.1. Элементарные полупроводники. Общие сведения.....	112
4.1.1. Собственная проводимость.....	113
4.1.2. Подвижность электронов и дырок	114
4.1.3. Примесная проводимость.....	114
4.1.4. Температурная зависимость проводимости полупроводников	115
4.1.5. Зависимость проводимости от напряженности поля	116
§ 4.2. Электронно-дырочные переходы	117
4.2.1. Диффузия электронов и дырок.....	119
4.2.2. Инжекция носителей	120
4.2.3. Прямой и обратный токи через p - n -переход	120
4.2.4. Вентильный фотоэффект	121
§ 4.3. Внутренний фотоэффект	122
§ 4.4. Эффект Холла.....	126
§ 4.5. Эффект Эттингсгаузена.....	128
§ 4.6. Термоэлектрические явления в полупроводниках.....	128
§ 4.7. Термочувствительность полупроводников	131
§ 4.8. Нелинейные свойства полупроводников в электрическом поле....	133
§ 4.9. Кремний.....	134
§ 4.10. Германий.....	135
§ 4.11. Способы получения чистых полупроводников.....	135
§ 4.12. Методы получения p - n -перехода.....	138
§ 4.13. Методы получения элементов интегральных схем	139
Библиографический список	141
Приложение. Теория электроосмотического перемещения влаги в изоляции электрических машин и трансформаторов	142

ГЛАВА 1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основное назначение диэлектрических материалов (диэлектриков) – усиливать электрическое поле в конденсаторах. Именно поэтому основным свойством диэлектриков является способность поляризоваться в электрическом поле. Эту способность характеризует коэффициент, называемый диэлектрической проницаемостью, ϵ .

Сразу следует отметить, что один и тот же диэлектрический материал может быть использован и по другому назначению – в качестве электроизолирующего. В этом случае определяющим свойством является способность материала препятствовать прохождению электрического тока. Эта способность характеризуется удельным сопротивлением ρ . Нередко отдельные диэлектрические материалы находят более широкое применение именно в качестве электроизолирующих.

Из сказанного становится ясно, что не следует считать слова диэлектрические и электроизолирующие синонимами (синонимы – это слова одной и той же части речи, которые по-разному называют один и тот же предмет или явление).

Диэлектрики взаимодействуют с электрическим полем (электрической компонентой электромагнитного поля). Далее рассмотрим, в чём это выражается. Простейшее представление об электрическом поле можно получить, представив работу плоского конденсатора при подаче на его электроды постоянного напряжения от источника питания. На поверхности электродов появляются заряды противоположного знака, которые обуславливают электрический поток. Иными словами, источником электрического поля является разность потенциалов.

Напряженность электрического поля, E :

$$E = U / d, \text{ В/м,}$$

где U – напряжение, В,

d – расстояние между электродами, м.

Исторически сложилось, что электрический поток между двумя электродами (в конденсаторах их ещё называют пластинами, или обкладками), находящимися под напряжением, характеризуется электрическим зарядом Q , который прошёл бы по проводнику, если его поместить между этими электродами.

Электрическая индукция, D – это плотность электрического потока, то есть это количество электрических силовых линий, проходящих перпендикулярно поверхности электродов через 1 м^2 . С другой стороны, электрическая индукция – это плотность зарядов, выделившихся на 1 м^2 поверхности электрода. Общепринято определять электрическую индукцию численно равной количеству зарядов, приходящихся на 1 м^2 площади поверхности электрода:

$$D_o = Q_o / S, \text{ Кл/м}^2,$$

где D_o – электрическая индукция при наличии между электродами вакуума,
 Q_o – суммарный заряд на поверхности электрода, Кл,
 S – площадь поверхности электрода, м².

В то же время

$$Q_o = C_o \cdot U, \text{ Кл},$$

где C_o – электрическая емкость, Ф. Это коэффициент пропорциональности между напряжением на электродах и зарядом на поверхности этих электродов в вакууме.

