

В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1949 ЛЕНИНГРАД

В книге содержатся важнейшие сведения о классификации и конструкции изоляции, технологии изолировки, сушки и пропитки обмоток, контроле и испытании изоляции при изготовлении и ремонте электрических машин разных типов и исполнений.

Приведенный в книге материал базируется на опыте советских электромашиностроительных заводов, а также на опыте эксплуатации электрических машин.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, связанных с конструированием, производством, ремонтом и эксплуатацией электрических машин, а также может быть полезна для студентов вузов и техникумов, желающих углубить свои знания в области изоляции электрических машин.

1

Редактор И. В. Антик

Техн. редактор С. Н. Бабочкин

Сдано в набор 23/III 1949 г.

Подписано к печати 22/IX 1949 г.

Объем 21¹/₂ п. л., уч.-изд. л. 25,5,

тип. зч. в п. л. 47 540.

Бумага 60×92¹/₁₆

А-1178

Тираж 5 000

Зак. 2107

ПРЕДИСЛОВИЕ

Выполнение грандиозных задач, поставленных Сталинским пятилетним планом восстановления и развития народного хозяйства СССР, а в дальнейшем планами на более длительный период, которые дали бы возможность «поднять уровень нашей промышленности, например, втрое по сравнению с довоенным уровнем» (Сталин), потребует дальнейшего развития электрификации Советского Союза и самого широкого внедрения электропривода во все отрасли народного хозяйства.

Для этого потребуются дальнейшее значительное увеличение выпуска электрооборудования, в том числе электрических машин с высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями.

Значительную роль в электрической машине играет ее изоляция, так как она, с одной стороны, определяет степень использования активных зон машины, с другой, — эксплуатационную надежность машины в самых разнообразных условиях ее работы.

Основной задачей настоящей книги является систематическое изложение главнейших вопросов, связанных с конструированием, технологией, испытанием и эксплуатацией изоляции электрических машин разных типов и исполнений.

При этом автор стремился систематизировать и обобщить тот огромный опыт, который накопился на советских электромашиностроительных заводах, а также свой личный многолетний опыт в области изоляции электрических машин.

Критический анализ разнообразных конструктивных и технологических исполнений изоляции электрических машин, проведенный автором, позволил не только выявить преимущества и недостатки отдельных конструкций, но и дал возможность разработать общие рекомендации по выбору изоляции для конкретных машин.

При изложении основных технологических вопросов, связанных с изоляцией электрических машин, надлежащее внимание уделено сушке и пропитке обмоток. Соответствующее внимание уделено и контролю изоляции обмоток и особенно контролю витковой изоляции. При этом критически рассмо-

трены современные методы испытаний основной и витковой изоляции и приведены принятые нормы испытательных напряжений.

Учитывая, что длительная, безаварийная эксплуатация электрических машин, и особенно высоковольтных, возможна только при правильно организованных профилактических испытаниях и ремонтах изоляции, этим вопросам посвящен специальный раздел.

Ограниченный объем книги не дал возможности осветить ряд специальных вопросов изоляции электрических машин.

Настоящая книга входит в серию книг и брошюр по электрической изоляции, выпускаемых по инициативе Всесоюзного бюро электрической изоляции при МОНИТОЭ (ВНИТОЭ).

Поскольку данная книга является первой попыткой систематического и комплексного изложения вопросов изоляции электрических машин, в ней неизбежны отдельные недочеты.

Автор будет весьма благодарен за присылку ему критических замечаний. Все замечания автор просит присылать в адрес Госэнергоиздата (Москва, Шлюзовая набережная, 10) или Всесоюзного бюро электрической изоляции (Москва, проезд Владимирова, 6, МОНИТОЭ для Бюро).

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
--------------------	---

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Электроизоляционные материалы и обмоточные провода

1,1. Классификация изоляции электрических машин	11
1,2. Основные требования, предъявляемые к материалам, применяемым для изоляции электрических машин	20
1,3. Пропиточные лаки и компаунды	24
1,4. Покровные лаки, эмали и компаунды	25
1,5. Клеящие лаки	26
1,6. Специальные лаки	27
1,7. Волокнистые материалы	27
1,8. Слюда и слюдяные материалы	29
1,9. Пластические массы и слоистые прессованные материалы	30
1,10. Новые синтетические электроизолирующие материалы	30
1,11. Изоляция обмоточных проводов	31

ГЛАВА ВТОРАЯ

Основные конструкции изоляции электрических машин

2,1. Общие положения	35
2,2. Витковая изоляция	40
2,3. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с полузакрытым пазом	54
2,4. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с полуоткрытым пазом	63
2,5. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с открытым пазом	64
2,6. Общие требования к изоляции высоковольтных машин переменного тока	76
2,7. Гильзовая изоляция протяжных статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока	81
2,8. Гильзовая изоляция шаблонных статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока (для открытого паза)	84

2,9. Основные характеристики гильзовой изоляции статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока	93
2,10. Непрерывная изоляция статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока	101
2,11. Основные характеристики непрерывной микалентной изоляции статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока	110
2,12. Сравнение гильзовой и непрерывной микалентной изоляции статорных обмоток высоковольтных машин	119
2,13. Изоляция статорных обмоток турбогенераторов напряжением 33—36 кВ и выше	120
2,14. Коронирование статорных обмоток высоковольтных машин и методы его устранения	128
2,15. Расчет полупроводящих покрытий обмоток высоковольтных машин	134
2,16. Изоляция бандажных колец и кронштейнов статоров машин переменного тока	142
2,17. Изоляция внутримашинных соединений и выводных концов статорных обмоток машин переменного тока	143
2,18. Изоляция роторных обмоток асинхронных двигателей	145
2,19. Изоляция роторных обмоток синхронных машин с явно выраженными полюсами	150
2,20. Изоляция роторных обмоток синхронных машин с неявно выраженными полюсами	152
2,21. Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока	156
2,22. Изоляция обмоткодержателей якорей машин постоянного тока	165
2,23. Изоляция коллекторов машин постоянного тока	166
2,24. Изоляция щеткодержателей машин постоянного тока	167
2,25. Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока	168
2,26. Изоляция внутримашинных соединений и выводов машин постоянного тока	176
2,27. Изоляция магнитопроводов	176
2,28. Общие соображения по выбору изоляции в электрических машинах	178

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Технология изолировки обмоток и токоведущих частей электрических машин

3,1. Заготовительные операции	181
3,2. Изолировка обмоток лентами	182
3,3. Изготовление гильзовой изоляции	186
3,4. Прессовка изоляции обмоток	189
3,5. Изолировка сердечников полюсов	191
3,6. Изготовление миканитовых конусов (манжет) и миканизация стяжных колец	193
3,7. Вопросы изоляции коллекторов при их изготовлении	195
3,8. Миканизация втулок (ступиц) контактных колец	197

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

Сушка, пропитка и лакировка обмоток

4,1. Назначение сушки, пропитки и лакировки обмоток	199
4,2. Технологическое и вспомогательное оборудование для сушки, пропитки и лакировки обмоток	202
4,3. Технологические процессы сушки, пропитки и лакировки . . .	216
4,4. Контроль сушки, пропитки и лакировки	243
4,5. Правила обращения с электроизоляционными лаками, эмалями и компаундами	247
4,6. Мероприятия по технике безопасности при пропитке, сушке и лакировке обмоток	249

ГЛАВА ПЯТАЯ

Контроль и испытание изоляции электрических машин

5,1. Общие положения	251
5,2. Контроль изоляционных материалов	251
5,3. Контроль изоляции обмоточных проводов	252
5,4. Контроль изоляции обмоток в процессе их производства . . .	253
5,5. Испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса	254
5,6. Испытание электрической прочности витковой изоляции	253
5,7. Измерение сопротивления изоляции	292
5,8. Измерение диэлектрических потерь в изоляции обмоток	295
5,9. Контроль влажности изоляции по изменению емкости обмоток	300
5,10. Контроль состояния изоляции по кривым абсорбции	301

ГЛАВА ШЕСТАЯ

Изоляция электрических машин в эксплуатации

6,1. Условия работы изоляции электрических машин в эксплуатации	302
6,2. Поведение изоляции электрических машин в эксплуатации . . .	304
6,3. Сушка изоляции электрических машин в условиях эксплуатации	312
6,4. Профилактические ремонты изоляции	315
6,5. Профилактические испытания изоляции электрических машин в условиях эксплуатации	315
6,6. Болезни и аварии электрических машин по вине изоляции . . .	324
6,7. Ремонт и модернизация изоляции электрических машин	329
Литература	331
Предметный указатель	340

: ВВЕДЕНИЕ

Основное назначение изоляции в электрических машинах, как и во всех других электротехнических конструкциях, состоит в создании между отдельными токоведущими частями, имеющими разные потенциалы, а также между этими частями и корпусом машины, среды, препятствующей растеканию электрической энергии помимо токоведущих частей.

Кроме этого основного назначения изоляционные материалы в ряде случаев используются в электрической машине для изготовления конструктивных элементов.

На заре развития электрической машины, когда рабочее напряжение на зажимах машины было невелико, когда мощность машин не превосходила десятков и редко сотен киловатт, рабочие температуры в обмотках были невелики и когда электрическая машина предназначалась для работы в помещениях, где относительная влажность воздуха была невысока, а температура не превосходила нормальной, для изоляции электрических машин использовались такие материалы, как хлопчатобумажная и шелковая пряжа, ленты и ткани, а также бумаги и картон. При этом к материалам, применяемым для изоляции электромашин, не предъявлялось каких-либо особых требований. Однако по мере развития электрической машины применявшиеся ранее электроизоляционные материалы уже не смогли удовлетворить новым возросшим требованиям к электрическим и механическим характеристикам, а также к нагревостойкости и влагостойкости.

Потребовалось создание новых специальных электроизолирующих материалов, таких, как лакоткани, микафолий, миканиты и др., а также применение пропитки изоляции обмоток лаками и компаундами. Бурное развитие электропривода и его широкое внедрение во все области техники потребовали создания дешевой и вместе с тем надежной электрической машины, имеющей высокие технико-экономические показатели и приспособленной для работы в самых тяжелых условиях эксплуатации. Появилась потребность в мощных высоковольтных генераторах напряжением 10 кВ и выше.

Все это вызвало необходимость в новом скачке в развитии изоляционной техники. Потребовалась большая работа лабораторий по изучению поведения изоляции в этих новых

условиях, создавались специальные участки, и изготавливающие электроизоляционные материалы.

В дореволюционной России с ее отсталой промышленностью большинство материалов, применявшихся для электрических машин, ввозилось из-за границы, и только после Великой Октябрьской революции, в годы сталинского пятилеток, в нашей стране была создана своя изоляционная наука и техника, свое производство электрической изоляции.

Оригинальные работы советских ученых А. Ф. Иоффе, А. К. Вальтера, К. Д. Синельникова, Б. М. Вула, П. П. Кобеко, М. М. Михайлова, Н. П. Богородицкого, И. М. Гольдман и др., начатые в начале двадцатых годов и посвященные глубокому изучению диэлектриков, позволили создать стройную картину явлений, происходящих в электроизолирующих материалах, подвергаемых воздействию электрического поля, температуры, влаги и др. Использование этих работ в электропромышленности позволило найти ряд научно обоснованных решений в области создания высоковольтной и влагостойкой изоляции электрических машин.

Большую роль в развитии отечественной изоляции в электрических машинах сыграли заводские лаборатории крупных советских электромашиностроительных заводов: «Электросила», ХЭМЗ и «Динамо», а также ВЭИ и МЭИ. Плодотворная работа работников лаборатории завода «Электросила» (Г. И. Сканави, Б. Н. Каноныкин, Г. Г. Швец, Г. В. Беляев, С. П. Грецкий и др.) совместно с работниками производства (Ф. Т. Сухоруков и др.) позволила не только в короткие сроки освоить заграничную технику, но и создать более совершенную изоляцию турбогенераторов мощностью 50 000—100 000 квт, гидрогенераторов Днепра и др.

Работы изоляционной лаборатории ХЭМЗ по влагостойкой изоляции электрических машин, изучению коллекторного механизма и др., начатые в 1928 г. проф. О. Б. Броном, а также работы по замене импортных материалов советскими и созданию новых материалов, новых, более совершенных, конструкций изоляции и технологических процессов, проводившихся с участием автора, а также С. В. Цукерника, В. Ф. Сережникова, А. В. Трабского, Б. Р. Остроуха и др., позволили создать свою советскую изоляционную технику в электромашиностроении, которая в ряде случаев перегнала заграничную технику.

На заводе «Динамо» Б. М. Тареевым, Н. В. Александровым, В. А. Баевым, М. И. Мантровым, Ю. И. Лебедевым, Н. М. Федоровым и др. проведен ряд работ, способствовавших развитию изоляции тягового электрооборудования.

Следует также отметить работы изоляционных лабораторий заводов им. Лепсе (Б. Е. Бененсон), Электрик (К. И. Черняк) и АТЭ (Р. С. Холодовская).

Создание новых электроизоляционных материалов в ВЭИ под руководством К. А. Андрианова (влагостойкие, нагревостойкие лаки и компаунды, винифлекс, кремнийорганические соединения и др.), позволило создать новые, более совершенные типы изоляции электрических машин.

Следует также отметить труды работников кабельной промышленности (С. В. Брагин, В. А. Привезенцев и др.), способствовавших развитию изоляции обмоточных проводов и созданию проводов с эмалевой, асбестовой и стеклянной изоляцией, а также работы института стекловолокна (М. Г. Черняк, С. И. Иоффе, М. С. Асланова и др.) по созданию советских стекловолокнистых материалов.

В последние годы большое внимание вопросам профилактических испытаний изоляции машин в условиях эксплуатации уделяли работники Министерства электростанций Союза ССР (И. А. Сыромятников, М. И. Раппопорт, Г. И. Лысаковский и др.), что позволило поставить профилактический контроль турбогенераторов и высоковольтных машин на более высоком уровне, чем за границей.

Огромную помощь в развитии советской изоляционной техники, в области электрических машин оказывает Всесоюзное бюро электрической изоляции, которое в течение 25 лет уделяет вопросам изоляции электрических машин большое внимание.

Накопившийся в Союзе технический опыт в области изоляции электрических машин до сих пор не был обобщен, что затрудняет его использование. Настоящая книга является первой попыткой обобщить этот опыт и помочь работникам заводов и ремонтных мастерских технически правильно подойти к разрешению задач, связанных с выбором изоляции для машин разных типов и исполнений, технологией изолировки и пропитки обмоток, испытанием электрических машин, а также вопросам изоляции машин в условиях эксплуатации.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

1.1. Классификация изоляции электрических машин

Нагревостойкость изоляции. Нагревостойкость является весьма важным свойством электрической изоляции, так как она определяет предельно допустимые перегревы обмоток, а значит, степень использования активных материалов в электрической машине, а также срок жизни изоляции. Поэтому в общепринятой классификации изоляции электрических машин предусмотрено деление изоляции на классы соответственно их нагревостойкости.

В соответствии с ГОСТ 183-41 электроизолирующие материалы, применяемые в машинах, разделяются по нагревостойкости на пять классов: А, В, ВС, СВ и С.

К классу изоляции А относится хлопок, шелк, бумага и другие подобные материалы, если они пропитаны электроизоляционным лаком или компаундом, а также органические составы, называемые эмалью и применяемые для изготовления эмалированной проволоки. Органическая волокнистая изоляция считается пропитанной, если пропитывающее вещество полностью обволакивает волокна. Применяемые для пропитки составы должны обладать хорошими изолирующими свойствами, хорошей пропитывающей способностью, способствовать взаимному сцеплению волокон как между собой, так и с проводником; они не должны разжижаться при допустимых предельных температурах и терять своих основных свойств при длительном нагреве при допустимых температурах. Этот класс изоляции является наиболее распространенным в электрических машинах.

К классу изоляции В относятся изделия из слюды (миканиты на органическом связующем, микафолій, микаленты и т. п.), асбеста (бумаги, ленты, ткани, пряжа) и стекловолокон, содержащие органические вяжущие или пропитывающие вещества обычной нагревостойкости.

Если совместно с изолирующими материалами класса В применены с целью крепления изолирующие материалы класса А (пропитанные бумаги, ленты и ткани), то такую изоляцию можно отнести к классу В при условии, что электрические и механические свойства изоляции под действием температуры, допускаемой для материалов класса В, будут сохраняться на уровне, обеспечивающем длительную работу машины в нормальных условиях эксплуатации.

Изоляция класса ВС представляет собой разновидность изоляции класса В повышенной нагревостойкости. В изоляции класса ВС применяются специальные лаки, более теплоустойчивые, чем лаки и компаунды, применяемые для изоляции класса В. Таким образом, к классу изоляции ВС относятся изделия из слюды, асбеста и стекловолоконных материалов на нагревостойких лаках (глифталевых и им подобных).

Если совместно с изолирующими материалами класса В применены с целью крепления изолирующие материалы класса А, то такую изоляцию можно отнести к классу ВС при условии, что электрические и механические свойства изоляции под действием температуры, допускаемой для материалов класса ВС, будут сохраняться на уровне, обеспечивающем длительную работу машины в нормальных условиях эксплуатации.

К классу изоляции СВ относятся изделия из слюды, стекловолоконных материалов, асбеста, не содержащие органических материалов класса А. Для скрепления и пропитки в этом случае должны применяться специальные нагревостойкие лаки (кремнийорганические и им подобные).

Что касается класса изоляции С, к которому относится слюда и стекловолоконные материалы без вяжущих веществ, фарфор, стекло, кварц и другие подобные неорганические материалы, то высокая нагревостойкость этого класса в настоящее время еще не используется электромашиностроением.

Если изоляция машин содержит изолирующие материалы разных классов, причем каждый из этих материалов несет электрическую нагрузку, то температура каждого из этих материалов не должна превосходить допускаемую для него температуру. Так, если разные части одной и той же обмотки изолированы материалами разных классов (например, микалофил в пазовой части, лакотканевая лента в лобовой), то предельная допускаемая температура для каждой из частей обмотки определяется примененной для этой части изоляцией.

При возможности замера температуры по толщине изоляции и наличии значительных перепадов температуры в изоляции возможно применение чередующихся слоев материалов разных классов. При этом для каждого слоя можно допускать предельную для него температуру.

Исходя из общих определений классов изоляции по ГОСТ 183-41, применяемые для изоляции электрических машин материалы могут быть отнесены к одному из пяти классов (см. табл. 1,1).

Действующим ГОСТ 183-41 для каждого класса изоляции установлены пределы допускаемых превышений температур при предельно допустимой температуре охлаждающего воздуха $+35^{\circ}\text{C}$.

В табл. 1,2 даны пределы допускаемых превышений температур в $^{\circ}\text{C}$ для изоляции классов А и В при предельно допустимой температуре $+35^{\circ}\text{C}$.

Для обмоток, изолированных материалами класса ВС, пределы допускаемых превышений температур устанавливаются на 15°C больше указанных в табл. 1,2 для класса В.

Для обмоток, изолированных материалами класса СВ, пределы допускаемых температур устанавливаются соответственно нагревостойкости лаков (или компаундов), примененных для изоляции класса СВ.

Пределы превышения температуры для изоляции класса С ГОСТ 183-41 не устанавливает.

Пределы допускаемых температур для изолирующих материалов классов А, В, ВС и СВ могут быть получены из формулы

$$\vartheta = \theta + 35 \text{ в } ^{\circ}\text{C}, \quad (1,1)$$

где ϑ — предельно допускаемая температура в $^{\circ}\text{C}$;

θ — предельно допускаемое превышение температуры для данного класса изоляции в $^{\circ}\text{C}$.

Для статорных обмоток турбогенераторов, имеющих микалентную компаундированную изоляцию, действующий ГОСТ 533-41 ограничивает наибольшие превышения температуры обмотки, измеренные температурными детекторами, заложенными в пазах статора между катушками, значениями, приведенными в табл. 1,3.

Из этой таблицы следует, что ГОСТ на турбогенераторы предусматривает для статорных обмоток с микалентной компаундированной изоляцией наибольшую допустимую температуру $95\text{—}105^{\circ}\text{C}$, т. е. более низкую, чем это допускается для изоляции класса В. Некоторое снижение предельно допустимой температуры для статорной компаундированной обмотки турбогенераторов произведено, исходя из условий размягчения пропитывающего компаунда, температура размягчения которого обычно составляет $105\text{—}110^{\circ}\text{C}$, а также из-за особых условий работы изоляции в турбогенераторах (повышенные механические напряжения в изоляции при нагревах и охлаждениях обмотки из-за больших длин статора, высокое рабочее напряжение и др.).

Таблица 1,1

№ по пор.	Наименование изоляционных материалов	Класс изоляции
1	Пропитанная изоляция обмоточных проводов марок ПБО, ПБД, ПШО, ПЭЛБО, ПЭЛШО	A
2	Изоляция проводов марок ПЭЛ, ПЭТ и ПЭВ ¹	A
3	Изоляция проводов марок ПЭТСО, ПСД, ПДА	B, BC или CB в зависимости от нагревостойкости лака
4	Пропитанные хлопчатобумажные и шелковые ленты и ткани	A
5	Пропитанный электрокартон	A
6	Лакоткани (светлая и черная) на шелковой и хлопчатобумажной основах	A
7	Пропитанные и лакированные хлопчатобумажные и шелковые шланги (чулки)	A
8	Гетинакс, текстолит, намотанные изделия из пропитанных бумаг и хлопчатобумажных тканей	A
9	Фибра, лерероид (пропитанные или лакированные)	A
10	Пропитанное дерево	A
11	Асбестовые бумаги, картоны, ленты и ткани, связанные или пропитанные в обычных лаках или компаундах	B
12	Асбестовые бумаги, картоны, ленты и ткани, пропитанные специальными нагревостойкими лаками или компаундами	BC или CB в зависимости от нагревостойкости лака или компаунда
13	Стекловолоконистые материалы (ленты, ткани, шланги), пропитанные в обычных лаках и компаундах	B
14	Стекловолоконистые материалы, пропитанные в специальных нагревостойких лаках или компаундах	BC или CB в зависимости от нагревостойкости лака или компаунда
15	Прессованные материалы и намотанные изделия на основе асбестовой бумаги или ткани	B, BC или CB в зависимости от нагревостойкости лака или компаунда
16	Прессованные материалы и намотанные изделия на основе стекловолоконистых материалов	То же
17	Стеклолакоткани и лакированные стеклошланги	То же
18	Синтетические пленки из триацетата или ацетобутирата целлюлозы (в чистом виде, а также в сочетании с бумагами, электрокартоном и тканями)	A ²

¹ Для проводов марки ПЭВ и ПЭТ в отдельных случаях могут быть допущены кратковременно и более высокие перегревы.