Для того чтобы связать электрическую индукцию D_o в вакууме и напряженность электрического поля E , вводится коэффициент, называемый электрической постоянной, ϵ_o :

$$D_o = Q_o / S = \epsilon_o \cdot E, \text{ Кл/м}^2.$$

Электрическая постоянная ϵ_o численно равна $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м.

Следует обратить внимание на то, что это значение ϵ_o вычислено по формуле для скорости электромагнитного излучения (скорости света):

$$c = \sqrt{1 / \epsilon_o \cdot \mu_o}.$$

Магнитная постоянная

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,5664 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Вычисление μ_o подробно описано в главе 2 «Магнитные материалы».

§ 1.1. Общие свойства диэлектриков

Для оценки эксплуатационных свойств диэлектриков и возможных областей их применения необходимо изучить взаимодействие этих материалов с электрическим полем и определить их основные электрические, механические, тепловые, влажностные и физико-химические характеристики.

1.1.1. Поляризация диэлектриков

Рассмотрим, что произойдет, если вакуум между плоскими электродами конденсатора заменить каким-либо диэлектрическим материалом (он может быть твердым, жидким или газообразным). Под действием электрического поля произойдет поляризация, обусловленная смещением связанных зарядов в диэлектрике. Положительные заряды смещаются в сторону отрицательного электрода, а отрицательные – в сторону положительного электрода. При этом на поверхности диэлектрика, прилегающего к отрицательному электроду, появляется положительный заряд, а на поверхности диэлектрика, прилегающего к положительному

электроду, появляется отрицательный заряд. На границе раздела двух материалов, в данном случае металла и диэлектрика, возникает двойной электростатический слой, обуславливающий контактную разность потенциалов. Обозначим напряженность контактного поля как E_k (рис. 1.1).

Направление контактных полей совпадает с направлением внешнего поля, созданного источником питания. Суммирование этих полей приводит к усилению электрического поля в конденсаторе. При этом увеличивается плотность электрического потока между электродами и плотность зарядов на поверхности этих электродов.

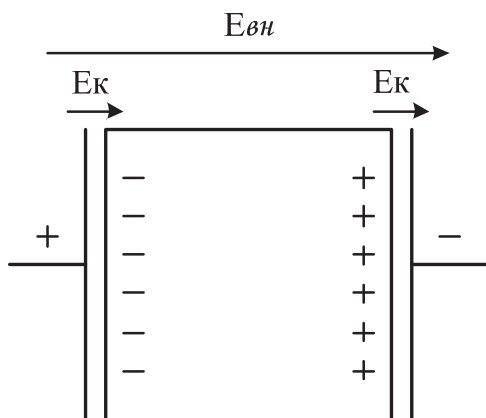


Рис. 1.1. Распределение электрических полей в поляризованном диэлектрике

В этом вся суть взаимодействия электрического поля и диэлектрических материалов: электрическое поле воздействует на диэлектрик и вызывает его поляризацию, а поляризованный диэлектрик, в свою очередь, усиливает поле, которое его поляризовало.

Способность материала поляризоваться характеризуется коэффициентом диэлектрической проницаемости, ϵ .

Количество добавочных силовых линий электрического поля в конденсаторе (или добавочный заряд на поверхности электродов) за счет поляризации диэлектрика, внесенного между электродами, рассчитанное на единицу площади поверхности электрода, называется *поляризованностью*:

$$P = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot E, \text{ Кл/м}^2.$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость вещества. Это коэффициент, характеризующий способность данного материала воспринимать воздействие электрического поля и усиливать его, увеличивая плотность зарядов на электродах. Для разных материалов эта способность различна.

Увеличенное значение электрической индукции, D' , после внесения между электродами твердого или жидкого диэлектрика, определяется по формуле:

$$D' = D_0 + P = \varepsilon_0 \cdot E + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi) \cdot E = \varepsilon_a \cdot E, \text{ Кл/м}^2,$$

где $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi)$, Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0 \cdot (1 + \chi)}{\varepsilon_0} = 1 + \chi,$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость, которая является безразмерной величиной. Именно значение ε приводится в справочной литературе. Прилагательное «относительная» для простоты не произносится.