² Для синтетических пленок могут быть допущены и более высокие нагревы (до 120° C).

Продолжение

№ по пор.	Наименование изоляционных материалов	Класс изоляции
19	Пластические массы с органическим наполнителем	A
20	Пластические массы с неорганическим наполнителем	B, BC или СВ в зависимости от нагревостойкости связки
21	Асбоцемент непропитанный	C
22	Асбоцемент, пропитанный в обычных лаках и компаундах	B
23	Асбоцемент, пропитанный в нагревостойких лаках и компаундах	BC или СВ в зависимости от нагревостойкости пропитывающего состава
24	Микалекс	C
25	Пластические массы холодной прессовки с неорганическим наполнителем	B или BC
26	Слюда	C
27	Миканит коллекторный	B, BC или СВ в зависимости от нагревостойкости связующего
28	Миканит формовочный	То же
29	Миканит прокладочный	То же
30	Миканит гибкий без подложек	То же
31	Миканит гибкий с подложками из целлюлозных бумаг, хлопчатобумажных и шелковых тканей	B или BC в зависимости от нагревостойкости связующего
32	Миканит гибкий с подложками из асбестовых бумаг и стеклотканей на нагревостойком лаке	BC или СВ в зависимости от нагревостойкости связующего
33	Микафолий на шеллаке	B
34	Микафолий на глифталевых или глифтал-бакелитовых лаках	BC
35	Микалента на битумно-масляном лаке	B
36	Микалента на глифталевых или ему подобных по нагревостойкости лаках	BC
37	Стекломикалента	BC или СВ в зависимости от нагревостойкости связующего
38	Стекломикафолий	То же
39	Жаростойкий миканит на неорганической связке	C
40	Фарфор	C
41	Стеатит	C
42	Резины	Вне классов

Таблица 1,2

№ по пор.	Части машин	Класс изоляции А				Класс изоляции В			
		Метод термометра	Метод сопротивления	Метод заложённых температурных детекторов		Метод термометра	Метод сопротивления	Метод заложённых температурных детекторов	
				между катушками в одном пазу	между поверхностью катушек в одном пазу			между катушками в одном пазу	верхностью катушек в одном пазу
1	Обмотки переменного тока турбогенераторов мощностью в 5 000 <i>кв</i> а и выше	—	—	65*	55*	—	—	85*	75*
2	Обмотки переменного тока явнополюсных машин и асинхронных машин мощностью 5 000 <i>кв</i> а и более или с длиной сердечника в 1 м и более	—	—	65*	55*	—	—	85*	75*
3	Обмотки переменного тока турбогенераторов мощностью до 5 000 <i>к</i> а, явнополюсных машин и асинхронных машин мощностью до 5 000 <i>кв</i> а или с длиной сердечника до 1 м	60*	65	—	—	75*	85	—	—
4	Обмотки возбуждения (многослойные) машин постоянного тока и переменного тока с возбуждением постоянного тока, кроме указанных в п.п. 6, 7, 8	60	65	—	—	75	85	—	—
5	Якорные обмотки, соединенные с коллектором	60	65	—	—	75	85	—	—
6	Однородные обмотки возбуждения	70	70	—	—	95	95	—	—
7	Обмотки возбуждения турбогенераторов и стержневые обмотки роторов асинхронных машин при числе стержней не более двух	—	70	—	—	—	95	—	—
8	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	65	65	—	—	85	85	—	—
9	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	65	—	—	—	85	—	—	—
10	Контактные кольца	70	—	—	—	90	—	—	—
11	Коллекторы**	65	—	—	—	85	—	—	—

* Для обмоток машин переменного тока, изолированных на номинальное напряжение большее 11 000 в, пределы превышения температур должны быть снижены против указанных в таблице данных на 1,5° С на каждые 1 000 в или часть 1 000 в сверх 11 000 в.

** Указание класса изоляции относится к изоляции обмотки, соединенной с коллектором.

Таблица 1,3

Мощность турбогенератора	Предельные допустимые температуры при температурах охлаждающего воздуха		
	+40°C	+30°C	+20°C
До 14 400 <i>квт</i> включительно . .	65	75	85
Свыше 14 400 <i>квт</i>	65	75	75

При применении компаундов с температурой размягчения выше 105° С (по методу кольца и шара) для турбогенераторов мощностью до 6 000 *квт* включительно превышение температур статорных обмоток может быть соответственно увеличено до значений, приведенных в табл. 1,2 (для изоляции класса В).

Наибольшие допускаемые превышения температур для роторных обмоток турбогенераторов даны в табл. 1,4.

Таблица 1,4

Мощность турбогенератора	Класс изоляции	Предельные допустимые превышения температур (по сопротивлению) при температурах охлаждающего воздуха		
		+40° С	+30° С	+20° С
До 14 400 <i>квт</i> вкл.	В	90	100	110
Свыше 14 400 <i>квт</i>	В	90	100	100
До 14 40 <i>квт</i> вкл.	ВС	105	115	125
Свыше 14 400 <i>квт</i>	ВС	105	115	115

Для тяговых электродвигателей, учитывая их форсированный кратковременно-повторный режим работы, допускаются более высокие перегревы обмоток, особенно для мощности часового режима.

В табл. 1,5 приведены предельно допустимые превышения температуры частей тяговых электродвигателей постоянного тока при испытании их на стенде над температурой окружающей среды (ГОСТ 2582-44).

Указанные в табл. 1,5 допустимые превышения температуры действительны при температуре охлаждающего воздуха не выше +25° С. Если температура охлаждающего воздуха выше +25° С, то пределы превышения температуры должны быть соответственно снижены.

Для обмоток с изоляцией класса В тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией допустимые превышения температуры при длительном режиме повышаются против значений, указанных в таблице, на 15° С.

Для обмоток закрытых электродвигателей допустимые пре-

Таблица 1,5

Части электродвигателя	Измерение	Превышение температуры в °C			
		Часовой режим		Длительный режим	
		Классы изоляции			
		А	В	А	В
Обмотка якоря . . .	По методу сопротивления	100	120	85	105
	По методу термометра	75	90	65	80
Обмотка полюсов .	По методу сопротивления	100	130	85	115
	По методу термометра	75	100	65	90
Коллектор	По методу термометра	95	95	95	95

вышения температуры повышаются против значений, указанных в таблице, на 10° C.

Допустимые в эксплуатации предельные температуры обмоток тяговых электродвигателей указаны в табл. 1,6 (по ГОСТ 2582-44).

Таблица 1,6

Классы изоляции	Предельная температура при измерении в °C	
	по методу сопротивления	по методу термометра
А	125	105
В	145	120

Хотя нагревостойкость изоляции и является весьма важным фактором, определяющим в значительной мере технико-экономические и эксплуатационные показатели машин, но вместе с тем существует ряд других факторов, оказывающих значительное влияние на выбор материалов и конструктивных форм изоляции. К ним в первую очередь относятся рабочее напряжение машины, влажность окружающей среды, наличие в окружающей среде активных химических реагентов, внешние механические воздействия (толчки, вибрация) и др.

В зависимости от тех внешних условий, для которых предназначается электрическая машина, а также режима работы машины в условиях эксплуатации, изоляция может иметь следующие исполнения.

Нормальное исполнение изоляции. Это исполнение рассчитано на следующие условия работы машины:

1. Относительная влажность воздуха не выше 65—70% (кратковременно не более 80%).

2. Температура окружающей среды не выше 35—45° С и не ниже —40° С.

3. Высота над уровнем моря не более 1 000 м.

4. Нормальное число пусков и реверсов (для электродвигателей); отсутствие сильных толчков и вибраций.

5. Отсутствие в окружающем воздухе паров растворителей, кислот, щелочей, химически активных газов и т. п.

6. Отсутствие в охлаждающем обмотку воздухе проводящей или химически активной пыли.

7. Невозможность попадания на изоляцию обмотки смазочных масел, охлаждающих эмульсий и т. п.

Влагостойкое исполнение изоляции. Влагостойкость изоляции характеризуется допустимой продолжительностью времени пребывания машин (в нерабочем состоянии), в атмосфере с относительной влажностью $95 \pm 3\%$ при температуре $20 \pm 5^\circ \text{C}$, после чего машину можно включать без предварительной подсушки на номинальное напряжение для работы в нормальной эксплуатации.

Машины, имеющие влагостойкую изоляцию, рассчитаны на следующие условия работы:

1. Температура охлаждающего воздуха не выше 45° С.

2. Высота над уровнем моря не более 1 000 м.

3. Нормальное число пусков и реверсов; отсутствие сильных толчков и вибраций.

4. Отсутствие в охлаждающем воздухе паров растворителей, кислот, щелочей, химически активных газов, а также проводящей и химически активной пыли и т. п.

5. Невозможность попадания на изоляцию обмотки смазочных масел, охлаждающих эмульсий и т. п.

Морское исполнение изоляции.

1. Относительная влажность воздуха до 100 %.

2. Температура охлаждающего воздуха до 45—50° С.

3. Высота над уровнем моря не более 1 000 м.

4. Наличие сильных толчков, сотрясений и вибраций.

5. Наличие в охлаждающем воздухе мелких капелек морской воды.

6. Наличие в охлаждающем воздухе паров масел.

7. Отсутствие в охлаждающем воздухе паров щелочей и тому подобных химически активных реагентов.

8. Возможность кратковременных перегрузок.

Усиленное исполнение изоляции.

1. Повышенное число пусков и реверсов — частые кратковременные перегрузки.

2. Наличие вибраций и толчков.

3. Относительная влажность воздуха до 95 %.

4. Температура охлаждающего воздуха до 45—50° С.

5. Высота над уровнем моря не более 1 000 м.

6. Наличие в охлаждающем воздухе пыли, копоти, газов, паров масел и т. п.

7. Невозможность непосредственного попадания на изоляцию обмотки кислот, щелочей и других химически активных реагентов.

Этот вид изоляции предназначается для электродвигателей металлургических производств, крановых и тяговых электродвигателей и т. п.

Специальные исполнения изоляции. Кроме перечисленных выше исполнений изоляции, в электромашинах, предназначенных для работы в особых условиях, применяются специальные исполнения изоляции, к которым относятся:

- 1) изоляция с повышенной кислотостойкостью;
- 2) изоляция с повышенной стойкостью к щелочам, щелочным эмульсиям и т. п.;
- 3) морозостойкая изоляция, предназначенная для работы при -60°C ;
- 4) изоляция, предназначенная для работы на самолетах;
- 5) водонепроницаемая изоляция;
- 6) изоляция, предназначенная для работы в очень пыльных помещениях, когда на нее может попадать металлическая и проводящая пыль, и др.

Учитывая то решающее значение, которое оказывает на выбор материалов и толщин изоляции, а также ее конструктивных форм, рабочее напряжение машины, целесообразно классифицировать изоляцию и по напряжению.

В зависимости от рабочего напряжения изоляция электрических машин может быть разбита на следующие группы:

- 1) машины напряжением до 24 в (вкл.);
- 2) машины напряжением от 24 до 500 в;
- 3) машины напряжением от 500 до 2 999 в;
- 4) машины напряжением от 3 000 до 16 000 в;
- 5) машины напряжением выше 16 000 в.

1.2. Основные требования, предъявляемые к материалам, применяемым для изоляции электрических машин

К изоляционным материалам, предназначенным для изоляции отдельных элементов электрических машин, предъявляется комплекс требований, вытекающих из условий работы изоляции машины при ее эксплуатации, а также из технологических и экономических факторов.

К числу общих этих требований относятся:

1. Высокие диэлектрические свойства электроизолирующих материалов. Материалы, предназначенные для изоляции высоковольтных обмоток, должны иметь:

а) Высокую электрическую прочность при нормальной окружающей температуре, а также при рабочих температурах

машины. Кроме того, высокая электрическая прочность материала должна сохраняться при механических воздействиях, которым материал подвергается в процессе изолировки и при работе машины, а также при воздействии на него рабочих нагревов.

Для машин влагостойкого исполнения необходимо также, чтобы высокое значение электрической прочности сохранялось при воздействии на изоляцию влаги.

б) Малые диэлектрические потери как при нормальной окружающей температуре, так и при рабочих нагревах машины, так как диэлектрические потери дополнительно нагревают изоляцию и вызывают необратимые процессы старения. Величина диэлектрических потерь не должна заметно увеличиваться при длительном воздействии на материал рабочего напряжения и температуры. Не должно быть также значительного роста тангенса угла диэлектрических потерь при повышении напряжения до рабочего.

в) Высокое удельное сопротивление при рабочих нагревах. В ряде случаев необходимо также, чтобы удельное сопротивление материала мало изменялось при воздействии на него влаги (например, для машин с влагостойкой изоляцией).

К материалам, предназначенным для изоляции низковольтных машин (до 500 в вкл.), предъявляются пониженные требования в отношении электрических характеристик.

2. Высокая нагревостойкость материала. Электроизолирующие материалы в процессе работы электрической машины подвергаются длительному воздействию нагревов, допустимая величина которых определяется классом изоляции. Необходимо, чтобы электроизолирующий материал при длительном воздействии рабочих нагревов не ухудшал своих диэлектрических и механических свойств и особенно эластичности ниже допустимых пределов. При выборе материалов для изоляции электрических машин следует учитывать, что материал будет находиться при рабочей температуре и рабочем напряжении весьма длительное время (15—20 лет), подвергаясь одновременно воздействию механических усилий, а также в ряде случаев влажности и другим внешним влияниям.

3. Высокие механические свойства и эластичность материала. В технологическом процессе применения материалов для изоляции отдельных элементов электрической машины (изолировка обмоток, формовка, прессовка и др.), при сборке машины (укладка обмотки, бандажировка и др.), а также в условиях эксплуатации, изоляция электрических машин подвергается воздействию значительных механических усилий. Наличие механически непрочной и хрупкой изоляции может привести к ее разрушению, а значит, к выходу машины из строя. Поэтому для изоляции электрических машин могут применяться только такие материалы, которые имеют высокую механи-

ческую прочность и эластичность в исходном состоянии и сохраняют их на достаточно высоком уровне при длительном воздействии рабочих нагревов ($105\text{—}140^\circ\text{C}$ и выше в зависимости от класса изоляции). Особенно высокие требования к механической прочности и эластичности предъявляются к материалам, предназначенным для изоляции вращающихся обмоток и особенно обмотки ротора турбогенератора.

4. Хорошая теплопроводность материала. Теплопроводность материалов, применяемых для изоляции обмоток электрических машин, в значительной мере определяет теплоотдачу нагретых проводников обмотки наружу. Поэтому необходимо стремиться применять электроизолирующие материалы с наиболее высоким коэффициентом теплопроводности и принимать меры к увеличению теплопроводности изоляции.

5. Отсутствие в материале свободных кислот, щелочей, а также других химических реагентов, которые могут действовать разрушающим образом на другие рядом лежащие материалы (медь, сталь, изолирующие материалы и др.). Важно отсутствие в материале химически активных реагентов не только во время его применения, но и при длительной работе в условиях рабочих нагревов, напряжений, влажности и т. п.

6. Температурный коэффициент расширения материалов, применяемых для изоляции обмоток, должен быть близок к температурному коэффициенту расширения металлов (меди, стали, чугуна и пр.).

7. Стабильность физических, химических, механических и диэлектрических свойств материала при комплексном воздействии на него рабочего напряжения и температуры. Очень важно, чтобы электроизолирующий материал, применяемый для изоляции электрических машин, не только имел высокие свойства в первоначальном состоянии, но и сохранял их при длительной работе машины в условиях эксплуатации.

8. Способность к технологической обработке. Изоляционные материалы при их применении для изолировки обмоток и других элементов электрических машин, подвергаются различной технологической обработке, имеющей целью придать материалам необходимые размеры, форму и качество. Поэтому к электроизолирующим материалам, предназначенным для изоляции машин, предъявляется ряд технологических требований, основными из которых являются:

1) Гибкость и эластичность в холодном или горячем состоянии.

2) Растяжимость (для лент).

3) Формуемость, т. е. способность принимать в холодном или нагретом состоянии требуемую форму.

4) Прессуемость.

5) Способность при технологической обработке выдержи-

вать воздействие нагревов, превосходящих рабочие (например, при выпечке, пайке, компаундировании и т. п.).

6) Способность подвергаться механической обработке (порезке, шлифовке и др.).

7) Стойкость к воздействию растворителей, пропитывающих лаков и др.

9. Невысокая стоимость и недефицитность материала. Так как стоимость материала входит в общую стоимость электрической машины, то для того, чтобы не повышать стоимости машины, необходимо стремиться применять наиболее дешевые и доступные материалы.

Кроме перечисленных выше требований, предъявляемых к материалам, применяемым для изоляции электрических машин, к ним в отдельных случаях предъявляются также и другие дополнительные требования, вытекающие из особых условий работы изоляции в машине при ее эксплуатации. К числу таких требований относятся:

1) Влагостойкость, т. е. способность материала сохранять достаточно высокие диэлектрические свойства при длительном воздействии на него повышенной влажности. Это требование является обязательным для материалов, которые предназначены для изоляции электрических машин, длительно работающих в атмосфере с повышенной влажностью.

2) Водостойкость, т. е. способность материала сохранять достаточно высокие электрические, а также механические свойства при непосредственном воздействии на него воды. Это требование предъявляется к материалам, предназначенным для машин с водостойкой изоляцией, и является трудно выполнимым, особенно для композиционных технических диэлектриков.

3) Маслостойкость — способность материала сохранять свои физические, химические, механические и электрические свойства при воздействии на него холодного или нагретого изоляционного масла.

4) Стойкость к парам таких растворителей, как бензин, бензол, спирт и т.п.

5) Химическая стойкость, т. е. способность материала сохранять достаточно высокие электрические и механические свойства при воздействии на него таких химически активных реагентов, как кислоты, щелочи, соли, хлор, фтор, аммиак и др. Для материалов, предназначенных для изоляции высоковольтных обмоток, необходима также стойкость к озону и окислам азота.

6) Морозостойкость — способность материала сохранять достаточно высокие электрические и механические свойства, а также достаточную эластичность при низких температурах (до -60°C).

При выборе материалов для изоляции электрических ма-

шин необходимо исходить из условий работы материала при эксплуатации машины, а также учитывать технологические и экономические факторы. Отсутствие материалов, сочетающих в себе все или почти все требуемые свойства, заставляет применять для изоляции электрических машин такие комбинации материалов, в которых по возможности сочетались бы требуемые свойства.

Так, например, слюда является диэлектриком, в котором сочетаются высокие диэлектрические свойства: нагревостойкость, влагостойкость и др., но применение чистой слюды для изоляции обмоток невозможно из-за ограниченности площади отдельных кристаллов слюды, а также из-за недостаточной механической прочности тонких лепестков слюды. Это заставляет применять слюду в сочетании с клеящими лаками, а также подложками (бумагами, тканями). Следует отметить, что комплекс требований, которые предъявляются к материалам, предназначенным для изоляции электрических машин, сильно ограничивает номенклатуру электроизолирующих материалов, пригодных для изоляции машин.

1.3. Пропиточные лаки и компаунды

К электроизоляционным составам, предназначенным для пропитки обмоток машин, предъявляются весьма разнообразные, а иногда противоречивые требования. Не существует изоляционных составов, которые полностью удовлетворяли бы всем предъявляемым требованиям. Поэтому в каждом отдельном случае приходится выбирать пропитывающий состав, исходя из назначения его и условий работы пропитанной изоляции в эксплуатации, а также учитывая технологические и экономические факторы.

Пропитывающие составы должны отвечать следующим требованиям:

1) Обладать высокими диэлектрическими свойствами как в нормальных условиях, так и при нагреве и при воздействии на них влаги:

2) При пропитке обмоток быстро проникать во все макроскопические и микроскопические поры, т. е. обладать хорошей пропитывающей способностью. Это возможно только при применении маловязких составов с малой величиной поверхностного натяжения.

3) По возможности полностью заполнять после отверждения все открытые микроскопические и макроскопические поры и капилляры. Поэтому необходимо отдавать предпочтение составам, не содержащим летучих растворителей, так как при улетучивании растворителей происходит частичное освобождение пор и капилляров. Наиболее полное заполнение пор возможно при применении компаундов, например битумных.

При применении для пропитки лаков, содержащих растворители, необходимо иметь возможно большее количество нелетучих (лаковой основы), так как при этом достигается высокое заполнение пор и капилляров после удаления растворителей при сушке.

4) Возможно быстрее отвердевать после заполнения пор и капилляров. У лаков отверждение основы происходит после удаления летучих вследствие окислительных, конденсационных и полимеризационных процессов. Отверждение битумных компаундов происходит при охлаждении и не требует специальной сушки.

5) После отверждения не сильно размягчаться при рабочих температурах, так как это может привести к вытеканию пропитывающего состава из обмотки, особенно при ее вращении. Поэтому применять битумные компаунды для вращающихся обмоток не следует.

6) Быть эластичным и при длительном нагреве до рабочих температур не ухудшать гибкости пропитанной изоляции.

7) Иметь достаточную теплопроводность.

8) Не оказывать вредного влияния на медь, сталь и электроизолирующие материалы, применяемые для изоляции обмоток.

9) Обладать хорошей клеящей способностью и хорошо связывать между собой витки и отдельные слои изоляции.

10) Иметь высокую влагостойкость.

11) Не вредить здоровью работающих.

12) Обладать малой горючестью.

13) Быть дешевыми и недефицитными.

В ряде случаев к пропитывающим составам предъявляются и специальные требования, как маслостойкость, бензиностойкость, озоностойкость, кислотостойкость, щелочестойкость и др.

Для пропитки обмоток электрических машин могут быть рекомендованы следующие электроизоляционные лаки: битумномасляные 458, 447, 460 (по номенклатуре МХП СССР), крезолномасляные глифталевые, кремнийорганические и др., а также пропиточные битумные компаунды типа 225.

1.4. Покровные лаки, эмали и компаунды

К покровным лакам и эмалям предъявляются следующие основные требования:

1) Высокие диэлектрические свойства.

2) Высокая механическая прочность лаковой пленки после высыхания лака.

3) Хорошая прилипаемость к поверхности.

4) Нагревостойкость.

5) Влаго- и водостойкость.

6) Способность давать твердое, гладкое и блестящее покрытие.

7) Быстрое высыхание.

8) Маслостойкость.

9) Влаго- и газонепроницаемость.

10) Невысокая стоимость и недефицитность.

Кроме этих основных требований, к покровным лакам могут предъявляться и некоторые специальные требования: химостойкость, бензиностойкость, морозостойкость и др.

Для лакировки обмоток электрических машин можно рекомендовать следующие электроизоляционные покровные лаки и пигментированные эмали: № 462-п, СВД, СПД, КВД, № 13, № 317; № 1201 и др. (по номенклатуре МХП СССР).

Для дополнительной защиты лобовых частей обмоток низковольтных электродвигателей от воздействия химических реагентов, эмульсий, влаги и проводящей пыли применяются специальные обмазочные компаунды (пасты, замазки), которые наносятся на лобовые части предварительно пропитанных обмоток. В первую очередь можно рекомендовать следующие обмазочные компаунды: паста ЭЛСИ и обмазочный компаунд Л4402.

1.5. Клеящие лаки

Назначение клеящих лаков заключается в том, чтобы связать между собой отдельные электроизоляционные материалы или же укрепить их на определенном месте.

В связи с этим основными требованиями, предъявляемыми к клеящим лакам, являются:

1) Высокая клейкость и прочность, обеспечивающие надежное скрепление между собой отдельных материалов.

2) Высокая нагревостойкость, особенно для лаков, применяемых для склеивания таких материалов, как слюда, миканиты, микафолий, стекловолоконистые и асбестовые бумаги, ленты, ткани и т. п.

3) Высокие диэлектрические свойства. Особо высокие требования к электрическим характеристикам предъявляются в тех случаях, когда лаки предназначаются для изготовления миканитовой изоляции, применяемой для обмоток высоковольтных машин. В этом случае необходимо, чтобы лак имел высокую электрическую прочность и малые диэлектрические потери как при окружающей, так и при рабочих температурах.

4) Гибкость и эластичность лаковой пленки в случае применения лаков для изготовления гибких листовых и ленточных материалов.

Из клеящих лаков наибольший интерес для электромашиностроения имеют следующие лаки: № 441, 1159, 462-к, глифтабакелитовые и кремнийорганические лаки.

1.6. Специальные лаки

К числу специальных лаков относятся полупроводящие лаки, применяемые для покрытия изоляции обмоток высоковольтных машин с целью устранения коронирования. К полупроводящим лакам предъявляются следующие основные требования:

1) Величина удельного поверхностного сопротивления должна быть для полупроводящего лака № 1 в пределах 10^4 — 10^5 ом и 10^9 — 10^{11} ом для полупроводящего лака № 2.

2) Лак должен быстро высыхать на воздухе (2—3 часа) при температуре 15—20° С.

3) Величина сопротивления должна быть стабильной в условиях, соответствующих нормальной эксплуатации машины.

4) Лак не должен быть хрупким.

Полупроводящие лаки обычно получают введением в изоляционный лак воздушной сушки (например, 462-п) сажи или графита.

1.7. Волокнистые материалы

Волокнистые материалы (бумаги, ленты, ткани, чулки и т. п.) находят широкое применение в электромашиностроении благодаря наличию у этих материалов таких весьма ценных свойств, как высокая механическая прочность и гибкость. Однако волокнистые материалы обладают гигроскопичностью, плохой теплопроводностью и невысокой электрической прочностью в непропитанном виде.

Пропитка волокнистых материалов в соответствующих пропитывающих составах улучшает влагостойкость, теплопроводность и электрическую прочность, а у органических материалов и нагревостойкость. Поэтому волокнистые материалы применяются для изоляции машин только в пропитанном виде.

В табл. 1,7 приведен перечень основных волокнистых материалов, применяемых в электромашиностроении, и указаны области применения этих материалов.

Таблица 1,7

№ по- пор.	Наименование материала	Основная область применения в электрических машинах
1	Бумага телефонная лакированная	Скредляющие прокладки, защитные обертки обмоток и др.
2	Бумага изоляционная намоточная лакированная	То же
3	Бумага кабельная	Защитные обертки пазовых частей катушек при их опрессовке и обкатке
4	Бумага оклеечная	Оклейка электротехнической стали
5	Асбестовая бумага	Витковая изоляция; подбандажная изоляция; для изолировки сердечников полюсов и др.

Продолжение

№ по пор.	Наименование материала	Основная область применения в электрических машинах
6	Бумага бакелизированная	Изоляция роторных стержней, щеткодержательных штырей, сердечников, полюсов, междувитковых прокладок и др.
7	Электрокартаны (ЭВ, ЭВП и ЭВТ) и лентеронд	Пазовая изоляция; прокладки; изоляция магнитных сердечников; междуслойная изоляция; витковая изоляция; защитные обертки микафолиевых гильз и др.
8	Хлопчатобумажные ленты (батистовые, миткалевые, тафтяные, киперные)	Витковая изоляция; скрепление и защита основной изоляции обмоток и др.
9	Шелковые ленты	Витковая изоляция, а также изолировка и скрепление обмоток мелких машин
10	Асбестовые ленты изоляционные (нежелезистые)	Изолировка и скрепление обмоток с нагревостойкой изоляцией
11	Асбестовые ленты полупроводящие (железистые)	Полупроводящий покров на пазовой части высоковольтных обмоток
12	Стеклоленты	Нагревостойкая изоляция витков и обмоток; скрепление и защита основной изоляции обмоток
13	Хлопчатобумажные ткани	Изоляция обмоткодержателей; чехлы на лобовые части якорных обмоток; скрепление каркасных катушек
14	Асбестовая ткань	Пазовая изоляция роторной обмотки турбогенераторов; подбандажная изоляция якорных обмоток
15	Лакоткань	Изоляция статорных якорных и роторных обмоток низковольтных машин с изоляцией класса А
16	Лакошелк	Изоляция статорных, роторных и якорных обмоток, а также сердечников магнитов мелких низковольтных машин с изоляцией класса А
17	Стеклолакоткань	То же, что лакоткань, но в машинах с нагревостойким исполнением
18	Чулки хлопчатобумажные	Изоляция выводных концов якорных секций
19	Трубки лакированные	Изоляция соединений в лобовых частях выпущенных статорных обмоток
20	Фибра листовая	Пазовые клинья, концевые вырубки, прокладки в роторах турбогенераторов
21	Дерево (бук, ясень, граб)	Пазовые клинья, дистанционные колодки

1,8. Слюда и слюдяные материалы

Слюда является одним из основных материалов, применяемых для изоляции высоковольтных машин, а также машин с нагревостойкой и влагостойкой изоляцией, благодаря наличию у нее комплекса таких весьма ценных свойств, как высокая нагревостойкость, влагостойкость, а также высокие диэлектрические характеристики, мало изменяющиеся при нагреве и действии влаги. Однако слюдяные материалы дефицитны, и их стоимость высока. Поэтому их следует применять только в тех случаях, когда не могут быть применены другие, более дешевые, электроизоляционные материалы,

В табл. 1,8 приведен перечень основных слюдяных материалов, применяемых для изоляции электрических машин, с указанием области применения этих материалов.

Таблица 1,8

№ по пор.	Наименование материала	Основная область применения
1	Слюда	Изоляция между коллекторными пластинами
2	Миканит прокладочный	Изоляционные прокладки в машинах с нагревостойкой и влагостойкой изоляцией
3	Миканит коллекторный	Изоляция между коллекторными пластинами
4	Миканит формовочный	Коллекторные конусы и цилиндры; изоляция сердечников полюсов, щеткодержательных штырей; гильзы ротора турбогенератора; подбандажная изоляция
5	Микафоллий	Изоляция статорных, роторных и якорных обмоток в пазовой части; изоляция сердечников и щеткодержательных штырей
6	Миканит гибкий	Пазовая изоляция статорных, роторных и якорных обмоток; междувитковые прокладки; подбандажная изоляция; изоляция магнитных сердечников
7	Микалента черная	Статорные и якорные обмотки высоковольтных машин, а также машин с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения; изоляция магнитных катушек машин постоянного тока; изоляция лобовых частей роторных стержней
8	Микалента светлая	Изоляция витков и лобовой части обмотки роторов турбогенераторов
9	Стекломикалента и гибкий стекломиканит	Изоляция обмоток машин нагревостойкого исполнения

1.9. Пластические массы и слоистые прессованные материалы

К пластмассам относятся ряд разнообразных по своему составу, материалов, из которых прессованием в стальных прессформах при нагреве (пластмассы горячей прессовки) или без него (пластмассы холодной прессовки) получают изделия желаемой формы и размеров.

Основным преимуществом пластмасс является возможность массового изготовления деталей сложной формы без последующей механической обработки, благодаря чему пластмассы находят все большее применение в электромашиностроении.

В табл. 1,9 приведен перечень пластических масс и слоистых материалов, применяемых в электромашиностроении, с указанием области их применения.

Таблица 1,9

№ по пор.	Наименование материала	Основная область применения
1	Пластмассы фенолформальдегидного типа с древесным наполнителем	Выводные зажимные щитки
2	То же с асбестовым наполнителем	Корпусы коллекторов
3	Гетинакс, текстолит	Пазовые клинья, рамки, шайбы, прокладки, выводные щитки, штыри
4	Стеклотекстолит	Пазовые клинья, рамки, шайбы, прокладки в машинах с нагревостойкой изоляцией
5	Асботекстолит	Клинья и распорки в лобовых частях ротора турбогенератора
6	Асбоцементные доски	Защитные дугостойкие перегородки между коллекторами, разделительные перегородки между выводами статорной обмотки турбогенератора

1.10. Новые синтетические электроизоляционные материалы

Кремнийорганические высокополимерные соединения (силоксаны). Исключительно большое значение для изоляции электрических машин приобретает новый класс химических соединений — высокополимерные кремнийорганические соединения, предложенные и разработанные в СССР лауреатом Сталинских премий проф. К. А. Андриановым.

Наличие в кремнийорганических соединений силоксановых группировок $\begin{array}{c} | \\ \text{— Si — O — Si —} \\ | \end{array}$ определяет такие весьма ценные свойства, как нагревостойкость и влагостойкость.

До последнего времени предельно допустимые температуры изоляции электрических машин лимитировались нагревостой-

костью органических веществ, применяемых для связывания и пропитки неорганической части изоляции (слюды, стекловолоконистых и асбестовых материалов).

Применение кремнийорганических (полисилоксановых) соединений позволяет повысить нагревостойкость изоляции электрических машин до 180—200° С и выше.

В настоящее время в СССР освоено и осваивается производство кремнийорганических смол и лаков, а также композиционных электроизоляционных материалов на их основе (стеклотекстолит, стекломиканиты, стекломикаленты, стеклолакоткани и др.).

Синтетические электроизолирующие пленки (синтопленки). Из синтетических пленок наибольший интерес для электромашиностроения представляют триацетатцеллюлозные и ацетобутиратцеллюлозные пленки, обладающие хорошей нагревостойкостью и влагостойкостью, а также высокими электрическими свойствами.

Синтетические ластифицированные пленки, толщиной 0,025—0,040 мм, применяются главным образом для витковой изоляции обмоток (в виде лент). Более широкое применение для изоляции электрических машин находят композиционные материалы на основе синтопленок:

1. Пленкокартон — изоляционный материал, представляющий собой электрокартон, оклеенный с одной или с двух сторон синтопленкой толщиной 0,04—0,07 мм. Применяется для пазовой изоляции статорных, роторных и якорных обмоток напряжением до 500 в, изготавливается толщиной от 0,2 до 0,7 мм, обладает хорошими диэлектрическими и механическими свойствами.

2. Синтофоль — получается склеиванием синтопленки с изоляционной бумагой (телефонной, кабельной и т. п.), применяется для пазовой изоляции шаблонных обмоток машин напряжением до 3 000 в.

3. Синтолента — получается склеиванием пленки с микалентной (длинноволокнистой) бумагой, применяется для изолировки обмоток электрических машин напряжением до 3 000 в.

Кроме того, для изоляции обмоток электрических машин находят применение композиционные материалы, получаемые склеиванием синтетических пленок с шелковой или стеклянной тканью.

Все эти материалы обладают более высокими, чем чистые пленки, механическими свойствами.

1,11. Изоляция обмоточных проводов

Для изготовления обмоток электрических машин в настоящее время широко применяются предварительно изолированные провода как круглого, так и прямоугольного сечения.

Исходя из общих требований, которые предъявляются к витковой изоляции электрических машин, основные требования к изоляции обмоточных проводов могут быть сведены к следующим:

1. Малая толщина изоляционного слоя.
2. Высокая механическая прочность, а также гибкость и эластичность.
3. Нагревостойкость. Требования к нагревостойкости изоляции проводов для различных машин разные; так, у машин с изоляцией класса А изоляция провода должна длительно выдерживать температуру 105° С, у машин с изоляцией класса В 125° С и у машин с изоляцией класса ВС 145° С.
4. Высокие диэлектрические свойства, мало изменяющиеся при нагреве и воздействии влаги.
5. Хорошая теплопроводность.
6. Стойкость против действия растворителей.
7. Стабильность.
8. Доступность и невысокая стоимость.

Комплексу всех этих требований не удовлетворяет ни один тип проводов, изготавлиющихся в настоящее время. Поэтому в каждом отдельном случае из имеющегося ассортимента проводов необходимо выбирать провода с такой изоляцией, которая бы наиболее полно соответствовала конкретным требованиям, предъявляемым к витковой изоляции обмотки.

Для облегчения выбора марки обмоточных проводов приводим сравнительную оценку основных типов проводов:

1. Толщина изоляции. По толщине изоляции обмоточные провода могут быть расположены в следующий ряд: наиболее тонкая изоляция у проводов марок ПЭЛ-1, ПЭЛ-2, ПЭТ и ПЭВ, затем следуют марки ПШО, ПЭЛШО, ПБО, ПЭЛБО, ПБД, и ПСД. Наибольшую толщину имеет провод марки ПДА.

2. Механическая прочность изоляции. Наиболее высокую механическую прочность имеют провода марки ПБД (особенно в пропитанном виде), затем следуют марки ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПСД, ПДА, ПЭВ. Наименьшую механическую прочность изоляционного слоя имеют провода марок ПШО, ПЭЛ и ПЭТ.

3. Эластичность изоляции. Если оценивать эластичность изоляции провода, исходя из допустимого перегиба, при котором не наблюдается отслаивания, образования просветов и разрывов, то обмоточные провода расположатся в следующий ряд, в котором эластичность убывает от начала к концу: ПЭВ, ПЭЛ и ПЭТ, ПСД, ПДА, ПЭЛШО, ПЭБО и, наконец, ПБО.

4. Нагревостойкость. По нагревостойкости изоляция проводов может быть разбита на следующие группы:

ПБО, ПШО, ПБД, ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ, ПЭЛШО, ПЭЛБО — класс изоляции А;

ПДА и ПСД — класс изоляции В.

При применении высоконагревостойких подклеивающих и пропитывающих лаков провода марок ПДА и ПСД могут быть отнесены к классу ВС и даже СВ.

5. Электрическая прочность. Наиболее высокую электрическую прочность имеют провода с эмалевой изоляцией (марки ПЭЛ, ПЭТ и ПЭВ). Далее следуют провода с эмальволокнистой изоляцией (марки ПЭЛШО и ПЭЛБО). Провода с волокнистой изоляцией (марки ПБД, ПБО, ПШО, ПСД и ПДА) имеют наиболее низкую электрическую прочность.

6. Влагостойкость. Наиболее высокую влагостойкость имеют провода с эмалевой изоляцией (марок ПЭЛ, ПЭТ и ПЭВ), затем следуют провода с комбинированной эмальволокнистой изоляцией (марки ПЭЛШО и ПЭЛБО). Наибольшей гигроскопичностью, а значит, наименьшей влагостойкостью, обладает волокнистая изоляция проводов (марки ПСД, ПДА, ПБД, ПБО и ПШО).

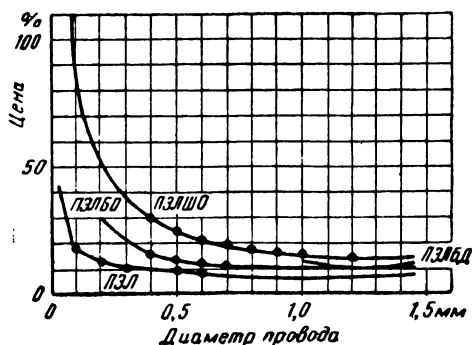
7. Теплопроводность изоляции проводов. Эмалевая изоляция обладает наиболее высокой теплопроводностью, главным образом благодаря отсутствию в изоляции пор и капилляров. Волокнистая изоляция имеет более низкую теплопроводность по сравнению с эмалевой, но применение пропитки повышает теплопроводность волокнистой изоляции проводов. Провода с эмальволокнистой изоляцией занимают промежуточное положение между эмалевой и волокнистой изоляцией.

8. Стойкость к растворителям. Наиболее высокую стойкость к растворителям имеет волокнистая непропитанная изоляция. Применение пропитки или же подклеивающих лаков снижает стойкость волокнистой изоляции к растворителям. Однако применение стойких к растворителям пропитывающих или подклеивающих лаков (например, глифталевых) позволяет сохранить достаточно высокую стойкость волокнистой изоляции к воздействию растворителей.

Провода с эмалевой изоляцией марки ПЭЛ обладают наиболее низкой стойкостью к воздействию таких растворителей, как бензол, толуол и др. Провода марки ПЭТ имеют несколько большую стойкость к воздействию бензола, чем провода марки ПЭЛ. Еще более высокую стойкость к воздействию бензола имеют провода марки ПЭВ. Провода с эмальволокнистой изоляцией обладают более высокой стойкостью к растворителям, чем с чисто эмалевой.

9. Способность изоляции сохранять основные свойства при длительном хранении проводов. У эмалевых проводов марки ПЭЛ при длительном хранении (более 6 месяцев) изоляция теряет эластичность и при намотке катушек наблюдается «осыпание» эмалевого слоя. Провода марки ПЭТ и особенно марки ПЭВ значительно лучше сохраняют эластичность эмалевого слоя. Провода с хлопчатобумажной и шелковой изоляцией выдерживают весьма длительное хранение в помеще-

ниях с нормальной влажностью и температурой, однако при хранении проводов с волокнистой органической изоляцией в сырых помещениях происходит разрушение изоляции гнилостными бактериями.



Фиг. 1,1.

дешевым является провод марки ПЭЛ. Наиболее дорогие провода со стеклянной изоляцией.

Более подробные данные об электроизоляционных материалах и обмоточных проводах приведены в «Справочнике по электрической изоляции» (ГЭИ, 1948 г). Там же указано большое количество современных книг по этим вопросам.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. Общие положения

Правильный выбор изоляции для вновь проектируемых, а также ремонтируемых машин является делом большой важности, так как изоляция в значительной мере определяет как технико-экономические показатели машины, так и ее эксплуатационную надежность.

Рассмотрим влияние материалов, конструкции изоляции и особенно толщины изоляции на свойства машины. В зависимости от выбранной толщины изоляции в паз машины можно поместить большее или меньшее количество проводников. Следовательно, толщина изоляции обмотки (витковой и относительно корпуса) определяет коэффициент заполнения паза, а значит, вес и габариты машины при заданной мощности и скорости вращения, а также ее к. п. д. Пусть машина имеет при заданной толщине вес G , мощность P , число оборотов в минуту n и к. п. д. η . Если мы применим для этой же машины другую, более тонкую изоляцию, сохранив при этом ее основные характеристики (нагревостойкость, теплопроводность), то при этом соответственно увеличится коэффициент заполнения паза машины, а это значит, что машина сможет дать другую, несколько большую мощность при том же перегреве.

Для того, чтобы сохранить неизменным эксплуатационные характеристики машины, в частности ее перегрузочную способность, одновременно с изменением коэффициента заполнения паза (f) и мощности (P) необходимо изменять также и величину магнитного потока, а следовательно, и ширину зубца. При этом соответственно изменяется и вес машины, а также ее к. п. д.

Для того, чтобы установить влияние толщины изоляции на вес и к. п. д. машины, воспользуемся законом «приведенного веса», предложенным проф. В. А. Трапезниковым, применительно к наиболее распространенному виду электрической машины,—к асинхронному двигателю.

На основании этого закона

$$G'_1 = G_1 w^{\frac{x}{y}} n = \text{const}, \quad (2,1)$$

$$G_1 = g P^x, \quad w = \omega P^{-y}, \quad (2,2)$$

где G_1 — вес машины;
 G'_1 — приведенный вес;
 w — процентные потери, т. е. величина $(1-\eta)$, выраженная в процентах (η — к. п. д. машины);
 n — скорость вращения машины в об/мин;
 P — мощность машины в кВт;
 g, ω, x и y — параметры, определяемые законом изменения к. п. д. и веса машин данной серии (в первом приближении геометрически подобных).

При изменении толщины изоляции и сохранении величины к. п. д. машины без изменения приведенный вес машины будет равен

$$G'_2 = G_2 (w)^{\frac{x}{y}} n. \quad (2,3)$$

Откуда вес машины при новом коэффициенте заполнения паза и при неизменном к. п. д.

$$G_2 = G_1 \frac{G'_2}{G'_1} = \alpha_\partial G_1, \quad (2,4)$$

где $\alpha_\partial = \frac{G'_2}{G'_1}$ — коэффициент, дающий изменение приведенного веса за счет изменения коэффициента заполнения паза.