Надо иметь в виду, что ε не может быть меньше 1, так как коэффициент χ в вакууме равен нулю.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε показывает, во сколько раз увеличиваются ёмкость конденсатора C' и электрическая индукция D' , когда между его обкладками вакуум заполняют каким-либо диэлектриком:

$$\varepsilon = C' / C_0 = D' / D_0.$$

Явление поляризации диэлектриков представляет интерес потому, что оно вызывает увеличение электрического потока и, как следствие, электрической ёмкости конденсатора. Ёмкость конденсатора при введении между электродами твёрдого или жидкого диэлектрика может быть определена по формуле:

$$C = \frac{Q + \Delta Q}{U} > C_0.$$

Таким образом, чем больше ε диэлектрика, тем больше ёмкость конденсатора с этим диэлектриком. Наименьшей величиной ε обладают газы. Для сухого воздуха при нормальном давлении и температуре $\varepsilon = 1,0006$.

1.1.2. Основные виды поляризации диэлектриков

Явление поляризации характеризуется смещением связанных зарядов в диэлектрике под действием электрического поля. Процесс этот сложный и в разных диэлектриках может происходить по-разному, определяя различные значения ε . Существует достаточно большое количество различных видов поляризации. К основным её видам относятся следующие.

Электронная поляризация – смещение электронов в атомах диэлектрика по направлению к положительному электроду. Этот вид поляризации имеет место во всех без исключения диэлектриках. Другие виды добавляются к электронной. Диэлектрики, обладающие только электронной поляризацией, называют неполярными, для них $\varepsilon = 2,5$. Этот вид поляризация относительно слабый. При электронной поляризации смещение D возрастает прямо пропорционально напряженности

поля E , а потому ϵ не зависит от E . Электронная поляризация происходит практически мгновенно, а потому у неполярных диэлектриков ϵ не зависит от частоты. Зависимость ϵ от температуры при электронной поляризации определяется только зависимостью плотности вещества от температуры. При нагревании вещество расширяется, плотность падает, а следовательно, уменьшается число атомов и электронов в единице объема. Это способствует ослаблению поляризации. Электронная поляризация происходит без потерь энергии, поэтому не сопровождается нагревом.

Примеры неполярных диэлектриков: нефтяное масло, октол, парафин, полистирол, полиэтилен, фторопласт-4.

Ионная поляризация – смещение ионов в узлах кристаллической решетки под действием электрического поля. Имеет место только у диэлектриков, представляющих собой ионные кристаллы, у которых в узлах решетки размещены не атомы, а ионы. Например, кристалл каменной соли NaCl имеет форму куба, который построен из чередующихся ионов Na^+ и Cl^- . При воздействии электрического поля ионы натрия будут смещаться в сторону отрицательного электрода, а ионы хлора – в сторону положительного. Это значительно более сильная поляризация, чем электронная: $\epsilon = 30$. Ионная поляризация происходит достаточно быстро, поэтому ϵ не зависит от частоты.

Так же как и при электронной поляризации, D пропорционально E и ϵ не зависит от E . При повышении температуры расстояния между ионами в решетке возрастают и ослабевают связывающие их силы, поэтому поляризуемость увеличивается, т. е. ионам легче смещаться под действием поля. В связи с этим ϵ ионных диэлектриков возрастает при увеличении температуры.