На фиг. 2,1 показано влияние коэффициента заполнения паза электродвигателя типа МА-200 на величину коэффициента α_∂ (по Трапезникову). Так как вес машины пропорционален третьей степени любого линейного размера, то при сохранении к. п. д.

$$L_2 = L_1 \cdot \sqrt[3]{\alpha_\partial}, \quad (2,5)$$

где L_1 — линейный размер машины при коэффициенте заполнения паза f_1 ;

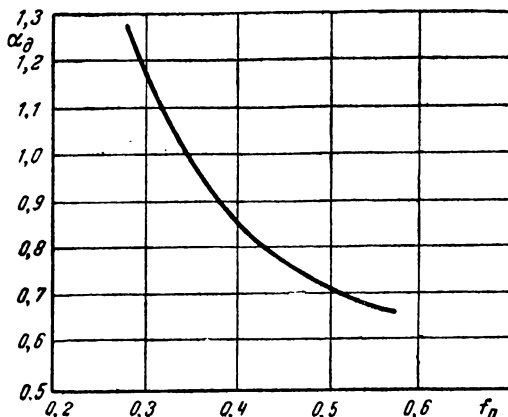
L_2 — линейный размер машины при коэффициенте заполнения паза f_2 .

Таким образом, изменяя толщину изоляции машины в пазовой части и сохраняя неизменными переув и к. п. д., мы будем изменять и ее приведенный вес, а значит, и габариты.

Для того, чтобы дать представление о влиянии толщины

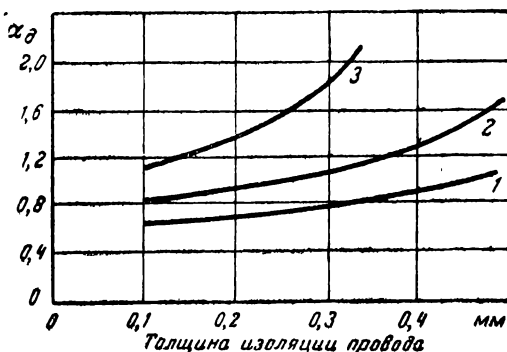
изоляции на приведенный вес машин при неизменном перегреве, приводим на фиг. 2,2 зависимость α_d от толщины витковой изоляции при разных толщинах пазовой изоляции (0,35 мм—кривая 1; 0,65 мм—кривая 2; 0,90 мм—кривая 3) для открытых электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии МА-200 со всыпной обмоткой (по Трапезникову).

Хотя уменьшение толщины изоляции обмотки и улучшает весовые показатели машин, однако для каждого вида изоляции существует оптимальный предел, ниже которого уменьшение толщины изоляции приводит к уменьшению эксплуатационной



Фиг. 2,1.

надежности электрической машины. Зависимость коэффициента, характеризующего эксплуатационную надежность низковольтной машины, от толщины данной изоляции имеет характер, показанный на фиг. 2,3. Следовательно, для повышения надежности



Фиг. 2,2.

изоляции машины следует увеличивать толщину изоляции (витковой и относительно корпуса).

Сложность выбора толщины изоляции машины состоит в нахождении необходимого оптимума, при котором машина, с одной стороны, имела бы достаточно высокие весовые показатели, с другой — необходимую эксплуатационную надежность. Такие оптимумы могут быть установлены только на основании многолетнего эксплуатационного опыта машин с различной толщиной изоляции. Поэтому при ремонтах не следует без достаточного основания изменять принятые и проверенные практикой толщины изоляции и особенно уменьшать их.

Значительное влияние на технико-экономические показа-

тели машин оказывает нагревостойкость изоляции, так как применение более нагревостойкой изоляции позволяет увеличить нагрузку машины без опасения повредить изоляцию более высоким нагревом.

Рассмотрим влияние нагревостойкости изоляции на весовые показатели машины при условии сохранения неизменным коэффициента заполнения паза и к. п. д. машины.

Используя закон приведенного веса, получим:

$$G_2 = \beta_\theta G_1, \quad (2,6)$$

и

$$L_2 = L_1 \sqrt{\beta_\theta}, \quad (2,7)$$

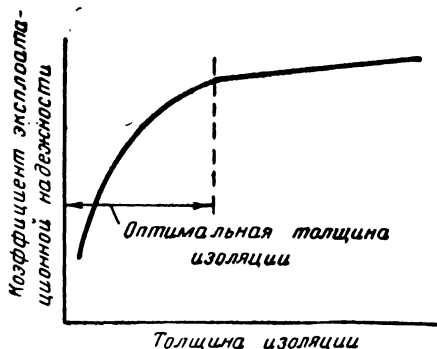
где G_1 и L_1 — вес и линейные размеры машины при превышении температуры обмотки Δt_1 ;

G_2 и L_2 — вес и линейные размеры машины при превышении температуры обмотки Δt_2 ;

$\beta_\theta = \frac{G_2}{G_1}$ — коэффициент, характеризующий изменение приведенного веса при изменении перегрева и неизменных f и η .

Значения β_θ для открытых (МА-200) и закрытых (МА-140 и МА-170) электродвигателей с короткозамкнутым ротором

для превышений температуры от 60 до 140°C и при $f_n = \text{const}$ приведены на фиг. 2,4 (по Трапезникову). Из кривых этой фигуры следует, что при сохранении η неизменным увеличение перегревов приводит к повышению приведенного веса машин из-за роста потерь в меди. Особенно значительное увеличение веса машины имеет место у открытых электродвигателей с сильно загруженной медью.



Фиг. 2,3.

Однако при некотором снижении η для закрытых машин с менее загруженной медью, чем у открытых машин, а также для машин с кратковременноповторным режимом работы (врубовые, крановые, тяговые электродвигатели и т. п.), увеличение превышений температур позволяет уменьшить весовые показатели машины при данной мощности.

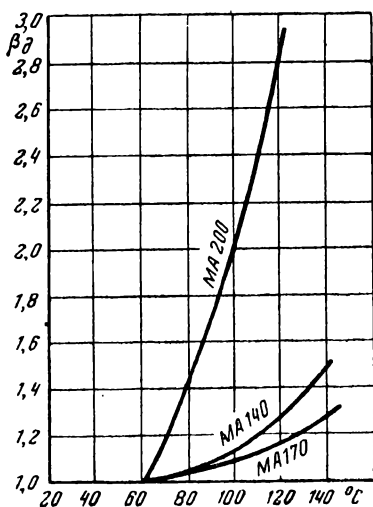
На фиг. 2,5 показано изменение габаритов электродвигателей типа МА-140 при увеличении перегрева с 80 до 140 °С с сохранением мощности при $f_n = \text{const}$, но при некотором уменьшении к. п. д. (с 91,2 до 90,2%).

Что касается открытых серийных электродвигателей, то увеличение перегревов для этих машин нецелесообразно.

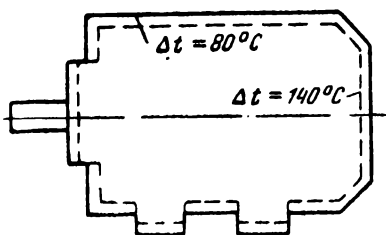
Таким образом, применение более нагревостойкой изоляции в закрытых машинах и машинах с кратковременноповторным режимом работы позволяет увеличить мощность в одних и тех же габаритах при неизменном коэффициенте заполнения

паза и при некотором снижении к. п. д. Работами ВЭИ установлено, что применение высоконагревостойкой изоляции в асинхронных двигателях позволяет увеличить их мощность вдвое.

Применение для изоляции электрических машин



Фиг. 2,4.



Фиг. 2,5.

нагревостойких материалов позволяет также повысить надежность изоляции, что имеет большое значение для машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (врубные, крановые, тяговые и тому подобные электродвигатели).

Существенное влияние на технико-экономические показатели машин оказывает теплопроводность изоляции. Нашими, а также другими работами установлено, что применение более теплопроводной изоляции (компаунд с кварцевым наполнением, пигментированные эмали др.) для магнитных катушек машин постоянного тока позволяет заметно повысить мощность машин.

В большинстве случаев между изоляцией обмотки и магнитопроводом машины, а иногда между медью и изоляцией, имеются воздушные зазоры, наличие которых приводит к образованию значительных дополнительных тепловых перепадов от меди к стали. Поэтому при изготовлении электрических машин или их ремонте необходимо стремиться к максимальной

монолитности изоляции, а также к возможно плотному прилеганию изоляции к меди обмотки и стали магнитопровода, через которую происходит теплоотвод.

Значительное влияние на технико-экономические показатели и эксплуатационную надежность машин оказывает механическая прочность изоляции и ее эластичность. В низковольтных машинах механическая прочность изоляции в значительной мере определяет толщины пазовой и витковой изоляции.

Следует также отметить влияние на эксплуатационную надежность машин таких характеристик изоляции, как влагостойкость, химстойкость, озоностойкость и др.

На технико-экономические показатели, эксплуатационную надежность, а также технологию производства, оказывают влияние не только электроизоляционные материалы, но и их конструктивное оформление.

Нами будет показано, что, используя одни и те же материалы для изоляции электрических машин, можно достигнуть разного эффекта при применении различных конструкций изоляции обмотки машины. Поэтому правильный выбор изоляции для электрической машины определяется как выбором электроизоляционных материалов, так и их конструктивным оформлением, с учетом технологических факторов.

В настоящее время в электромашиностроении применяется большое число самых разнообразных типов изоляции, к критическому рассмотрению и оценке которых мы и переходим.

2.2. Витковая изоляция

При выборе изоляционных материалов, конструкции и толщины витковой изоляции обмоток электрических машин следует учитывать:

1) величины коммутационных и атмосферных перенапряжений (последнее в машинах, в обмотки которых могут проникать волны атмосферных перенапряжений);

2) механические воздействия, которым может подвергаться витковая изоляция при изготовлении обмоток и их укладке в машину, а также в условиях эксплуатации машины (вибрации, температурные деформации, электродинамические воздействия и др.);

3) температуру обмотки (длительную, а также ту, которая может иметь место при кратковременных и кратковременноповторных режимах).

Кроме того, в ряде случаев необходимо считаться с возможностью воздействия на витковую изоляцию влаги, растворителей и химически активных реагентов, озона и др.

Следует также принимать во внимание теплопроводность материалов, применяемых для витковой изоляции, которая оказывает существенное влияние на теплоотдачу обмотки.

В настоящее время в обмотках электрических машин применяются следующие основные разновидности витковой изоляции:

I. Изоляция обмоточных проводов марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ, ПШО, ПБО, ПБД, ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПДА и ПСД и пленочная изоляция. Обмотки, изготовленные из проводов с волокнистой и комбинированной изоляцией обмоточных проводов, должны пропитываться лаком или компаундом.

II. Изоляция обмоточных проводов марок ПЭЛ, ПЭТ, ПШО, ПБО, ПБД, ПДА и ПСД с дополнительными прокладками из изоляционной бумаги, электрокартона, миканита или асбестовой бумаги. Обмотки, изготовленные из проводов с волокнистой или комбинированной изоляцией, а также имеющие непропитанные прокладки, пропитываются лаками или компаундами.

III. Междувитковые изоляционные прокладки из электрокартона, асбестовой бумаги или миканита. Электрокартон и асбестовая бумага обычно предварительно пропитываются лаками или компаундами.

IV. Ленточная изоляция: шелковые, хлопчатобумажные, стеклянные и асбестовые ленты, лакотканевые ленты, микаленты, микашелковые ленты, стекломикаленты, ленты из пленки (без подложки и с подложками из бумаги, шелковой или стеклянной ткани), а также комбинации из этих лент. Волокнистые ленты пропитываются лаками или компаундами.

В некоторых случаях (одновитковые статорные, роторные и якорные катушки) витковая изоляция обмотки является одновременно ее основной изоляцией (относительно корпуса).

В зависимости от типа машины, ее напряжения, конструкции обмотки, формы и размеров сечения проводов, класса изоляции, исполнения и других факторов следует выбирать тот или иной тип витковой изоляции.

Ниже приведено описание основных типов витковой изоляции, применяемых в электрических машинах переменного и постоянного тока, а также приведены соображения, облегчающие правильный выбор витковой изоляции.

1. Статорные, якорные и роторные всыпные обмотки машин напряжением до 500 в. Толщина изоляции обмоточного провода в значительной мере определяет коэффициент заполнения паза машины. Поэтому при выборе изоляции обмоточного провода для всыпных обмоток следует ориентироваться на применение проводов с более тонкой изоляцией, особенно в машинах с большим числом тонких проводников в пазу. На фиг. 2,6 приведены значения коэффициента η , представляющего собой отношение сечения голого провода к сечению провода с изоляцией и определяющего в основном коэффициент заполнения паза. Из этих кривых следует, что наибольшее заполнение паза может быть

достигнуто при применении проводов марки ПЭВ (с винифлексовой изоляцией), особенно в диапазоне диаметров проволоки 0,05—0,5 мм. Относительно высокое заполнение паза дает также применение провода марки ПЭЛШО. Наиболее низкое заполнение паза получается при применении проводов марок ПБД, ПСД и ПДА. С другой стороны, применение для всыпных обмоток проводов с тонкой и недостаточно механически прочной изоляцией приведет к ее повреждению при укладке обмотки в пазы или же в процессе эксплуатации машины.

Исходя из имеющегося опыта, для низковольтных машин со всыпной обмоткой следует рекомендовать следующие типы обмоточных проводов:

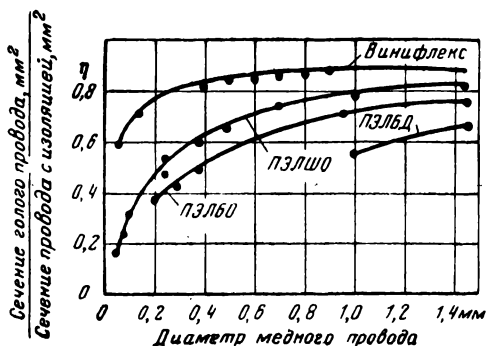
а) для мелких машин с изоляцией класса А — ПЭВ, ПЭЛШО и ПЭЛБО;

б) для средних машин с изоляцией класса А — ПЭВ, ПЭЛБО, ПБД и провода с пленочной изоляцией, причем провод ПБД следует применять для длинных машин и в том случае, когда провод имеет диаметр 1,5 ÷ 1,8 мм и выше;

в) для машин с изоляцией классов В и ВС — ПДА и ПСД.

2. Статорные и роторные протяжные обмотки. Учитывая значительные механические воздействия, которым подвергается изоляция обмоточного провода при многократной протяжке провода через пазы в процессе намотки, для машин с изоляцией класса А следует применять провод марки ПБД, предварительно пропитанный в масляносмоляном или битумномасляном лаке (типа 458), содержащем 10—12% нелетучих. Такая пропитка мало сказывается на толщине изоляции, но увеличивает механическую прочность хлопчатобумажной изоляции провода и уменьшает вероятность повреждения изоляции при протаскивании провода через пазы статора или ротора. Предварительная пропитка провода в разбавленном лаке не исключает последующей пропитки обмотки. Для машин с изоляцией классов В и ВС необходимо применять провод марок ПДА и ПСД.

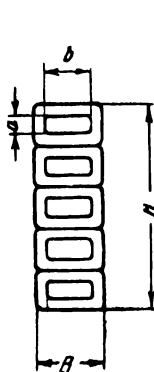
3. Статорные и якорные шаблонные катушки машин напряжением до 500 в. Для статорных шаблонных катушек низковольтных машин следует применять провода прямоугольного сечения с механически прочной изо-



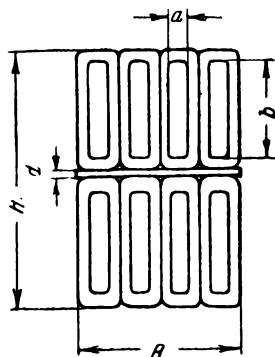
Фиг. 2,6.

ляцией, так как изоляция провода подвергается значительным механическим воздействиям при намотке заготовки, формовке, опрессовке, а также при укладке катушек в пазы машины. При выборе изоляции провода следует также учитывать перегрев обмотки, междувитковые напряжения, исполнение машины, а также сечение проводников и размеры обмотки.

В табл. 2,1 приведены основные типы витковой изоляции, применяемые главным образом для статорных и якорных шаблонных обмоток, машин постоянного тока, в тех случаях, когда возможно использование излированных прямоугольных обмоточных проводов (ПБД, ПЭВ, ПДА, ПСД и др.).



Фиг. 2,7.



Фиг. 2,8.

В этой же таблице даны формулы для расчета размеров катушек в пазовой части до наложения основной изоляции.

Обозначения, принятые в таблице:

- B — размер катушки (секции) в пазовой части по ширине до наложения основной изоляции (после опрессовки);
- H — то же по высоте катушки (секции);
- a и b — размеры голого медного провода по ГОСТ;
- Δ и δ — толщина изоляции обмоточного провода (на обе стороны) по ГОСТ или ВТУ;
- n — число проводников по ширине катушки;
- m — число проводников по высоте катушки;
- d — толщина горизонтальных прокладок между рядами проводников в якорных секциях (обычно 0,20 — 0,30 мм).

Приведенные в таблице формулы для расчета размеров катушек в пазовой части учитывают:

- а) допуски на размеры медного провода по ГОСТ;
- б) допуски на толщину изоляции провода по ГОСТ или ВТУ;
- в) выпучивание волокнистой изоляции на широкой стороне провода;
- г) разбухание изоляции провода при пропитке;
- д) наличие лаковой пленки на внешней поверхности катушки после пропитки;
- е) неплотное прилегание отдельных проводников друг к другу из-за их упругости, сохраняющееся после опрессовки.

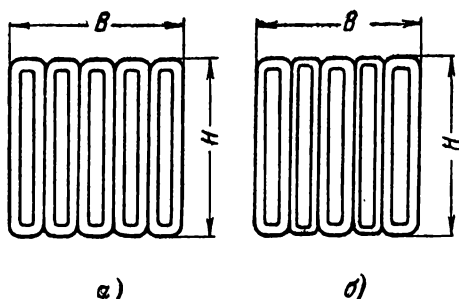
Если якорные секции с изоляцией класса А изготавливаются из проводов крупного сечения, не изолируемых на кабельных заводах пряжей, то для изоляции витков следует применять

Таблица 2,1

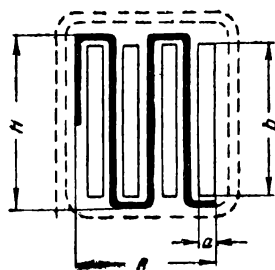
Тип обмотки	Класс изоляции	Тип витковой изоляции	Ссылка на фиг.	Формулы для расчета размеров обмоток в паховой части до галожения основной изоляции
Статорные шаблонные катушки машины переменного тока напряжением до 500 в (вкл.)	A	Два слоя хлопчатобумажной пряжи (марка провода ПБД)	2,7	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2$
То же	B, BC или СВ	Дельтаасбестовая (ПДА) или двухслойная стекловолоконная изоляция (ПСД)	2,7	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2$
Якорные шаблонные секции мелких машин напряжением до 24 в (вкл.) из прямоугольного провода	A	Винифлексовая изоляция провода ПЭВ)	—	$B = (a + \Delta + 0,02) n$ $H = (b + \delta + 0,03) m$
Якорные шаблонные секции средних машин	A	Два слоя хлопчатобумажной пряжи (марка провода ПБД). При наличии нескольких витков по высоте — прокладки из электрокартона	2,8	$B = (a + \Delta + 0,05) + 0,2$ $H = (b + \delta + 0,05) m + + d (m - 1) + 0,2$
То же	B, BC или СВ	Дельтаасбестовая (ПДА) или двухслойная стекловолоконная (ПСД) При наличии нескольких витков по высоте секции — прокладки из асбестовой бумаги или миканита	2,8	$B = (a + \Delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (b + \delta + 0,05) m + + d (m - 1) + 0,2$

пропитанные шелковые или хлопчатобумажные ленты, а также ленты из синтетических пленок с подложками или без них. При этом обычно каждый виток изолируется одним слоем ленты вполнахлеста (фиг. 2,9,а). Однако возможен также и другой способ изолировки витков лентами, при котором один из рядом лежащих витков изолируется одним слоем ленты вполнахлеста, а другой — впритык (фиг. 2,9,б). При подсчете толщин витковой изоляции, осуществляемой лентами, необходимо учитывать разбухание от пропитки как каждого витка, так и всей секции в целом.

Для якорных секций с изоляцией классов В, ВС и СВ, при небольших сечениях проводников, следует применять дельта-асбестовую или стекловолоконную изоляцию (провода марки



Фиг. 2,9.



Фиг. 2,10.

ПДА и ПСД). В многорядных якорных секциях между рядами проводников необходимо прокладывать полоски из асбестовой лакированной бумаги или же миканита толщиной 0,2—0,3 мм. Для якорных секций с изоляцией классов В и ВС, изготавливаемых из проводников крупного сечения, могут быть применены стеклянные или асбестовые ленты или же микаленты толщиной 0,075, 0,10 или 0,13 мм.

Возможен и несколько иной метод изолировки витков крупного сечения однорядных якорных секций с изоляцией класса В, при котором гибкий миканит, имеющий подложки с двух сторон, протаскивается между витками, как это показано на фиг. 2,10. При этом для витковой изоляции обычно применяется тот же самый лист гибкого миканита, которым обертывается пазовая часть секции. Витки в лобовых частях в этом случае изолируются микалентой вполнахлеста. Многолетний опыт применения витковой изоляции этого типа в СССР (ХЭМЗ) и за границей показал хорошие результаты.

Размеры якорной секции в пазовой части с витковой изоляцией по фиг. 2,10 могут быть рассчитаны по формулам:

$$\left. \begin{aligned} B &= an + dn, \\ H &= b + 2d, \end{aligned} \right\} \quad (2,8)$$

где B — размеры якорной секции в пазовой части по ширине без изоляции относительно корпуса;

H — размеры якорной секции в пазовой части по высоте без изоляции относительно корпуса;

a — толщина голы меди по ГОСТ;

b — ширина голы меди по ГОСТ;

d — толщина гибкого миканита (обычно 0,2—0,25 мм).