Примеры диэлектриков с ионной поляризацией: слюда, некоторые виды керамики. Особый случай представляют керамические материалы на основе двуокиси титана: TiO_2 («титонды»). В этих материалах, наряду с ионной, имеет место необычно сильная электронная поляризация, в связи с чем ϵ у них резко увеличена и составляет 50–150. Ввиду преобладания электронной поляризации, при повышении температуры ϵ этих материалов не растет, а снижается. Смешивая обычный керамический материал с материалом на основе TiO_2 , можно использовать разный характер зависимости $\epsilon = f(t)$ и получить материал, у которого ϵ практически не изменяется с изменением температуры. В результате получается термокомпенсированная керамика. Она применяется для изготовления термостабильных конденсаторов, у которых электрическая ёмкость не зависит от окружающей температуры.

Дипольная поляризация – поворот дипольных молекул (диполей) под действием электрического поля. Дипольные молекулы отличаются от нейтральных молекул тем, что центры тяжести положительного и отрицательного заряда в них не совпадают и заряды разного знака смещены к концам молекулы. В силу этого молекула обладает электрическим моментом, под действием которого стремится

повернуться в электрическом поле так, чтобы положительный конец был повернут к отрицательному электроду, а отрицательный – к положительному.

Электрический момент появляется при несимметричном строении молекулы. Например, молекула метана CH_4 построена симметрично и является нейтральной. При хлорировании метана получается хлористый метил CCl_3H – эта молекула имеет несимметричное строение и является диполем. Если довести хлорирование до конца, то получается четыреххлористый углерод CCl_4 . Его молекула имеет симметричное строение и не является диполем.

Несимметричное строение имеют молекулы воды, которые тоже представляют собой диполи.

Дипольная поляризация происходит относительно медленно и сопровождается потерями энергии, затрачиваемой на преодоление внутреннего трения в материале при повороте диполей. В области радиочастот 10^6 – 10^8 Гц период изменения поля соизмерим со временем установления поляризации. Поэтому с переходом в область высоких частот дипольные молекулы не успевают поворачиваться при быстрых изменениях направления поля, поляризация ослабевает и ϵ снижается. При таких частотах, когда диполи останавливаются, не успевая следовать за изменениями поля, ϵ снижается до значения $\epsilon_{\text{эл}}$, обусловленного электронной поляризацией, которая присутствует, как уже говорилось, во всех диэлектриках.

Зависимость ϵ полярного диэлектрика от температуры обусловлена вязкостью. В области низких температур вязкость вещества велика, диполи неподвижны. При нагревании материал размягчается (вязкость, т. е. внутреннее трение, уменьшается), и диполи начинают поворачиваться. В это время происходит увеличение значения ϵ . В области высоких температур правильной ориентации диполей мешает усилившееся тепловое движение, и ϵ начинает снижаться с ростом температуры.

Примеры полярных диэлектриков: совол (пентахлордифенил), касторовое масло, канифоль, целлюлозные материалы (бумага, картон, ткань), полихлорвинил, фторопласт-3 и т. д.

Обычно ϵ при дипольной поляризации не очень велика – 3,5–7 и редко 10–20. Для сильно полярных жидкостей ϵ увеличена: у воды – 80, у спиртов – 20–30.

Спонтанная (сегнетоэлектрическая) поляризация свойственна особой группе веществ, называемых сегнетоэлектриками, по названию сегнетовой соли, первого вещества, для которого был обнаружен этот вид поляризации. В сегнетоэлектриках имеются определенные области, «домены», в которых в отсутствие внешнего электрического поля диполи уже самопроизвольно (спонтанно) ориентированы параллельно друг другу. Поэтому домены обладают электрическим моментом. Однако направление ориентации у разных доменов различно. Поэтому в целом материал электрическим моментом не обладает. При воздействии внешнего электрического поля происходит смещение границ доменов и изменение направления поляризации в них.

Спонтанная поляризация оказывается очень сильной, и даже в слабых электрических полях можно получить эффект насыщения, когда все диполи ориентированы параллельно друг другу, задолго до напряжений, вызывающих пробой (рис. 1.2, а). Диэлектрическая проницаемость ε сильно изменяется с изменением поля (рис. 1.2, б), что является очень важным отличием сегнетоэлектриков от других диэлектриков. Это свойство обеспечивает возможность управлять ёмкостью конденсаторов с сегнетоэлектриком с помощью электрического поля (рис. 1.2, г). Это так называемые конденсаторы с электрическим изменением ёмкости, в отличие от конденсаторов с механическим изменением ёмкости.