Если рассчитать толщину витковой изоляции якорной секции, имеющей пять витков по ширине, при применении микаленты толщиной 0,10 мм и гибкого миканита толщиной 0,25 мм, то получаются следующие результаты:

Общая толщина витковой изоляции в мм	При изолировке витков микалентой 0,1 мм (один слой вподнахлеста)	При изолировке витков миканитом 0,25 мм
По ширине паза	2,0	1,25

При большем числе витков разница в размере витковой изоляции по ширине паза получится еще большей.

Учитывая также, что пробивное напряжение гибкого миканита толщиной 0,25 мм достигает 6—8 кВ, что является более чем достаточным для витковой изоляции, следует рекомендовать широкое применение витковой изоляции однорядных якорных секций гибким миканитом по фиг. 2,10.

Для витковой изоляции якорных секций крупного сечения с изоляцией классов ВС и СВ следует применять стекломикаленты.

4. Статорные катушки высоковольтных машин переменного тока. При выборе витковой изоляции статорных катушек высоковольтных машин следует исходить из величины междувитковых напряжений, которые могут возникнуть в обмотке машины, находящейся в условиях эксплуатации, с учетом коммутационных и атмосферных перенапряжений, если последние могут иметь место. Кроме того, следует учитывать класс изоляции обмотки, сечение проводников и размеры катушки.

В табл. 2,2 приведены основные данные для наиболее распространенных типов витковой изоляции, применяемых в высоковольтных машинах переменного тока. Соответствующие конструкции витковой изоляции показаны на фиг. 2,11.

Обозначения, принятые в табл. 2,2:

B — ширина катушки в пазовой части с учетом витковой изоляции и допусков (до наложения основной изоляции) в мм;

H — то же по высоте катушки;

a и b — размеры голы меди по ГОСТ;

Δ и δ — толщина изоляции обмоточного провода по ГОСТ или ВТУ;

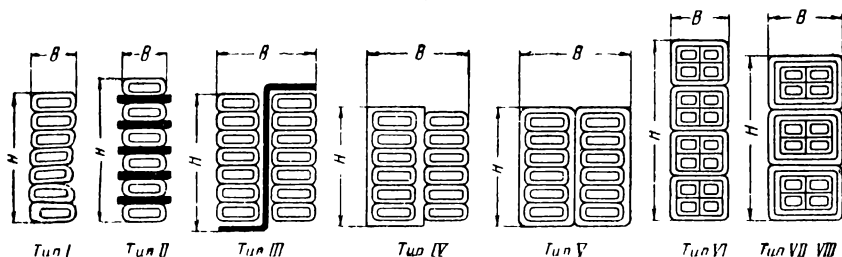
n — число проводников по ширине катушки;

m — число проводников по высоте катушки;

k — число эффективных витков по высоте катушки.

В приведенных формулах, по которым должен производиться подсчет размеров статорных катушек, учтены допуски на неплотное прилегание проводников друг к другу из-за неровностей, частично сохраняющихся после прессовки, и разбухание волокнистой изоляции при пропитке.

Следует отметить, что при применении вертикальных разделительных прокладок (тип витковой изоляции III) очень трудно добиться, чтобы прокладки не сдвигались и не повреждались в процессе изготовления катушек. Поэтому этот тип витковой изоляции следует по возможности избегать и заменять его типом IV или еще лучше типом V.



Фиг. 2,11.

При выборе витковой изоляции для статорных обмоток высоковольтных машин следует руководствоваться табл. 2,3.

Более обоснованный выбор витковой изоляции может быть произведен, исходя из величины витковых перенапряжений, которые могут возникнуть при работе машины в условиях эксплуатации.

Опыты включения генераторов и электродвигателей сразу в полное напряжение показывают, что на первую катушку ложится около 75—100% фазного напряжения. При отключениях напряжения на первой катушке достигают $1,3 U_{\phi}$. При этом распределение напряжения по виткам катушки неравномерно. Так, по некоторым замерам в катушке, состоящей из четырех витков, на первый виток приходилось около половины напряжения. Значительных повышений напряжений можно ожидать при несинхронном включении генератора на параллельную работу. Включение одной фазы на напряжение шины может дать на невключенных фазах напряжение $U_{\phi} + 1,5 U_{\phi} = 2,5 U_{\phi}$. Это напряжение в результате возникновения колебаний может быть превзойдено.

Наиболее суровое воздействие на витковую изоляцию машин оказывают волны атмосферного происхождения, амплитуда которых ограничивается или изоляцией линии или же защитными аппаратами. Предполагая, что установленные в системе разрядники и прочие защитные устройства обеспечи-

Таблица 2,2

Тип обмотки	Тип и класс витковой изоляции	Формулы для расчета размеров катушек в пазовой части в мм	Нижний предел пробивного напряжения витковой изоляции в в	Испытательное напряжение на виток в в
Один эффективный виток по ширине катушки	Тип I. Класс А Провод ПБД. В головках катушек между витками прокладки из электрокартона толщиной 0,3—0,5 мм. Пропитка катушек в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2$	600	300
То же	Тип I. Класс В Провод ПДА или ПСД. В головках катушек между витками прокладки из миканита толщиной 0,3—0,5 мм. Пропитка катушек в лаке или компаунде	$B = b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2$	700—800	300
То же	Тип II. Класс А Провод ПБД и прокладки из электрокартона 0,2 мм между витками. В головках дополнительные прокладки из электрокартона толщиной 0,5 мм. Пропитка катушек в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2(m - 1) + 0,2$	1 000	500
То же	Тип II. Класс В Провод ПДА или ПСД и миканитовые прокладки толщиной 0,2 мм между витками. В головках дополнительные прокладки из миканита толщиной 0,5 мм. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2(m - 1) + 0,2$	1 500	600
Два эффективных витка по ширине катушки	Тип III. Класс А Провод ПБД и вертикальная Z-образная прокладка из электрокартона толщиной 0,4 мм в пазовой части катушек.	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 0,4$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,8$	600	300, но не более 1 500 в на катушку

Два эффективных витка по ширине катушки	В лобовых частях и головках одна половинка катушки изолируется одним слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста с заходом на прокладку из электрокартона. Пропитка катушки в лаке или компаунде	Тип III. Класс В Провод ПДА или ПСД и Z-образная прокладка из миканита толщиной 0,4 мм в пазовой части катушки. В лобовых частях и головках одна половинка катушки изолирована одним слоем миканита толщиной 0,13 мм вполнахлеста с заходом на миканитовые прокладки. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 0,4$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,8$	700—800	300, но не более 1500 в на катушку
	То же	Тип IV. Класс А Провод ПБД. Одна половинка катушки изолирована по всей длине хлопчатобумажной лентой вполнахлеста. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 0,8$ $H = a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,8$	600	300, но не более 1500 в на катушку
То же	То же	Тип IV. Класс В Провод ПСД или ПДА. Одна половинка изолирована микалентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 0,52$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,52$	700—800	300, но не более 1500 в на катушку
	То же	Тип V. Класс А Провод ПБД. Каждая половинка катушки изолирована хлопчатобумажной лентой вполнахлеста. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 1,6$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,8$	600	300, но не более 2500 в на катушку
То же	То же	Тип V. Класс В Провод ПСД или ПДА. Каждая половинка катушки изолирована микалентой толщиной 0,13 мм. Пропитка катушки в лаке или компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) 2 + 0,2 + 1,04$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 + 0,52$	700—800	300, но не более 2500 в на катушку

Продолжение табл. 2.2

Тип обмотки	Тип и класс вятковой изоляции	Формулы для расчета размеров катушек в пазовой части в мм	Нижний предел про- оивного напряже- ния вит- ковой изо- ляция в в	Испытательное напряжение на виток в в
Каждый виток состоит из группы парал- лельно соеди- ненных про- водников То же	Тип VI. Класс А Провод ПБО. Каждый виток по всей длине катушки изолирован одним слоем хлопчатобумаж- ной ленты вполнахлеста. Пропитка катушки в компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2 + 0,8$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,8 + 0,2$	3000—4000	1 000
	Тип VI. Класс В Провод ПСД, ПДА или ПБО. Каждый виток по всей длине катушки изолирован одним слоем микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста. Про- питка катушки в компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2 + 0,52$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 +$ $+ 0,52 \cdot k$	4 000	1 000
То же	Тип VII. Класс А Провод ПБО. Каждый виток изолирован одним слоем микаленты толщиной 0,13 мм и сверху одним слоем хлопчатобумажной ленты впритык. Пропитка катушки в компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2 + 0,92$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 +$ $+ 0,92 \cdot k$	5 000	1 200
	Тип VII. Класс В Провод ПСД, ПДА или ПБО. Каждый виток изолирован одним слоем микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста и одним слоем стеклотолы толщиной 0,10 мм вполнахлеста. Пропитка ка- тушки в компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2 + 0,92$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 +$ $+ 0,92 \cdot k$	5 000	1 200
То же	Тип VIII. Класс В Провод ПСД, ПДА или ПБО. Каждый виток изолирован двумя слоями микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста. Пропитка катушки в компаунде	$B = (b + \delta + 0,05) n + 0,2 + 1,04$ $H = (a + \Delta + 0,05) m + 0,2 +$ $+ 1,04 \cdot k$	9 000	1 500

Таблица 2,3

Тип витковой изоляции	Область применения
I	Статорные обмотки машин переменного тока мощностью до 500 — 1 000 <i>кв</i> а при напряжении до 3 300 <i>в</i> . Рабочее напряжение между витками не более 35 <i>в</i> .
II	Статорные обмотки машин переменного тока мощностью выше 1 000 <i>кв</i> а при напряжении до 3 300 <i>в</i> . Рабочее напряжение между витками не более 50 <i>в</i> .
III	Статорные обмотки машин переменного тока мощностью до 500 <i>кв</i> а при напряжении до 3 300 <i>в</i> .
IV	Статорные обмотки машин переменного тока мощностью выше 500 <i>кв</i> а при напряжении до 3 300 <i>в</i> .
V	Статорные обмотки машин переменного тока напряжением до 6 600 <i>в</i> .
VI	Статорные обмотки крупных машин переменного тока напряжением до 11 000 <i>в</i> . Рабочее напряжение между витками до 60 — 70 <i>в</i> .
VII	Статорные обмотки крупных машин переменного тока до 11 000 <i>в</i> . Катушки больших размеров.
VIII	Статорные обмотки крупных машин переменного тока напряжением до 16 000 <i>в</i> . Рабочее напряжение между витками до 100 <i>в</i> .

вают в установке появление падающих на обмотку машины волн напряжением не свыше $U_a = \xi U_\phi \sqrt{2}$ и с крутизной фронта, характеризуемой t_a , получим величину импульсного напряжения на концах витка длиной, соответствующей времени t_t :

$$U_m = \frac{t_t}{t_a} U_a = \frac{t_t}{t_a} \xi U_\phi \sqrt{2}, \quad (2,9)$$

где t_t — время распространения волны по длине витка в *мксек*;

t_a — длина фронта падающей в обмотку машины волны в *мксек*;

U_a — амплитуда падающей в обмотку машины волны;

U_ϕ — номинальное фазное напряжение машины;

ξ — коэффициент $= \frac{U_a}{U_\phi}$.

Вводя в уравнение (2,19) коэффициент ξ_s , учитывающий изменение напряжения между витками из-за наличия емкости витков относительно корпуса, получим:

$$\xi_s U_m = \frac{t_t}{t_a} \xi_s U_\phi \sqrt{2}. \quad (2,10)$$

Время распространения волны по длине витка

$$t_t = \left(\frac{2l_e}{v_n} + \frac{l_m - 2l_e}{v_\lambda} \right) \cdot 10^{-6} \text{ сек.} \quad (2,11)$$

где l_e — длина витка в стали в мм;

l_m — полная длина витка в мм;

v_n — скорость распространения волны в пазу в км/сек;

v_λ — скорость распространения волны в лобовых частях в км/сек.

По данным, полученным при исследовании машин завода „Электросила“, имеющих многовитковые катушки, $v_n \approx 29\,000 \div 35\,000$ км/сек, а $v_\lambda \approx 200\,000$ км/сек.

В большинстве практических случаев

$$\frac{\xi \cdot 10^{-6}}{t_a} \approx 2; \xi_s \approx 0,8.$$

В таком случае импульсное напряжение на концах первого витка

$$U_u = 2,3 U_\phi \left(\frac{2l_e}{v_n} + \frac{l_m - 2l_e}{v_\lambda} \right) \quad (2,12)$$

Применим формулу (2,12) для подсчета перенапряжений на витках обмотки трехфазного асинхронного двигателя типа ГАМ 1610-8, 6 000 в, 500 квт, 735 об/мин, имеющего следующие данные:

Число витков в катушке	6
Длина витка	2,41 м
Длина стали статора	490 мм

В этом случае получим:

$$U_u = 2,3 \frac{6\,000}{\sqrt{3}} \left(\frac{2 \cdot 2410}{30\,000} + \frac{2410 - 2 \cdot 490}{200\,000} \right) = 330 \text{ в.}$$

Экспериментально для этой машины при крутизне фронта волны 6,7 кв/мксек получено близкое значение напряжения на первом витке этой машины (310 в).

При определении запаса электрической прочности выбранной витковой изоляции по отношению к импульсному напряжению, воздействию на витковую изоляцию, следует исходить из коэффициента импульса около 1,2—1,3.

Выбирая для рассматриваемого случая тип VI витковой изоляции (микаленту), получим запас электрической прочности по отношению к пробивному

$$n = \frac{4\,000 \cdot 2}{1,4 \cdot 330} = 12,$$

что следует признать вполне достаточным.

Запас электрической прочности по отношению к испытательному при этом будет около 3.

5. Катушки возбуждения синхронных машин переменного тока. В катушках возбуждения синхронных машин с явновыраженными полюсами применяются следующие основные типы витковой изоляции:

Тип I при изоляции класса А — провод марки ПБД круглого или прямоугольного сечения. Пропитка катушки в лаке или промазка витков пигментированной эмалью (при намотке катушки).

Тип I при изоляции классов В или ВС — провод круглый или прямоугольный ПДА или ПСД. Пропитка катушки в лаке или промазка витков нагревостойкой пигментированной эмалью (при намотке катушки).

Тип II при изоляции класса А — лакированный электрокартон толщиной 0,15—0,30 мм, прокладываемый между витками катушки, изготовленной из голой шинной меди. Катушка после укладки витковой изоляции нагревается и прессуется.

Тип II при изоляции класса В — лакированная асбестовая бумага толщиной 0,2—0,3 мм, прокладываемая между витками катушки, изготовленной из голой шинной меди. Катушка после укладки витковой изоляции нагревается и прессуется.

В синхронных машинах с неявновыраженными полюсами для витковой изоляции катушек, изготовленных из голой шинной меди, применяются:

1) электрокартоновые или миканитовые прокладки между витками в зависимости от класса изоляции;

2) микалента светлая ЛСФ или ЛСМ (на глифталевом лаке) толщиной 0,13—0,15 мм, — в этом случае каждый виток изолируется одним слоем микаленты вполнахлеста;

3) смешанная изоляция, состоящая из междувитковых прокладок и микаленты (для крайних витков).

6. Катушки главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока. В катушках главных и дополнительных полюсов в зависимости от сечения провода и класса изоляции применяются следующие основные типы витковой изоляции.

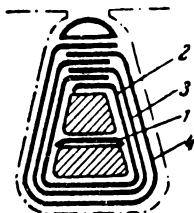
I. При намотке катушек из изолированного обмоточного провода достаточной собственной изоляции провода — ПЭЛ, ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПБО и ПБД — для изоляции класса А, ПДА и ПСД — для изоляции класса В и ВС. Для усиления изоляции между отдельными слоями катушки, а также для обеспечения правильной намотки прокладываются прокладки из тонкой изоляционной бумаги (толщиной 0,03 мм). После изготовления катушки витковая изоляция пропитывается в лаке или компаунде.

II. При намотке катушек из голой медной шины или ленты — прокладки из лакированного или пропитанного электро-

картона, асбестовой пропитанной бумаги или же миканита толщиной от 0,2 до 0,5 мм в зависимости от класса изоляции и размеров катушки.

2,3. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с полужакрытым пазом

Конфигурация изоляции статорных обмоток низковольтных машин переменного тока относительно корпуса определяется главным образом формой паза и способом укладки обмотки в машину. При выборе изоляционных материалов исходят в основном из допустимого перегрева обмотки и исполнения машины. Что касается толщины основной изоляции, то в низковольтных машинах она выбирается, главным образом исходя из механических соображений.



Фиг. 2, 12.

Ниже приведено описание наиболее часто применяемых конструкций изоляции статорных обмоток машин переменного тока напряжением до 500 в (вкл.).

1. Полужакрытый паз, всыпная обмотка. В СССР для машин с изоляцией класса А наиболее широкое применение получила конструкция пазовой изоляции, показанная на фиг. 2, 12. В этом случае основной изоляцией обмотки относительно корпуса служит лапчатка 3 или же лакошелк (для мелких машин). Лапчатка (или лакошелк) расположена между двумя слоями электрокартона. Электрокартон 4, прилегающий к стали статора, защищает лапчатку (или лакошелк) от механических повреждений со стороны статора, где всегда имеются неровности, заусенцы, острые края, особенно в местах выхода обмотки из паза. Внутренний слой электрокартона 2, прилегающий к обмотке, имеет двойное назначение; он облегчает укладку катушки в паз статора и, кроме того, предохраняет лапчатку (или лакошелк) от сминания и механических повреждений при укладке катушки в паз. Толщины лапчатки, лакошелка и электрокартона выбираются в зависимости от диаметра статора и рабочего напряжения. Ниже, в табл. 2, 4, приведены толщины лапчатки, лакошелка и электрокартона, применяемые для изоляции статорных обмоток напряжением до 500 в (вкл.).

Электрическая прочность пазовой изоляции, изображенной на фиг. 2, 12, определяется пробивным напряжением лапчатки (или лакошелка) и двух слоев электрокартона.

При расчете электрической прочности пазовой изоляции машин со всыпной обмоткой следует учитывать, что при укладке и изоляции катушек в паз происходит механическое повреждение лапчатки и электрокартона, в результате чего

Таблица 2,4

Наружный диаметр пакета статора в мм	Номинальное напряжение в в	Толщина лакоткани или лакошелка в мм	Толщина электрокартона, прилегающего к пакету статора в мм	Толщина электрокартона, прилегающего к обмотке в мм	Общая толщина пазовой изоляции в мм
—	До 24 (вкл.)	—	0,20—0,30	—	0,20—0,30
90	До 380 "	0,10	0,10	0,10	0,30
90—120	До 380 "	0,10	0,20	0,10	0,40
120—250	До 500 "	0,20	0,20	0,10	0,50
250—500	До 500 "	0,20	0,20	0,20	0,60
>500	До 500 "	0,20	0,30	0,20	0,70

электрическая прочность изоляции несколько снижается, особенно в местах выхода из паза. Это снижение электрической прочности пазовой изоляции определяется качеством самих материалов, состоянием внутренней поверхности паза, радиусом закругления концевых вырубок, диаметром и жесткостью провода, длиной пакета статора, а также коэффициентом заполнения паза.

Следует отметить, что очень часто расчетчики машин, стремясь повысить технико-экономические показатели машин, допускают чрезмерно высокие коэффициенты заполнения паза. Это приводит к затруднениям при обмотке (снижается производительность) и, обычно, к повышенному количеству пробоев при испытании электрической прочности изоляции машины. Поэтому не следует превосходить установленных практикой оптимальных коэффициентов заполнения паза. Для выяснения запасов электрической прочности пазовой изоляции нами были изготовлены опытные макеты машин с различными типами изоляции. В табл. 2,5 приведены значения пробивных

Таблица 2,5

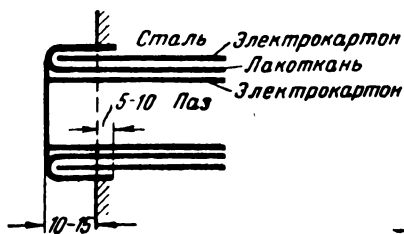
№ вариантов	Наименование материалов и их толщина в мм	Общая толщина пазовой изоляции (на статору) в мм	Пробивные напряжения пазовой изоляции (средние значения) в в	
			в нормальном состоянии	после действия влаги
1	Два слоя промасленного электрокартона 0,2 мм и черная лакоткань 0,2 мм между ними	0,65	7 800	3 540
2	Два слоя лакированного электрокартона 0,25—0,30 мм и светлая лакоткань 0,2 мм между ними	0,65—0,70	7 200	5 040
3	Один слой промасленного электрокартона 0,2 мм и один слой светлой лакоткани 0,2 мм	0,40	6 000	2 680

напряжений пазовой изоляции в нормальном состоянии и после 960 часов выдержки машин в 95—98%-ной относительной влажности.

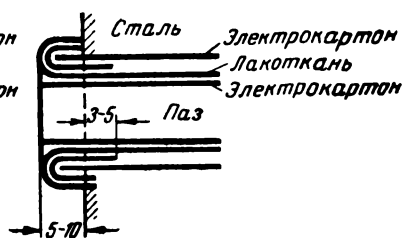
В машинах массового исполнения величины пробивных напряжений будут несколько ниже, так как в этом случае вполне вероятны значительные механические повреждения лакоткани и электрокартона. Однако и в этом случае при толщине пазовой изоляции 0,5—0,6 мм электрическая прочность обмотки относительно корпуса достигает 5 000—6 000 в и выше.

Учитывая, что испытательное напряжение статорных всыпных обмоток машин переменного тока мощностью выше 3 квт и напряжением 500 в составляет при первом испытании (до соединения и пайки) 3 500 в, эту величину электрической прочности следует признать вполне достаточной. Необходимо отметить недопустимость применения пазовой изоляции, при которой лакоткань (или лакошелк) расположена таким образом, что она прилегает к стали статора. При этом неизбежны механические повреждения малопрочной лакоткани (или лакошелка) об острые края и выступы паза и значительное снижение электрической прочности лакоткани.

При конструировании пазовой изоляции особое внимание должно быть уделено механической защите места выхода пазовой изоляции из паза, т. е. того места, где изоляция легко повреждается об острый край пакета статора (особенно при осадке лобовых частей), а также защите края изоляции, где она легко надрывается при укладке и формовке обмотки. Для усиления механической прочности пазовой изоляции лакоткань следует нарезать по диагонали (под углом 45°). В этом случае сопротивление надрыву значительно повышается.



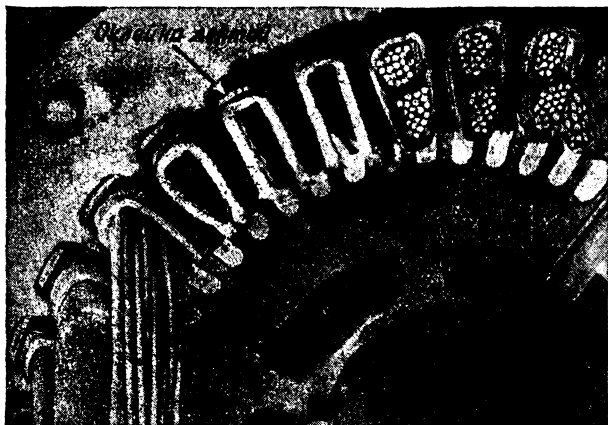
Фиг. 2,13.



Фиг. 2,14.

На фиг. 2,13 и 2,14 показаны конструкции пазовой изоляции, у которых усиление места выхода изоляции из паза, а также края изоляции достигается одинарным (фиг. 2,13) или двойным (фиг. 2,14) заворотом лакоткани (или лакошелка). У небольших машин иногда применяется заворот электрокартона. Для усиления места выхода изоляции из паза в некоторых конструкциях в паз вставляется длинная подоска

электрокартона с загнутыми краями или же кусочки электрокартона, которые располагаются у края паза. Наиболее надежным способом механической защиты краев пазовой изоляции является оклейка электрокартона хлопчатобумажной или шелковой лентой (фиг. 2,15).



Фиг. 2,15.

Для уменьшения повреждения пазовой изоляции при укладке обмотки следует также рекомендовать:

- 1) применение концевых шайб из электрокартона, фибры, гетинакса или текстолита;
- 2) использование стягивающих колец для опоры пазовой изоляции в месте ее выхода из паза;
- 3) тщательную дорновку и опиловку пазов.

При двухслойной обмотке изоляцией в пазовой части между верхней и нижней сторонами катушек служит полоска пропитанного электрокартона толщиной от 0,2 до 0,5 мм (в зависимости от размеров статора и напряжения). Ширина этой прокладки должна быть несколько больше ширины паза, т. е. прокладка должна быть загнута, что исключает возможность соприкосновения витков верхней и нижней катушек (фиг. 2,12).

Оценивая описанную выше конструкцию пазовой изоляции статоров с полужакрытым пазом следует отметить и ее недостатки:

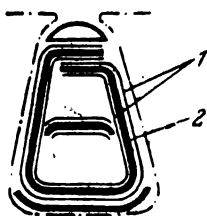
1. Наличие трех слоев изоляции в пазу приводит к образованию дополнительных воздушных прослоек между обмоткой и пакетом статора, которые практически невозможно полностью заполнить лаком при пропитке. Наличие этих воздушных прослоек ухудшает теплопроводность, а также влагостойкость пазовой изоляции.

2. Необходимость применения двух слоев электрокартона приводит к увеличению общей толщины пазовой изоляции.

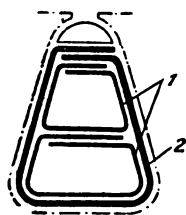
Учитывая эти недостатки следует рекомендовать применение однослойной изоляции, находящей все большее применение и состоящей из одного слоя электрокартона, склеенного с лакошелком (или лакотканью) (фиг. 2,16). В этом случае диагонально нарезанная лакоткань или лакошелк склеивается с высококачественным электрокартоном с помощью электроизоляционного клея (например, нитроглифталевого). Полученный таким образом композиционный материал нарезается на полосы требуемых размеров, которые и вставляются в пазы статора. При этом электрокартон прилегает к стали статора.



Фиг. 2, 16.



Фиг. 2, 17.



Фиг. 2, 18.

Для пазов трапециoidalной формы полосы предварительно фальцуются для придания им формы паза. Такая «коробочка» затем вставляется в пазы статора. Для предохранения краев изоляции от надрыва их оклеивают лентой. Усиление места выхода изоляции из паза достигается прокладкой полосы электрокартона. У описанной выше композиционной изоляции нет воздушных прослоек воздуха между лакотканью и электрокартоном, что делает эту изоляцию более теплопроводной и влагостойкой.

В последние годы в связи с освоением производства высококачественных синтетических пленок (из триацетатцеллюлозы, ацетобутиратцеллюлозы и др.) они получают широкое применение для изоляции низковольтных машин и в частности для машин с полужакрытым пазом.

На фиг. 2,17 приведена конструкция пазовой изоляции асинхронного двигателя, у которого пленка 1 использована в качестве основного диэлектрика. В этом случае для механического усиления тонкой пленки (0,04—0,07 мм) применен электрокартон 2.

Как показал опыт, наилучшие результаты могут быть получены при применении электрокартона, оклеенного пленкой с двух сторон.

Намотка машин с изоляцией из пленкокартона не вызывает никаких затруднений благодаря гладкости и твердости

пленки. Применение тонких синтетических пленок, обладающих высокой электрической прочностью как при нормальной температуре, так и при повышенных температурах, в сочетании с высококачественным, механически прочным электрокартоном позволяет обеспечить необходимые запасы электрической прочности при относительно малых толщинах (0,3—0,5 мм).

Иногда для повышения электрической прочности междукатушечной изоляции каждую сторону катушки обертывают лакотканью 1, как это показано на фиг. 2,18 (2—электрокартон).

В машинах со всыпной обмоткой катушки разных фаз изолируются в лобовых частях относительно друг друга лаком-шелком, лакотканью (в малых машинах), электрокартоном или же электрокартоном в сочетании с лакотканью. Следует рекомендовать для междукатушечных прокладок применение электрокартона, склеенного с лакотканью или же с синтетической пленкой.

Общая толщина междукатушечных прокладок при этом должна составлять 0,3—0,5 мм в зависимости от размеров машины, диаметра провода и рабочего напряжения.

Для машин с усиленной изоляцией иногда применяется изолировка лобовых частей катушек слоем лакотканевой ленты и слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста с заходом на пазовую изоляцию. Этот метод является с точки зрения качества изоляции наиболее совершенным; однако при этом ухудшается теплоотдача с лобовых частей, и поэтому он почти не применяется в машинах нормального исполнения.

Хорошей защитой лобовых частей от механических повреждений, а также от воздействия химически активных реагентов, могут служить специальные пасты или обмазочные компаунды.

Описанные выше конструкции изоляции относились к машинам нормального исполнения с изоляцией класса А. Для машин с изоляцией класса В, а также для машин с влагостойкой изоляцией, вместо лакоткани или лакошелка применяется гибкий миканит. В этой конструкции основные характеристики изоляции (теплостойкость, влагостойкость, электрическая прочность) определяются миканитом, а ее механическая прочность — электрокартоном. Применяются также и другие конструкции пазовой изоляции машин, с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения. Из них наибольший интерес представляют конструкции, у которых в качестве пазовой изоляции используются микакартон (несколько слоев слюды вклеенные между двумя слоями электрокартона), гибкий миканит с подложками из ткани и бумаги (обычно в сочетании с лакотканью), стеклолакоткань, склеенная с электрокартоном, и др.

В табл. 2,6 приведены значения пробивных напряжений

разных типов пазовой изоляции всыпных обмоток относительно корпуса в нормальном состоянии и после 960 час. выдержки машин в 95—98%-ной относительной влажности.

Таблица 2,6

№ п. п.	Наименование материалов и их толщина в мм	Общая толщина пазовой изоляции в мм (на сторону)	Пробивное напряжение пазовой изоляции (средние значения) в в	
			в нормальном состоянии	после действия влаги
1	Микаткань (гибкий миканит, оклеенный с двух сторон хлопчатобумажной тканью) толщиной 0,5—0,6 мм . . .	0,5—0,6	7 200	5 400
2	Микаткань толщиной 0,3—0,4 мм и светлая лакоткань 0,2 мм	0,5—0,6	8 200	4 500
3	Микаткань толщиной 0,3—0,4 мм и черная лакоткань 0,2 мм	0,5—0,6	9 400	4 920
4	Два слоя лакированного электрокартона толщиной 0,25—0,30 мм и один слой гибкого миканита 0,2 мм между ними	0,6—0,7	9 200	5 700
5	Два слоя электрокартона толщиной 0,2 мм и один слой миканита 0,2 мм между ними	0,6	8 000	3 900
6	Один слой лакированного электрокартона толщиной 0,3 мм и один слой микаткани 0,3 мм	0,6	7 000	6 120
7	Один слой электрокартона 0,2 мм и один слой микаткани толщиной 0,3—0,4 мм	0,5—0,6	7 000	4 020

Из приведенных в табл. 2,6 данных следует, что применение для пазовой изоляции миканита толщиной 0,2 мм, расположенного между двумя слоями электрокартона, толщиной 0,2 мм каждый, обеспечивает достаточно высокие запасы электрической прочности, даже после длительного выдерживания машин во влажной атмосфере.

Следует отметить, что приведенные выше значения пробивных напряжений пазовой изоляции были получены нами на опытных машинах. В машинах массового заводского исполнения значения пробивных напряжений будут несколько ниже.

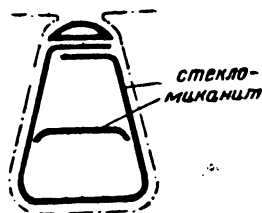
Весьма перспективным типом пазовой изоляции класса В, базирующейся на применении стеклолакоткани взамен гибкого миканита, является конструкция, при которой в качестве пазовой изоляции использован композиционный материал, состоящий из теллустойкой стеклолакоткани, склеенной с высо-

кокачественным электрокартоном; это позволяет получить плотную, механически прочную и нагревостойкую изоляцию без применения дорогой и остродефицитной слюды.

Возможно также получение нагревостойкой пазовой изоляции, не содержащей слюды, и на основе композиционного материала, представляющего собой триацетатцеллюлозные или ацетобутиратцеллюлозные пленки, склеенные со стеклотканью.

В машинах с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения следует применять прокладки между катушками (в пазу статора) из миканита или микакартона. Возможно также использование для изоляции класса В прокладок из электрокартона, склеенного с стеклолакотканью.

В этих случаях в лобовых частях для междукатушечных прокладок следует применять гибкий миканит (с подложками из бумаги или ткани), или микакартон, или же электрокартон, склеенный с стеклолакотканью. В тех случаях, когда температура обмотки превосходит $125\text{--}130^\circ\text{C}$, необходимо применение специальных конструкций изоляции с использованием высокотеплостойких материалов.



Фиг. 2,19.

Для машин, имеющих сыпную обмотку, может быть применена конструкция пазовой изоляции, приведенная на фиг. 2,19, базирующаяся на применении стеклоткани, слюды и высокотеплостойких лаков (например, глифталевых, кремнийорганических и им подобных). При этом основным материалом, определяющим электрическую прочность пазовой изоляции, является слюда. Стеклоткань обеспечивает требуемую механическую прочность, а лак служит только для скрепления основных материалов. В некоторых конструкциях стеклослюдяная изоляция комбинируется со специальной стеклолакотканью, что позволяет повысить механическую прочность пазовой изоляции.

Изоляцией в лобовых частях в этом случае служит стекломиканит толщиной $0,3\text{--}0,5\text{ мм}$.

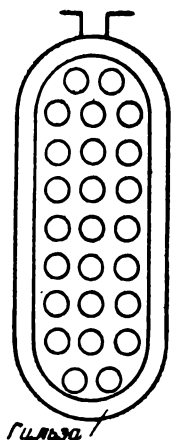
При применении высоконагревостойких лаков (кремнийорганических) возможно повышение рабочих температур машины до 200°C .

Исходя из критического рассмотрения применяемых в настоящее время конструкций пазовой изоляции для статоров со сыпной обмоткой следует рекомендовать для вновь проектируемых и ремонтируемых низковольтных машин следующие типы изоляции:

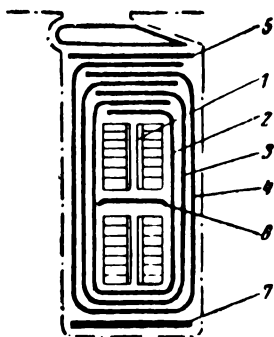
1) Для машин нормального исполнения с изоляцией класса А в пазу — пленкокартон или электрокартон, склеенный с лакотканью, общей толщиной 0,3—0,6 мм. Прокладка между катушками в пазовых и лобовых частях соответственно из пленкокартона или электрокартона, склеенного с лакотканью.

2) Для машин нормального исполнения класса В — электрокартон, склеенный с стеклолакотканью (в пазовых и лобовых частях), или микапрессшпан толщиной 0,3—0,6 мм.

3) Для машин с нагревостойкой изоляцией (класса ВС и СВ) — стекломиканит толщиной 0,30—0,6 мм (в пазовых и лобовых частях).



Фиг. 2,20.



Фиг. 2,21.

4) Для машин с влагостойкой изоляцией — гибкий миканит в сочетании с механически прочными подложками (лакированный электрокартон, черная лакоткань и др.).

2. Полузакрытый паз, протяжная обмотка. Для протяжных обмоток, которые в настоящее время применяются сравнительно редко, изоляцией обмотки относительно корпуса в пазовой части служит гильза, имеющая форму паза (фиг. 2,20). Для нормальных машин с изоляцией класса А пазовые гильзы изготавливаются из промасленного электрокартона толщиной 0,2—0,3 мм. Толщина стенки гильзы, состоящей из двух-трех слоев электрокартона, обычно составляет 0,5—0,6 мм. Для машин с влагостойкой изоляцией на электрокартон перед изготовлением гильзы наклеивается один или два слоя щипаной слюды. Получающаяся при этом прослойка из слюды обеспечивает более высокую влагостойкость пазовой изоляции.

Для машин с изоляцией класса В пазовая гильза изготавливается из микафолия и обычно имеет толщину 0,6—0,8 мм.

2.4. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с полуоткрытым пазом

Конструкция изоляции класса А статорных катушек машин нормального исполнения в пазовой и лобовых частях при полуоткрытой форме паза показана на фиг. 2,21, а толщины изоляции даны в табл. 2,7.

Таблица 2,7

Ссылка на фиг. 2,21	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толши- на изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
Пазовая часть					
1	Бумага телефонная (скреп- ляющая)	0,7	1	0,28	0,28
2	Электрокартон пропитанный	0,15	1	0,30	0,45
3	Лакоткань	0,20	1	0,40	0,60
4	Электрокартон пропитанный	0,20	1	0,40	0,60
5	Электрокартон пропитанный	0,30	1	—	0,30
6	Электрокартон пропитанный	1,5	1	—	1,50
7	Электрокартон пропитанный	0,50	1	—	0,50
Суммарная толщина изоля- ции в пазовой части		—	—	1,38	4,23
Лобовая часть					
Хлопчатобумажная лента пропитанная ¹		0,20	1 слой в полна- хлеста	0,80	0,80
Пропитка в лаке и разбу- хание		—	—	0,20	0,20
Суммарная толщина изоля- ции полукатушки		—	—	1,00	1,00

¹ Хлопчатобумажная лента накладывается с заходом на пазовую часть на 10 мм.

Размеры паза:

По ширине:

$B = 2 \times (\text{медь изолированная} + \text{допуск на разбухание и пропитку провода}) + 1,38 + \text{зазор на укладку } (0,6 \div 0,8 \text{ мм}).$

По высоте:

$H = 2 \times (\text{медь изолированная} + \text{допуск на разбухание и пропитку провода}) + 4,23 + \text{зазор на укладку } (1 \text{ мм}).$

Возможны также и следующие конструкции пазовой изоляции:

1. Гильза из электрокартона толщиной 0,30 мм, склеенного с лакотканью толщиной 0,20 мм (нитроглифталевым лаком). Общая толщина пазовой изоляции с учетом скрепляющей бумаги в этом случае составляет $0,28 + 2 \cdot 0,55 = 1,38$ мм.

2. Гильза из электрокартона толщиной 0,3—0,4 мм, оклеенного с двух сторон синтетической пленкой толщиной 0,04—0,07 мм. Общая толщина изоляции в пазовой части при этом составит $0,28 + 2 \cdot 0,5 = 1,28$ мм.

Применение пленочной изоляции и в этом случае позволяет повысить влагостойкость и нагревостойкость.

Катушки перед укладкой в статор необходимо пропитывать в битумномасляном или еще лучше в крезольномасляном лаке. Соединения изолируются лакстканевой лентой (один-два слоя вполнахлеста) и слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста. Полностью обмотанный статор пропитывается в лаке.

Для машин с изоляцией класса В конструкция пазовой изоляции отличается от принятой для класса А наличием гибкого миканита толщиной 0,20 мм вместо лакоткани.

Возможно также применение микакартона или же стеклолакоткани толщиной 0,2 мм (вместо гибкого миканита) в сочетании с электрокартоном. Для скрепления полусекций в пазовой части и изолировки лобовых частей следует принять в этом случае стеклотенту. Когда перепрев статорной обмотки превосходит температуру, допустимую для класса В, необходимо применять стеклослюдяную изоляцию в сочетании с нагревостойкими лаками.

2,5. Изоляция статорных обмоток низковольтных машин с открытым пазом

У машин с изоляцией класса А в настоящее время применяется несколько конструкций изоляции, отличающихся друг от друга формой, примененными материалами и технологическим оформлением.

1. «Пазовая коробочка» (фиг. 2,22). При этой конструкции катушки, изолированные по всей длине хлопчатобумажной лентой (2) и предварительно пропитанные в лаке, вкладываются в пазы, изолированные пазовой коробочкой (1), обычно состоящей из электрокартона и лакоткани.

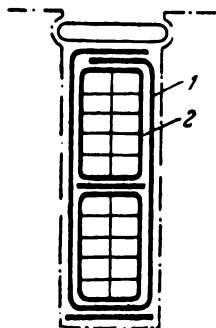
Возможны следующие основные варианты пазовой изоляции, вкладываемой в открытый паз до укладки катушек:

а) Катушка в пазовой и в лобовой частях изолируется хлопчатобумажной лентой вполнахлеста и затем пропитывается в лаке (один или несколько раз). В паз вставляется коро-

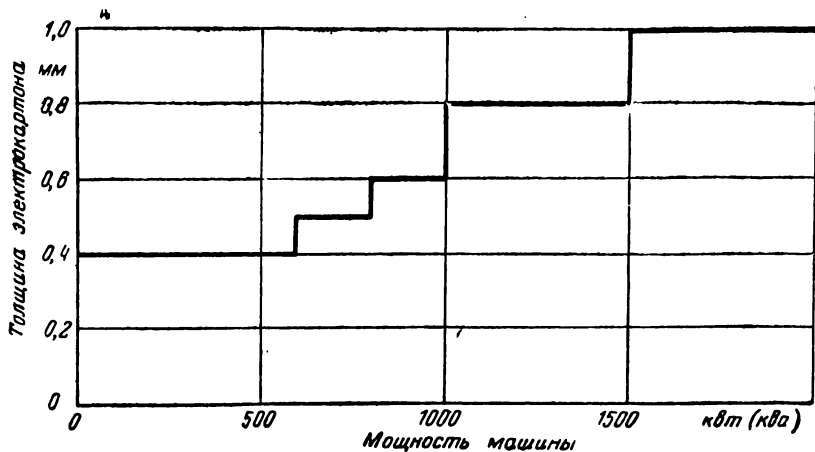
бочка из высококачественного промасленного электрокартона, толщина которого берется в зависимости от габаритов машин.

На фиг. 2,23 приведена зависимость толщины электрокартона от мощности машины.

б) Катушка скрепляется в пазовой части хлопчатобумажной лентой 1 впритык или вразбежку (лобовые части катушек изолируются лентой вполнахлеста) и затем пропитывается в лаке. В паз вставляется коробочка 2 из электрокартона толщиной 0,2—0,3 мм, затем вкладка из лакоткани 3 толщиной 0,15—0,20 мм, вырезанная по диагонали, и, наконец, вставка из электрокартона 2 толщиной 0,1—0,2 мм (фиг. 2,24). Назначение электрокартона и в данном случае сводится к механической защите основной изоляции пазы — лакоткани — и облегчению укладки катушек в пазы (внутренняя вставка). Изоляцией между катушками в пазовой части служит полоска 5 из электрокартона толщиной 0,5—1,5 мм. Под клином и на дне пазы укладываются полоски 4 и 6 из электрокартона.



Фиг. 2,22.



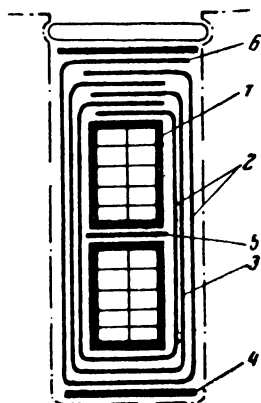
Фиг. 2,23.

в) Катушка, скрепленная в пазовой части лентой (вразбежку или вполнахлеста), пропитывается в лаке. В паз перед укладкой вставляется коробочка из электрокартона, склеенного с диагональной лакотканью.

К преимуществам этой конструкции следует отнести отсутствие воздушных прослоек в изоляции.

г) Используя в качестве основной изоляции синтетическую пленку в сочетании с электрокартоном, можно получить про-

стую и вместе с тем высококачественную изоляцию. Пазовая коробочка в этом случае изготавливается из композиционного материала — пленкокартона.



Фиг. 2, 24.

Изоляция лобовых частей во всех описанных конструкциях осуществляется пропитанной хлопчатобумажной лентой вполнахлеста. Лобовые части междуфазовых катушек дополнительно изолируются лакотканевой лентой.

Основными недостатками рассмотренных выше типов изоляции являются:

1. Невозможность контроля электрической прочности пазовой изоляции до укладки катушек в пазы машины.

2. Необходимость изолировки пазы в процессе укладки катушек в пазы статора.