Величина ε_{max} достигает значений до 10 000 и более. Зависимость ε от температуры для сегнетоэлектрика (рис. 1.2, в) характеризуется наличием максимума в точке Кюри. При температуре выше точки Кюри спонтанная поляризация исчезает, и ε резко падает. При температурах выше точки Кюри зависимость ε от E отсутствует.

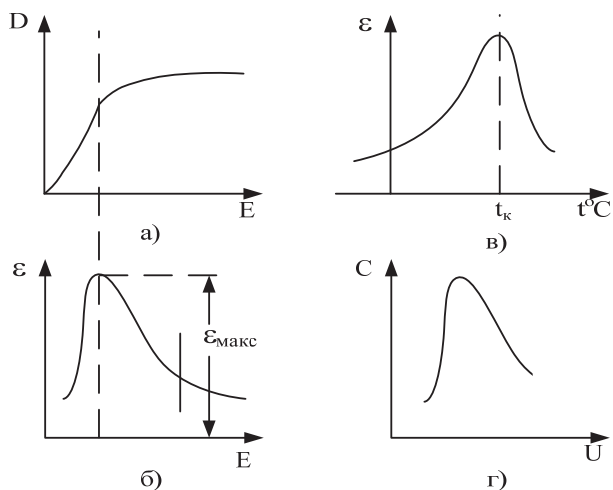


Рис. 1.2. Свойства сегнетоэлектриков

Сегнетоэлектрическими свойствами обладает титанат бария $BaTiO_3$. Наряду с высокой ε , сегнетоэлектрики имеют резко выраженную зависимость ε от E (рис. 1.2, б). Поэтому ёмкость изготовленных из них конденсаторов зависит от приложенного напряжения (рис. 1.2, г). Это конденсаторы с электрическим управлением ёмкости, «вариконды». Их применяют в усилителях, умножителях частоты, стабилизаторах напряжения и пр.

Так как структура сегнетоэлектриков состоит из доменов, то в них имеет место быть гистерезис. Электрический гистерезис – это отставание изменения электрической индукции от напряжённости электрического поля (рис. 1.3).

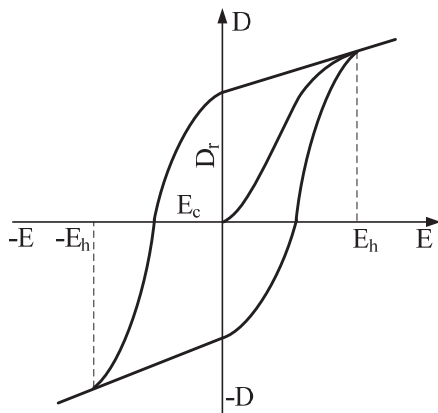


Рис. 1.3. Петля гистерезиса для сегнетоэлектриков

Практическое значение ϵ диэлектрика: эта характеристика показывает, насколько сильно поляризуется диэлектрик в конденсаторе и усиливает электрическое поле в нём, а также насколько при этом увеличивается ёмкость самого конденсатора.

1.1.3. Проводимость диэлектриков

Идеальные диэлектрики ток не проводят, так как свободные носители зарядов в них отсутствуют.

Реальные диэлектрики ток проводят, и он обусловлен направленным движением потока ионов. Количественно и качественно проводимость диэлектриков резко отличается от проводимости металлов. В металлах ток обусловлен направленным движением потока электронов, концентрация которых велика. Величина тока в диэлектрике на несколько порядков меньше, чем в металлах.

Ионы в реальном диэлектрике появляются за счет примесей, попадающих в материал в процессе его изготовления и эксплуатации. Именно примеси в процессе работы диссоциируют на ионы.