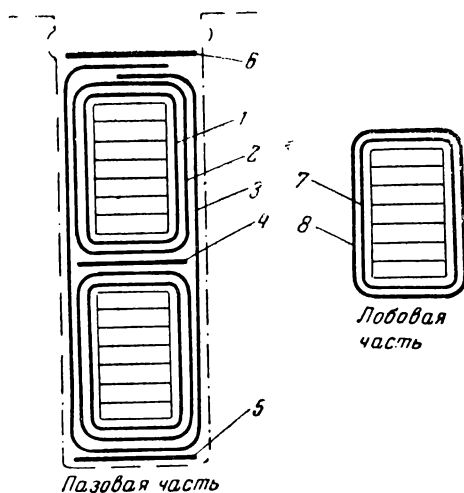
3. Вероятность значительных повреждений изоляции при укладке катушек в пазы.

Рассмотренный тип изоляции можно рекомендовать только для машин нормального исполнения мощностью до 100 квт.

2. «Мягкая гильза». В этой конструкции основной изоляцией

в пазовой части обычно служит лакоткань, которой обертываются прямые части катушек. Сверху для механической защиты лакоткани статорные катушки обматываются хлопчатобумажной лентой: в пазовой части впритык, в лобовой части вполнахлеста.

В лобовой части катушки обычно имеют изоляцию, состоящую из пропитанной хлопчатобумажной ленты. Иногда применяют дополнительную изоляцию уголков или же всей лобовой части одним слоем лакотканевой ленты



Фиг. 2, 25.

толщиной 0,15—0,2 мм вполнахлеста.

Полностью изолированные статорные катушки подвергаются однократной, а иногда и двукратной (для машин с влагостойкой изоляцией) пропитке в электроизолирующих лаках (типа 458 или 447).

Конструкция изоляции статорных катушек машин переменного тока напряжением до 500 в (вкл.), имеющих мягкую изоляцию из лакоткани, показана на фиг. 2,25, а соответствующие толщины изоляции даны в табл. 2,8.

Таблица 2,8

Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Общая толщина изо- ляции в мм	
			по шири- не паза	по высо- те паза
Пазовая часть				
Лакоткань	0,20	2 1/2	1,00	0,80×2
Хлопчатобумажная лента .	0,20	1 слой в притык	0,40	0,40×2
Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,20	0,20×2
Электрокартон пропитан- ный	0,20	1	0,40	0,60
Электрокартон пропитан- ный	0,50	1	—	0,50
Электрокартон пропитан- ный	0,30	1	—	0,30
Электрокартон пропитан- ный	0,30	1	—	0,30
Суммарная толщина изоляции в пазовой ча- сти (без витковой) . . .	—	—	2,00	4,50
Лобовая часть				
Лакотканевая лента . . .	0,20	1 слой вполна- хлеста	0,80	0,80
Хлопчатобумажная лента	0,20	То же	0,80	0,80
Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
Суммарная толщина изоляции в лобовой ча- сти (без витковой) . . .	—	—	2,10	2,10

Пробивное напряжение статорных катушек, изолированных в пазовой части 2 1/2 оборотами лакоткани, составляет —15 кв и выше в зависимости от качества лакоткани.

В последнее время в описанной конструкции вместо лакоткани применяется синтетическая пленка из триацетат- или етобутиратцеллюлозы. При этом пазовая часть катушки эртывается композиционным материалом, состоящим из

пленки, склеенной с электрокартоном 0,1 мм или же кабельной бумагой; лобовая часть изолируется одним слоем синтоленты вполнахлеста. Сверху катушка обматывается хлопчатобумажной лентой и пропитывается в лаке.

Применение синтетической пленки в виде синтофолия взамен лакоткани позволяет повысить влагостойкость и нагревостойкость изоляции.

Следует отметить, что доброкачественная обертка пазовых частей статорных катушек лакотканью или композиционным материалом из синтетической пленки технологически удобна при длине прямой части катушки до 400 мм.

Этот тип изоляции является наиболее простым и вместе с тем достаточно надежным, а поэтому его следует рекомендовать для самого широкого применения в проектируемых, а также ремонтируемых машинах с изоляцией класса А.

3. «Непрерывная изоляция». В этом случае статорные катушки машин напряжением до 500 в (вкл.) изолируются по всей длине двумя слоями лакотканевой ленты толщиной 0,15—0,20 мм. Сверху накладывается хлопчатобумажная лента для скрепления и механической защиты лакотканевой ленты: в пазовой части впрытык, в лобовой — вполнахлеста. Полностью изолированные катушки пропитываются в электроизолирующем лаке (типа 458 или 447). Двухсторонняя толщина изоляции катушек в пазовой части при этом достигает 2,2 мм по ширине. Возможно также применение синтоленты вместо лакотканевой ленты, что позволяет получить более тонкую и вместе с тем более нагревостойкую и влагостойкую изоляцию.

Следует отметить, что электрическая прочность изоляции катушки, выполненной из двух слоев лаколенты толщиной 0,20 мм вполнахлеста, ниже, чем у этой же катушки, изолированной 2½ оборотами лакоткани толщиной 0,20 мм. Кроме того, изолировка статорных катушек лаколентой более трудоемка, чем обертывание их лакотканью.

В машинах с изоляцией класса В и в машинах с влагостойкой изоляцией в настоящее время применяются четыре основных конструкции пазовой изоляции.

1. «Пазовая коробочка». В этом случае возможны следующие варианты пазовой изоляции:

а) Вкладка из гибкого миканита, расположенная между двумя слоями электрокартона. Прокладка между катушками в пазу, также из миканита.

б) Микакартон для пазовой коробочки и прокладок между катушками.

в) Электрокартон, склеенный со стеклолакотканью, для пазовой коробочки и прокладок между катушками. Преимущество последнего варианта — отсутствие остродефицитной слюды.

В качестве скрепляющей (в пазовых частях) и изолирующей

щей (в лобовых частях) ленты для изоляции класса В лучше всего применять стеклотенту, толщиной 0,1 мм. Этот тип изоляции можно рекомендовать только для машин нормального исполнения с изоляцией класса В и мощностью до 100 квт.

2. «Твердая гильза». Отличительной особенностью этой конструкции изоляции является наличие твердой опрессованной микафолиевой гильзы на прямой части статорных катушек. Лобовые части катушек машин с изоляцией класса В изолируются микалентой или же заменяющей ее стеклолаколентой, а затем скрепляющей лентой (хлопчатобумажной или стеклянной в зависимости от температуры обмотки в лобовой части).

Конструкция изоляции статорных катушек машин напряжением до 550 в, класса В, с твердой микафолиевой гильзой, показана на фиг. 2,26, а размеры изоляции приведены в табл. 2,9.

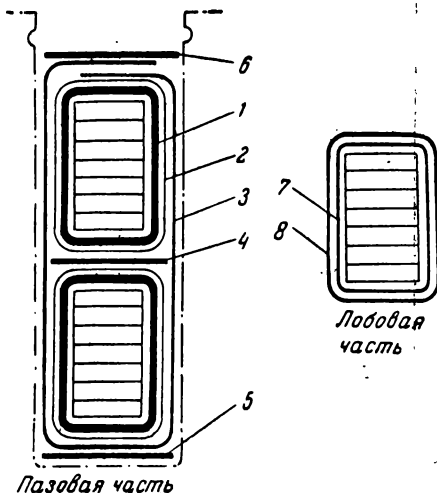
Пробивное напряжение микафолиевой изоляции в пазовой части при $2\frac{1}{2}$ оборотах микафолия толщиной 0,20 мм составляет в среднем 13—18 кв. После укладки катушек в машину пробивное напряжение микафолиевой гильзы снижается до 6,5—8,0 кв.

К недостаткам твердой микафолиевой гильзы следует отнести:

а) Хрупкость микафолиевой гильзы, поэтому она сравнительно легко надламывается при укладке катушек, особенно при укладке последнего шага.

б) Необходимость в специальном технологическом оборудовании, потребном для изготовления высококачественной микафолиевой гильзы (обкаточные станки, прессы, прессформы и др.). Этих недостатков не имеет мягкая гильза.

3. «Мягкая гильза». При данном типе изоляции пазовая часть статорных катушек машин переменного тока напряжением до 550 в обертывается $1\frac{1}{2}$ или $2\frac{1}{2}$ оборотами гибкого миканита с подложками (с перехлестом на широкой стороне). Сверху гильза скрепляется хлопчатобумажной лентой впристык. Лобовые части при этом изолируются микалентой и хлопчатобумажной лентой или стеклотентой в зависимости от величины перегрева лобовых частей обмотки.



Фиг. 2,26.

Таблица 2,9

Ссылка на фиг. 2,2,	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по ширине	по высоте
Пазовая часть					
1	Микафоллий МФ или ММ .	0,2	2 1/2	1,00	1,00×2
2	Телефонная бумага лаки- рованная	0,07	1 1/2	0,21	0,21×2
3	Электрокартон пропитан- ный	0,20	1	0,40	0,60
4	Миканит	0,5	1	—	0,50
5	Миканит (или электрокар- тон)	0,5	1	—	0,50
6	Миканит (или электрокар- тон)	0,5	1	—	0,50
Суммарная толщина изоляции в пазовой ча- сти (без витковой) . . .		—	—	1,61	4,52
Лобовая часть					
7	Микалента ЛЧФ или ЛЧМ	0,15	1 слой вполна- хлеста	0,60	0,60
8	Хлопчатобумажная лента .	0,20	То же	0,80	0,80
—	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
Суммарная толщина катушки в лобовой ча- сти (без витковой) . . .		—	—	1,90	1,90

Конструкция изоляции статорных катушек машин напряжением до 550 в с мягкой миканитовой гильзой показана на фиг. 2,25, а размеры изоляции даны табл. 2,10.

Пробивное напряжение мягкой гильзы (при 2 1/2 оборотах гибкого миканита толщиной 0,20 мм) составляет в среднем 16—20 кв. После укладки статорных катушек с мягкой гильзой в пазы пробивное напряжение снижается до 7—9 кв.

Следует отметить, что мягкая гильза может быть применена только для катушек с длиной пазовой части до 300—400 мм, так как при большей длине трудно обеспечить плотную и равномерную обертку пазовой части катушек гибким миканитом. Для того, чтобы установить преимущества и недостатки мягкой и твердой гильзы для катушек машин напря-

Таблица 2,10

Ссылка на фиг. 2,25	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по ширине	по высоте
Пазовая часть					
1	Гибкий миканит ГМО или ГФО	0,20	2 1/2 оборота	1,00	1,00×2
2	Хлопчатобумажная лента .	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40×2
—	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,20	0,20×2
3	Электрокартон пропитан- ный	0,20	1	0,40	0,60
4	Миканит	0,50	1	—	0,50
5	Миканит (или электрокар- тон)	0,5	1	—	0,50
6	Миканит (или электрокар- тон)	0,50	1	—	0,50
Суммарная толщина изоляции в пазовой ча- сти (без витковой) . . .		—	—	2,00	5,30
Лобовая часть					
7	Микалента ЛЧФ или ЛЧМ	0,15	1 слой вполна- хлеста	0,60	0,60
8	Хлопчатобумажная лента .	0,20	То же	0,80	0,80
—	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
Суммарная толщина изоляции в лобовой ча- сти (без витковой) . . .		—	—	1,90	1,90

жением до 550 в нами были проведены их сравнительные испытания, основные результаты которых приводим в табл. 2,11.

Производя сравнение мягкой и твердой гильзы, можно сделать следующие выводы:

а) Толщина изоляции у катушек с твердой и мягкой гильзой практически одинакова.

б) Электрическая прочность у катушек после их укладки в машину с мягкой гильзой несколько выше, чем у твердой.

в) Влагостойкость катушек с мягкой и твердой гильзой практически одинакова.

Таблица 2,11

№ п.п.	Наименование испытаний	Твердая мика- фоневая гильза	Мягкая гиль- за из гибкого миканита
1	Двухсторонняя толщина основной изо- ляции в мм	1,3—1,5	1,4—1,55
2	Пробивные напряжения пазовой части в нормальном состоянии в кв	11,5—17,3	19,3—20
3	Пробивное напряжение в кв пазовой части после перегиба пазовой части ка- тушки на цилиндре диаметром 80 мм . .	Ломается	11,1—11,5
4	Пробивное напряжение катушек после их укладки в машину в кв	5,0—7,8	6,6—8,5
5	Сопротивление изоляции собранной ма- шины в мгом:		
	а) Непосредственно после сборки . . .	1 800	1 000
	б) После 200 час. выдержки машин в 95—98%-ной относительной влажно- сти	0,31	0,32
6	Укладка катушек в машину	Имеют ме- сто повреж- дения изо- ляции	Поврежден- ной изоля- ции не было

г) Твердая гильза не эластична и легко повреждается при изгибах. Мягкая гильза даже после перегиба на цилиндре диаметром 60 мм имеет около 60% от пробивного напряжения в нормальном состоянии.

д) Стоимость изготовления катушки с твердой гильзой примерно на 2% выше, чем с мягкой.

е) Производственная площадь при изготовлении катушек с твердой гильзой должна быть больше, так как для миканизации необходимо наличие нагревательных печей.

Таким образом, мягкая гильза имеет все преимущества по сравнению с твердой.

Поэтому для машин, у которых длина пазовой части не превосходит 300—400 мм, следует рекомендовать применение мягкой гильзы.

4. «Непрерывная изоляция». Статорные катушки изолируются по всей длине двумя слоями микаленты толщиной 0,13 мм или 0,15 мм вполнахлеста, а затем хлопчатобумажной лентой: в пазовой части вполнахлеста, в лобовой — впритык. Полностью изолированные катушки пропитываются в компаунде. Толщина изоляции статорных катушек машин напряжением до 550 в при их изолировке микалентой толщиной 0,13 мм приведена в табл. 2,12.

Пробивное напряжение микалентной изоляции при двух слоях микаленты несколько ниже, чем у твердой или мягкой,

Таблица 2,12

Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
			по ширине	по высоте
Пазовая часть				
Микалента ЛЧМ или ЛЧФ . .	0,13	2	1,04	1,04 × 2
Пропитка в компаунде и раз- бухание	—	—	0,36	0,36 × 2
Хлопчатобумажная лента . . .	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
Электрокартон	0,20	1	0,40	0,60
Миканит (между катушками)	0,50	1	—	0,50
Миканит (или электрокартон)	0,50	1	—	0,50
Миканит (или электрокартон)	0,50	1	—	0,50
Суммарная толщина изо- ляции в пазовой части (без витковой изоляции)	—	—	2,20	5,70
Лобовая часть				
Микалента ЛЧМ или ЛЧФ . .	0,13	1 слой вполна- хлеста	1,04	1,04
Пропитка в лаке и разбухание	—	—	0,46	0,46
Хлопчатобумажная лента . . .	0,20	То же	0,80	0,80
Суммарная толщина изо- ляции катушки в лобовой части (без витковой изо- ляции)	—	—	2,30	2,30

гильзы, при той же толщине изоляции. Так, у катушки, изолированной двумя слоями микаленты, пробивное напряжение составляет в среднем 8—10 кв. После укладки катушек в пазы пробивное напряжение снижается до 5—8 кв.

К недостаткам микалентной изоляции статорных катушек низковольтных машин следует отнести большую трудоемкость процесса наложения микалентной изоляции по сравнению с мягкой и даже твердой гильзой. Вместе с тем этот тип изоляции имеет и преимущества, к которым следует отнести хорошую эластичность, а также высокую влагостойкость и теплопроводность. Этот тип изоляции следует рекомендовать для машин с влагостойкой изоляцией.

Получение более нагревостойким исполнением статорных катушек по сравнению с классом изоляции В может быть достигнуто:

1) уменьшением содержания органических волокнистых материалов и максимальной их заменой асбестовыми и стекловолокнистыми материалами;

2) применением специальных нагревостойких клеящих, пропиточных и покровных лаков (например, глифталевых, модифицированных стеариновыми кислотами, кремнийорганических и т. п.).

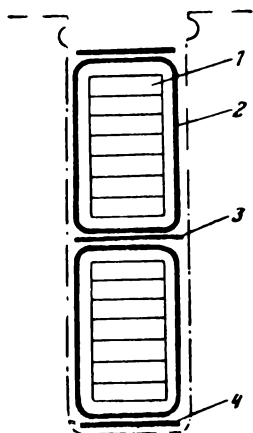
Для перегревов до 100°C (изоляция класса ВС) пазовая часть статорных катушек может быть изолирована микабумагой (на глифталевом модифицированном лаке), которая сверху скрепляется асбестовой или же стеклянной лентой впритык. Лобовая часть изолируется одним слоем светлой микаленты (на глифталевом лаке) вполнахлеста и слоем асбестовой или же стеклянной ленты вполнахлеста. Изолированные таким образом статорные катушки пропитываются в глифталевом модифицированном лаке и покрываются пигментированной нагревостойкой эмалью.

Возможно также применение и непрерывной микалентной изоляции, пропитанной в нагревостойких лаках. При этом статорные катушки изолируются по всей длине двумя слоями светлой микаленты (на глифталевом лаке) вполнахлеста и затем асбестовой или стеклянной лентой: в пазовой части впритык, в лобовой — вполнахлеста.

Изолированные катушки пропитываются в нагревостойком лаке или покрываются нагревостойкой пигментированной эмалью.

При перегревах выше 100°C необходимо применение специальной изоляции, не содержащей органических волокнистых материалов.

Примером нагревостойкой изоляции статорных катушек, которая допускает перегревы до 140°C (длительно), может служить конструкция изоляции, разработанная и предложенная автором совместно с С. В. Цукерником (фиг. 2,27). В этой конструкции статорная катушка, изготовленная из прямоугольного провода марки ПСД (1), изолируется по всей длине двумя слоями стекломикаленты 2 на теплостойком глифталево-м лаке и затем покрывается пигментированной нагревостойкой эмалью. Прокладки 3 и 4 из миканита. Этот тип изоляции с успехом был применен на ХЭМЗ для изготовления опытных электродвигателей типа МА-145-2/4 и МА-191/3. Характеристики статорных катушек электродвигателя МА-191/3, изолиро-



Фиг. 2,27.

ванных двумя слоями стеклослюдяной ленты, приведены в табл. 2,13.

Таблица 2,13

Наименование характеристик	В какой части катушки подвергалась испытанию	Данные испытаний (средние значения)
Толщина двухсторонней изоляции в мм	В пазовой части	2,2—2,3
Пробивное напряжение в кВ:		
а) В нормальном состоянии	а) В пазовой части	14,2—16,4
	б) В лобовой части	9,6—18,8
б) При температуре 250°C	а) В пазовой части	13,6—16,0
	б) В лобовой части	10,0—16,0
в) После 100 час. выдержки в термостате при 250°C	а) В пазовой части	8,5—9,6
	б) В лобовой части	8,4—8,6
г) После 20 суток выдержки в атмосфере с 95—98%-ной относительной влажностью	а) В пазовой части	8,0—15,0
	б) В лобовой части	6,0—13,0

После 100-часовой выдержки статорных катушек в термостате при 250° С стеклоизоляция обладала достаточно хорошей механической прочностью. После укладки изолированных катушек в статор производилось заклинивание пазов теплоустойчивыми клиньями из асбобакелита. Под клинья прокладывались миканитовые полоски. Намотанные статоры испытывались напряжением, равным 4 кВ, в течение 1 мин.

Для проверки нагревостойкости изоляции электродвигатель МА-191/3 был нагрет до 250° С и выдержан при этой температуре 10 суток и затем испытан напряжением в 2 000 в, которое он выдержал без признаков пробоя. Сравнительные данные испытаний электродвигателей серии МА-140 напряжением 380 в с изоляцией класса В, а также со стеклослюдяной изоляцией (класс СВ), приведены в табл. 2,14.

Таблица 2,14

Тип машины	Тип изоляции	Полезная мощность в кВт	Скорость вращения в об/мин	Перегрев обмотки в °С (по сопротивл.)	Коэффициент полезного действия в %	cos φ	Общий вес машины в кг
МА-145-3/4	Класс В	53	1 475	84	90,3	0,88	565
МА-145-3/4	Стеглослюдяная	75,3	1 470	115	90,4	0,88	565
МА-145-3/4	— „ —	82	1 470	140	90,2	0,885	565
МА-146-1/6	Класс В	72	1 485	85	91,2	0,83	720

Когда необходима повышенная влагостойкость, для изоляции статорных катушек следует применять непрерывную микалентную компаундированную изоляцию. Этот тип изоляции следует также применять и для тех случаев, когда машина

предназначается для работы в химических производствах, где изоляция может подвергаться воздействию химически активных реагентов (кислот, щелочей, хлора, аммиака и т. п.). В этом случае можно также рекомендовать изолировку статорных катушек стекломикалентой на битумных или глифта-левых лаках с последующей компаундировкой. В качестве верхней покровной ленты следует применять стеклоленту.

Рекомендации по выбору изоляции статорных катушек машин переменного тока напряжением до 550 в с открытым пазом.

1. Для машин нормального исполнения класса А мощностью до 100 квт следует применять «пазовую коробочку» из электрокартона в сочетании с лакотканью или синтетической пленкой.

2. Для машин с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения при длине пакетов статора до 300—400 мм следует применять «мягкую гильзу» из гибкого миканита (ГФО или ГМО).

3. Для машин с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения при длине пакетов статора больше 300—400 мм следует рекомендовать применение «твердой микафолиевой гильзы».

4. Для машин, предназначенных для работы в атмосфере с очень высокой влажностью, а также в атмосфере, содержащей активные химические реагенты, следует применять микалентную «непрерывную компаундированную изоляцию».

5. Для машин с очень тяжелыми условиями работы (частые перегрузки, пуски и реверсы), а также для машин, работающих при повышенной окружающей температуре (до 100°С и выше), следует применять стеклослюдяную изоляцию на специальных нагревостойких лаках (глифта-левых, кремнийорганических).

2.6. Общие требования к изоляции высоковольтных машин переменного тока

В высоковольтных машинах переменного тока изоляция обмоток относительно корпуса подвергается комплексному воздействию электрического поля, нагрева, механических усилий, озона, а также в некоторых случаях влаги, пыли, химических реагентов и др.