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая поляризационные токи, или токи смещения, в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризации столь кратковременны, что их не удастся зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большинства технических диэлектриков, называют абсорбционными токами. При постоянном напряжении абсорбционные токи протекают только в моменты включения и выключения напряжения. При переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения

материала в электрическом поле. Таким образом, полный ток в диэлектрике представляет собой сумму токов утечки (сквозной ток) и токов смещения (рис. 1.4).

Поляризационные токи необходимо принимать во внимание при измерении проводимости диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его ток абсорбции, вследствие чего может возникнуть неправильное представление о большой проводимости. Поэтому сквозной ток считают через одну минуту после подачи измерительного напряжения.

Характеристикой проводимости, как и у металлов, обычно служит обратная ей величина – удельное сопротивление, ρ . Если для металлов $\rho = 10^{-6}$ Ом·м, то для диэлектриков $\rho = 10^{10}$ – 10^{20} Ом·м.

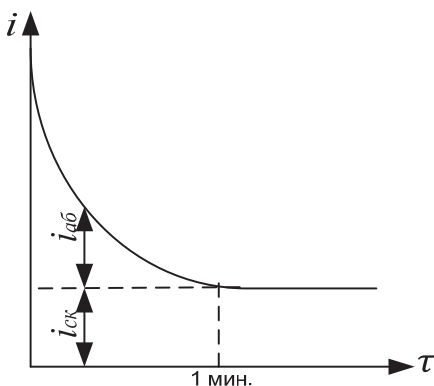


Рис. 1.4. Зависимость тока через диэлектрик от времени:
 $i_{аб}$ – ток абсорбции (поляризационный ток или ток смещения),
 $i_{ск}$ – сквозной ток (ток утечки)

Ввиду того, что диэлектрик легче загрязнить с поверхности, определяют ток утечки по поверхности, $i_{нов}$ ($\rho_{нов}$) и через толщу, $i_{об}$ ($\rho_{об}$). Для определения поверхностного тока утечки на поверхность диэлектрика помещают электроды, выполненные в виде ножей, к которым прикладывают напряжение. Для определения $i_{нов}$ ($\rho_{нов}$) необходимо знать уровень напряжения, расстояние между ножами и ширину ножей (определяют ширину пути тока). Неодинаковая размерность величин $\rho_{нов}$ (Ом) и $\rho_{об}$ (Ом·м) подчеркивает, что это различные физические характеристики, показывающие два свойства диэлектрика: проводить ток по поверхности и через толщу материала.

Поляризационные токи необходимо принимать во внимание при измерении проводимости диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержки

образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его ток абсорбции, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости.

Поскольку определение поляризационных токов даже замедленных видов поляризации представляет некоторые трудности, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после подачи напряжения и принимаемый за сквозной ток.

1.1.4. Внешние факторы, влияющие на удельное сопротивление диэлектриков

Влияние влажности окружающей среды. Воздух, окружающий изоляцию, всегда содержит пары воды. Влажность воздуха характеризуется относительной величиной $\varphi = A / M \cdot 100(\%)$, где A – содержание водяных паров в единице объема, а M – максимальное количество паров, которое может быть растворено в единице объема воздуха при заданной температуре. Нормальная влажность воздуха $\varphi = 65 \%$ (закрытые отапливаемые помещения), повышенная влажность $\varphi = 80 \%$ (закрытые неотапливаемые помещения), высокая влажность $\varphi = 100 \%$ (работа на открытом воздухе).

Вода, осаждаясь на поверхности диэлектрика, проникает в его толщу и вызывает резкое увеличение тока утечки, снижая величину удельного сопротивления, иногда более чем в 10^6 раз. Это объясняется тем, что вода сама по себе имеет достаточно высокую проводимость, 10^3 – 10^6 Ом·м, кроме того, она способствует диссоциации примесей на ионы, что ещё больше увеличивает проводимость. Поглощение влаги объясняется наличием пор и микротрещин в материале.

Влияние температуры. При нагревании диссоциация примесей усиливается, число свободных ионов возрастает и удельное сопротивление диэлектрика резко снижается. Этот процесс описывается эмпирическим уравнением:

$$\lg \rho_t = \lg \rho_{20} - \beta(t - 20^\circ \text{C}),$$

где для неорганической изоляции $\beta = 0,01$ – $0,02$, а для органической порядка $0,03$ – $0,04$. Приняв $\beta = 0,03$, находим, что при нагреве до $t = 120^\circ \text{C}$ удельное сопротивление снизится в 1000 раз по сравнению с его значением при 20°C . Колебания температуры в пределах 15 – 25°C могут изменять ρ примерно в два раза. Создание диэлектриков, работающих при высоких температурах, необходимо для повышения значения ρ .

1.1.5. Сопротивление изоляции

Сопротивление изоляции – характеристика изоляции в машинах и аппаратах, представляющая собой сопротивление постоянному току между изолированными проводниками или между каждым изолированным проводом и корпусом. Величина $R_{из}$ измеряется в килоомах (10^3 Ом), мегаомах (10^6 Ом), тераомах (10^{12} Ом).

Прибор для измерения $R_{из}$, мегомметр, состоит из генератора постоянного напряжения, в цепь которого включен миллиамперметр и нагрузка в виде изоляции. Выходные клеммы мегомметра подключают либо к токоведущим частям электрической машины, либо к токоведущей части и корпусу. Особенностью источника (генератора) постоянного напряжения (в отличие от источника тока) является постоянное напряжение на выходе, независимо от нагрузки и изменения тока нагрузки. Таким образом, уровень $R_{из}$ мы фактически оцениваем по току утечки через толщу изолирующих материалов. Шкала миллиамперметра проградуирована в единицах сопротивления на основании закона Ома, поэтому позволяет сразу увидеть величину сопротивления изоляции. Конструктивно мегомметры могут быть выполнены различно, но принцип их работы одинаков.

Промышленные мегомметры выполнены на напряжения 500, 1000, 2500 В для измерения сопротивления изоляции низковольтного и высоковольтного оборудования.

На практике при контроле состояния изоляции крупных электрических машин и трансформаторов дополнительно определяют так называемый *коэффициент абсорбции*, $Kабс = R_{60} / R_{15}$, где R_{15} , R_{60} – значения сопротивления изоляции, которые показал прибор через 15 и 60 сек. после подачи напряжения.

Различие показаний мегомметра через 15 и 60 сек. обусловлено токами абсорбции (рис. 1.4). Чем сильнее изоляция увлажнена, тем $Kабс$ будет меньше. Согласно действующим правилам, $Kабс$ для нормальной изоляции при температуре 10–20 °С должен быть не менее 1,3. Для увлажненной изоляции он, как правило, близок к единице. Необходимо учитывать и тот факт, что при увеличении температуры $Kабс$ уменьшается, так как материал расширяется, молекулы воды свободнее проникают в микротрещины. Кроме того, температура интенсифицирует диссоциацию молекул на ионы, и концентрация носителей заряда увеличивается. При снижении температуры $Kабс$ увеличивается.

Практическое значение величины ρ диэлектрика. Эта характеристика показывает пригодность диэлектрика для работы на постоянном напряжении в качестве электроизолирующего материала: чем выше ρ , тем лучше изоляция. Однако ρ не дает представления о поведении диэлектрика при переменном напряжении.

1.1.6. Потери энергии в диэлектрике

Конденсатор, включенный под переменное напряжение, нагревается. Это говорит о том, что часть электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается в окружающую среду. Нагрев диэлектрика обусловлен сквозным током утечки через диэлектрик, частичными разрядами в воздушных пузырьках и дипольной поляризацией, сопровождающейся трением молекул-диполей при их переориентации в электрическом поле.