Стремление конструктора к максимальному использованию активной зоны машины заставляет применять в высоковольтных машинах возможно малую толщину изоляции обмотки. С другой стороны, желание электромашиностроительных заводов обеспечить достаточные запасы электрической прочности изоляции вызывает необходимость применения повышенных испытательных напряжений, достигающих для обмоток, еще

не уложенных в машину, трех- четырехкратного от рабочего. При этом напряженности электрического поля достигают высоких значений. Так, изоляция катушек напряжением 11,0 кВ испытывается до укладки в машину напряжением, равным 37,25 кВ. При толщине миканитовой изоляции 3,7 мм напряженность электрического поля (при одноминутном испытании) достигает при этом почти 100 кВ/см. Эта повышенная надежность вызвана тем, что изоляция статорных обмоток в условиях эксплуатации подвергается воздействию кратковременных перенапряжений коммутационного или атмосферного характера, в некоторых случаях доходящих до 3,5-кратного от рабочего. Поэтому к диэлектрическим свойствам изоляции высоковольтных машин переменного тока предъявляются повышенные требования, причем эти свойства не должны ухудшаться при длительном воздействии рабочего напряжения, нагрева и влаги. Наряду с высокой электрической прочностью изоляция высоковольтных машин должна иметь малые диэлектрические потери при рабочих напряжениях и температурах. Наличие повышенных диэлектрических потерь в изоляции обмоток электрических машин напряжением 6 кВ и выше приводит к дополнительному нагреву изоляции, что будет способствовать ускоренному старению изоляции и ее преждевременному выходу из строя.

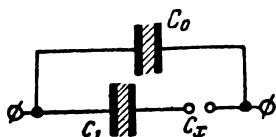
Поскольку диэлектрические потери играют весьма существенную роль в машинной изоляции, рассмотрим механизм этих потерь и их зависимость от различных факторов. Если миканитовая изоляция, представляющая собой композицию, состоящую из слюды, бумаги и связующего, монолитна и не имеет в своей толще воздушных или газовых включений, то величина тангенса угла диэлектрических потерь, определяемая потерями в составных компонентах, а также их количественным соотношением, практически не зависит от напряжения (кривая 1 на фиг. 5,29). При наличии в миканитовой изоляции воздушных и газовых включений зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения будет иметь более сложный характер (кривая 2 на фиг. 5,29).

Резкое возрастание $\operatorname{tg} \delta$ при повышенных напряжениях указывает на появление в изоляции дополнительных потерь, величина которых может значительно превосходить основные потери в диэлектрике.

В настоящее время можно считать установленным, что увеличение $\operatorname{tg} \delta$ при превышении определенной величины приложенного напряжения происходит благодаря ионизации внутренних воздушных и газовых включений. Поэтому напряжение при котором наблюдается резкое увеличение $\operatorname{tg} \delta$, называется ионизационным напряжением (напряжение $U_{\text{и}}$ на фиг. 5,29).

Механизм явлений, происходящих в воздушных и газовых

включениях при напряжениях, вышших ионизационного, представляется в следующем виде. При определенной величине напряжения, приложенного к миканитовой изоляции, происходит пробой воздушных и газовых включений, и в момент про-



Фиг. 2, 28.

бою электростатическая энергия поля превращается в тепло, повышая потери в изоляции. Одновременно с этим под влиянием ионизации происходит образование озона и окислов азота в воздушных включениях. Пробои воздушных включений происходят периодически определенное

число раз в секунду, вследствие чего повышаются средние потери, а также $\lg \delta$, их характеризующий.

Для большой наглядности представим себе схему замещения диэлектрика, содержащего воздушный промежуток (фиг. 2, 28). В любой момент времени существует соотношение

$$U = U_1 + U_x, \quad (2,13)$$

где U — общее приложенное напряжение;

U_1 — напряжение на емкости C_1 , имитирующей собою монолитную часть диэлектрика;

U_x — напряжение на воздушном промежутке, имеющем емкость C_x .

Кроме того,

$$U_1 C_1 = U_x C_x. \quad (2,14)$$

Откуда

$$U_x = \frac{U}{1 + \frac{C_x}{C_1}} = \frac{U_1 C_1}{C_x} \quad (2,15)$$

и

$$U_1 = \frac{U}{1 + \frac{C_1}{C_x}} = \frac{U_x C_x}{C_1}. \quad (2,16)$$

Если обозначить напряжение, при котором пробивается воздушный промежуток, через U_{np} , а амплитудное значение приложенного напряжения через U_m , то можно показать, что при $\frac{C_x}{C_1} > \frac{U_m - U_{np}}{U_m}$ пробоя воздушного промежутка не произойдет;

при $2 \left(U_{np} + U_{np} \frac{C_x}{C_1} \right) > U_m > U_{np} + U_{np} \frac{C_x}{C_1}$ произойдет четыре пробоя за период; при $4 U_m > U_{np} \left(1 + \frac{C_x}{C_1} \right) > 2 U_m$ пробой произойдет восемь раз за период и т. д.

Итак, при соответствующих напряжении U и соотношении C_1 и C_x будет происходить только 4, 8, 16 и т. д. пробоев за период. Зная число пробоев, происходящих в единицу времени в воздушном промежутке, можно подсчитать мощность, выделяющуюся в воздушном промежутке. Эта энергия будет равна:

$$P_k = \frac{E^3 k n S_x \omega}{16 \pi^2}, \quad (2,27)$$

где E — электрическая прочность воздушного промежутка;
 k — толщина воздушного промежутка;
 S_x — площадь воздушного промежутка;
 n — число пробоев за период;
 ω — круговая частота переменного тока.

Общие потери в диэлектрике, содержащем воздушные включения, выразятся следующей формулой:

$$P = U^2 C_0 \omega \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{E^3 S_x k n \omega}{16 \pi^2}, \quad (2,28)$$

где $\operatorname{tg} \delta_0$ и C_0 — соответственно тангенс угла диэлектрических потерь и емкость этого же образца, но не содержащего воздушных включений.

В реальных условиях явления, происходящие в миканитовой изоляции, содержащей воздушные включения разных размеров, будут значительно сложнее, однако общий характер явлений будет подобен описанному выше.

Высоким требованиям к диэлектрическим свойствам полностью удовлетворяет только миканитовая монолитная изоляция, которая в настоящее время и применяется для изоляции высоковольтных машин. Однако для более низких напряжений (до 3300 в включительно) возможно применение и таких материалов, как черная высококачественная лакоткань (на битумномасляном лаке) и синтетические пленки из триацетат- или ацетобутиратцеллюлозы.

Изоляция статорной обмотки подвергается также длительному воздействию нагрева, величина которого устанавливается в зависимости от нагревостойкости примененных для изоляции обмотки изоляционных материалов, т. е. от их класса.

При рабочих температурах не должно наблюдаться вытекания пропитывающих и связующих составов и происходить ухудшений диэлектрических, а также механических свойств изоляции, снижающих нормальный срок службы машины.

Изоляция обмоток при их изолировке, компаундировке, транспортировке, укладке в пазы статора, а также при работе машины, подвергается воздействию значительных механических усилий, которые могут понижать электрическую

прочность изоляции. Особенно высокие механические напряжения возникают в изоляции турбогенераторов. В этом случае могут существовать следующие основные причины, вызывающие механические усилия в изоляции статорной обмотки:

1. Разное расширение меди обмотки, изоляции и стали статора, возникающее при нагреве обмотки и ее охлаждении из-за неодинаковых температурных коэффициентов расширения, а также разных температур нагрева по длине и ширине паза. Так, нагрев статорного стержня, имеющего длину 5 м, до 100° С вызовет разницу в удлинении меди обмотки и миканитовой изоляции, достигающую 2,5 мм. При этом неизбежно появление значительных механических напряжений в пазовой изоляции стержня. Попеременный нагрев и охлаждение длинных обмоток при недостаточной эластичности и механической прочности изоляции вызовет образование складок и трещин в изоляции, которые будут пробиты при перенапряжениях или даже при рабочем напряжении машины.

2. Вибрация отдельных витков статорной обмотки, вызываемая электромагнитными воздействиями, а также механической вибрацией статора.

Так, поперечный магнитный поток в пазу статора подвергает проводники воздействию радиальной переменной силы, направленной ко дну паза. Притяжение между параллельными проводами вызывает сжатие изоляции. Расчет показывает, что даже при номинальных токах в верхней части стержня турбогенератора возникают динамические силы, достигающие нескольких килограмм, аналогичные ударам молотка, ударяющего по изоляции 100 раз в секунду. При коротких замыканиях эти силы могут достигать значительных величин. Наличие хрупкой, механически непрочной изоляции статорной обмотки в этом случае недопустимо, так как она быстро разрушится и превратится в порошок, что приведет в конечном счете к пробое изоляции.

3. Электродинамические воздействия, возникающие в лобовых частях при нормальной работе, а также при внезапных коротких замыканиях. Величина этих воздействий на изоляцию в мощных турбогенераторах, работающих на общую сеть, может оказаться весьма значительной.

Следовательно, изоляция обмоток высоковольтных машин и особенно турбогенераторов должна обладать высокой механической прочностью, а также эластичностью.

В изоляции высоковольтных машин напряжением выше 6 000 в возможно образование озона и окислов азота как во внутренних воздушных прослойках, так и в зазоре между обмоткой и пазом, в местах выхода изоляции из паза, и в лобовых частях. Поэтому изоляция электрических машин напряжением выше 6 000 в должна быть достаточно озоностойкой и не ухудшать своих диэлектрических и механических свойств

при длительном воздействии на нее продуктов короны. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяет непрерывная микалентная компаундированная изоляция.

К изоляции высоковольтных машин, работающих в помещениях с повышенной влажностью, предъявляется дополнительное требование — высокая влагостойкость. В некоторых особых случаях изоляция электрических машин может подвергаться воздействию химически активных реагентов, что вызывает необходимость применения специальной химически стойкой изоляции.

2.7. Гильзовая изоляция протяжных статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока

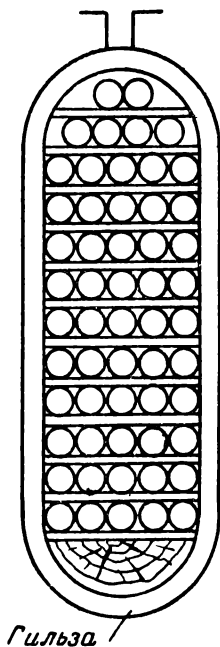
В старых конструкциях машин с полузакрытым пазом и протяжной (катушечной) обмоткой применялась твердая микафолиевая гильза. Поскольку такие машины до настоящего

Таблица 2,15

Рабочее напряжение машины в в	Толщина микафолиевой гильзы в мм
От 1 000 до 2 000 . .	1,50
От 2 001 до 3 000 . .	2,00
От 3 001 до 3 300 . .	2,00
От 3 301 до 5 200 . .	2,50
От 5 201 до 6 600 вкл.	2,5—3,0

Таблица 2,16

Рабочее напряжение машины в в	Толщина миканитовой прокладки в мм
От 1 000 до 2 000 . .	0,5
От 2 001 до 3 300 . .	1,0
От 3 301 до 5 200 . .	1,5
От 5 201 до 6 600 . .	2,0



Фиг. 2,29.

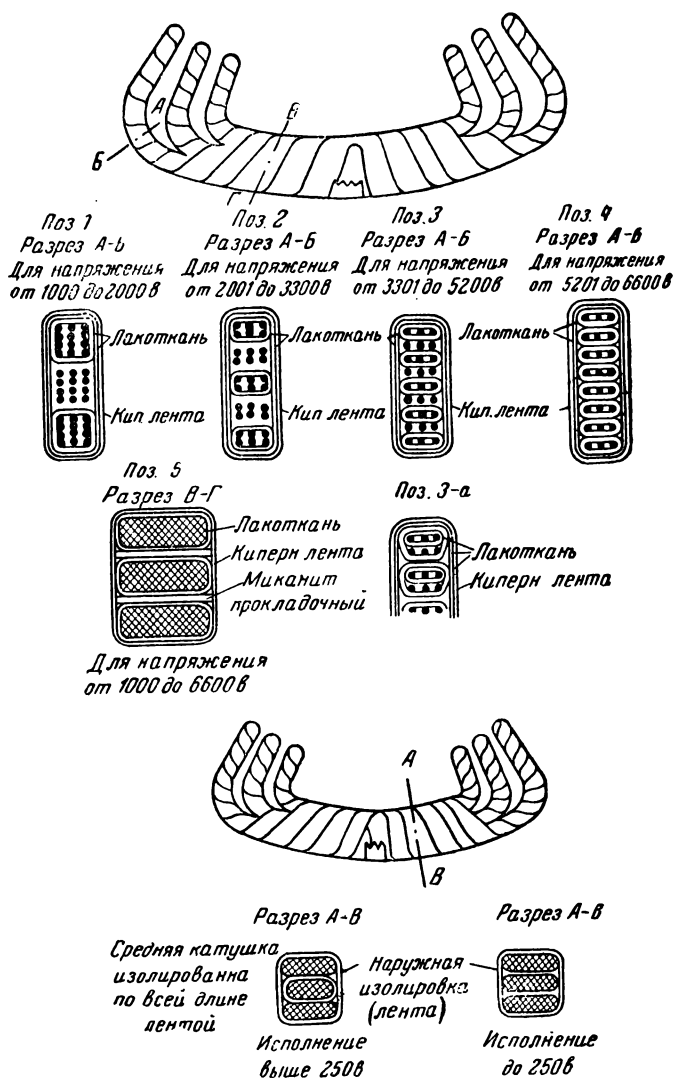
времени все еще находятся в эксплуатации и их приходится ремонтировать, остановимся вкратце и на этом типе изоляции.

Пазовая изоляция высоковольтных машин, обмотка которых протягивается через пазы, состоит из микафолиевых вставных гильз (фиг. 2,29).

В табл. 2,15 приведены толщины микафолиевых вставных гильз для различных номинальных напряжений машин.

Конструкция изоляции протяжной катушечной обмотки в лобовой части показана на фиг. 2,30.

Отдельные катушки в группе изолируются сначала лако-



Фиг. 2,30.

тканевой лентой вполнахлеста, по всей длине от одной пазной гильзы до другой, а затем хлопчатобумажной лентой вполнахлеста от стали статора до окончания кривой части катушки.

При этом число слоев лакотканевой ленты составляет для рабочих напряжений:

от 1 000 до 3 000 в — 1 слой,
от 3 301 до 6 600 в — 2 слоя.

Между изолированными лакотканевой и хлопчатобумажной лентами группами катушек устанавливаются прокладки из миканита, толщина которых соответствует данным табл. 2,16.

В средней части все группы катушек одной фазы изолируются одним слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста. Соединения между катушками группы изолируются лакотканевой лентой: для напряжений от 1 000 до 3 000 в одним слоем вполнахлеста, от 3 001 до 6 600 в двумя или тремя слоями вполнахлеста.

Изоляция межгрупповых соединений состоит из лакотканевой и хлопчатобумажной лент, число слоев которых указано в табл. 2,17.

Таблица 2,17

Рабочее напряжение машины в в	Число слоев в полнахлеста	
	лакотканевой ленты	хлопчатобу- мажной ленты
От 1 000 до 2 000 . . .	2	2
От 2 001 до 3 000 . . .	3	1
От 3 001 до 3 300 . . .	4	1
От 3 301 до 5 200 . . .	5	1
От 5 201 до 6 600 вкл.	6	1

Отдельные группы скрепляются между собой при помощи веревочного бандаж.

Изоляционные минимальные расстояния (в мм) между отдельными обмотками, а также между обмоткой и корпусом (фиг. 2,31), приведены в табл. 2,18.

Таблица 2,18

Рабочее напряжение машины в в	А	Б	В	Е	Д
От 1 001 до 2 001 . . .	14	12	6	5	—
2 001 до 3 000 . . .	16	14	8	5	3
3 001 до 3 300 . . .	18	16	8	5	3
3 301 до 4 500 . . .	18	18	9	5	3
4 501 до 5 200 . . .	25	20	10	5	3
5 201 до 6 300 . . .	30	23	10	5	5
6 301 до 6 600 вкл.	35	25	10	5	5

К недостаткам протяжных статорных обмоток высоковольтных машин относятся:

1. Низкие значения электрической прочности междувитковой изоляции из-за повреждения изоляции обмоточного провода при многократной протяжке.

2. Повреждения гильзы при ее вставлении в пазы, а также при протяжке проводов обмотки, что приводит к снижению

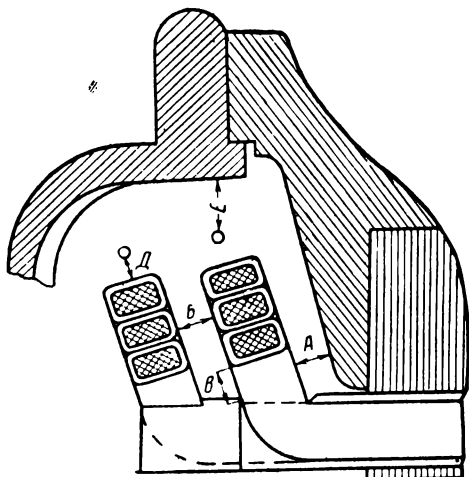
электрической прочности изоляции относительно корпуса.

3. Внутреннее коронирование обмотки при напряжениях 6 000—6 600 в и выше.

4. Малая озоностойкость витковой и основной микафолиевой изоляции.

Все это, а также ряд других существенных недостатков, привело к переходу на другие более современные типы изоляции статорных обмоток — на изоляцию, непосредственно накладываемую

на формованные, шаблонные катушки, которые укладываются в машины после их полной изолировки и испытания повышенным напряжением.



Фиг. 2,31.

2.8. Гильзовая изоляция шаблонных статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока (для открытого паза)

При гильзовой изоляции пазовые и лобовые части катушек (секций), полукатушек или стержней изолируются различно. В пазовой части изоляция относительно корпуса представляет собой гильзу, состоящую из нескольких слоев плотно спрессованного микафолия. Основная изоляция в лобовой части в этом случае обычно состоит из нескольких слоев лаколенты. Благодаря наличию твердой микафолиевой гильзы в пазовой части обмотки этот тип изоляции и получил название «гильзовой».

Для защиты микафолиевой изоляции от механических повреждений сверху накладывается слой тонкого летероида или плотного электрокартона или же несколько слоев изоляционной бумаги (телефонной, кабельной или намоточной).

Изоляция в лобовых частях защищается и скрепляется слоем хлопчатобумажной ленты. Этот тип изоляции иногда называется «европейским».

Толщина микафолиевой гильзы определяется в основном рабочим напряжением обмотки, а также другими моментами (мощностью машины, длиной пазовой части, качеством гильзы и др.). Так, толщина микафолиевой гильзы у статорных обмоток турбогенераторов и крупных машин обычно берется несколько большей по сравнению с толщиной гильзы, принятой для машин средней мощности, при одном и том же рабочем напряжении. Это вызвано желанием обеспечить более высокие запасы электрической прочности изоляции относительно корпуса у более ответственных и дорогих машин, допуская в этом случае некоторое ухудшение коэффициента заполнения паза и несколько удорожая машину.

У очень длинных обмоток, в изоляции которых возникают повышенные механические напряжения как в процессе укладки обмотки, а также в условиях работы машины, также применяется микафолиевая гильза, имеющая несколько большую толщину, чем это принято для более коротких обмоток.

Следует также отметить, что конструкции гильзовой изоляции статорных обмоток высоковольтных машин, принятые на советских заводах, несколько отличаются от конструкций, применяемых заграничными заводами, при одних и тех же рабочих напряжениях.

В табл. 2,19 приведены значения односторонней толщины микафолиевой изоляции статорных обмоток высоковольтных машин и турбогенераторов, принятые на различных заводах.

Таблица 2,19

Наименование заводов	Односторонняя толщина гильзовой микафолиевой изоляции в мм		
	Рабочее напряжение 3 000 — 3 500 в	Рабочее напряжение 6 000 — 6 600 в	Рабочее напряжение 10 000 — 11 000 в
Электромашиностроительные заводы СССР (синхронные машины и турбогенераторы)	1,25 — 2,0	2,5 — 3,25	—
Заводы АЭГ (при разной длине пакетов статора)	1,0 — 2,15	1,6 — 2,85	2,6 — 4,0
Завод МВ, Англия (турбогенераторы)	2,54	3,05	4,83

Конструкция гильзовой изоляции статорных обмоток электрических машин переменного тока напряжением 3 000—6 600 в, принятая в СССР, приведена на фиг. 2,32, а соответствующие толщины изоляции в пазовой и лобовой частях даны в табл. 2,20 и 2,21.

Таблица 2,20

Рабочее напряжение 3000—3300 в. Класс изоляции А

Ссылка на фиг. 2,32	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщина изоляции в мм	
				по ши- рине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микафолый ММ	0,15 — 0,25	—	} 2,50	2 × 2,50
2	Бумага намоточная ла- кированная	0,10	2		
3	Электрокартон ЭВП	0,30	1	} 0,60	1,80
4	Электрокартон ЭВ (про- кладка на дне паза)	0,20	1		
5	Электрокартон листовой ЭВ (прокладка между ка- тушками)	1,50	1	—	1,50
6	Электрокартон листовой ЭВ (прокладка под кли- ном)	0,50	1	—	0,50
	Общая толщина изоляции (без витко- вой)	—	—	3,10	9,00
	Лобовая часть				
7	Лакотканевая лента (диагональная)	0,20	3 слоя впло- на-хлеста	2,40	2,40
8	Лента хлопчатобумаж- ная	0,20	1 слой впло- на-хлеста	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и раз- бухание	—	—	0,50	0,50
	Всего на катушку . .	—	—	3,70	3,70

Наиболее слабым местом гильзовой изоляции статорных катушек является место перехода от прямой части к лобовой, где имеется стык слюдяной изоляции с лакотканевой и на одном и том же месте катушки наложены изоляционные материалы разных классов. Это ослабленное место изоляции находится поблизости от статорного нажимного кольца и нажимных пальцев, т. е. в зоне искаженного электрического поля. Кроме того, уголки катушек подвергаются наиболее значительным механическим деформациям при их укладке в пазы машины, а также при электродинамических воздействиях, возникающих в лобовых частях обмотки.

Все это заставляет уделять особое внимание вопросам изоляции катушек в месте перехода гильзовой изоляции в лако-

Таблица 2,21

Рабочее напряжение 6 000 — 6 600 в. Класс изоляции А

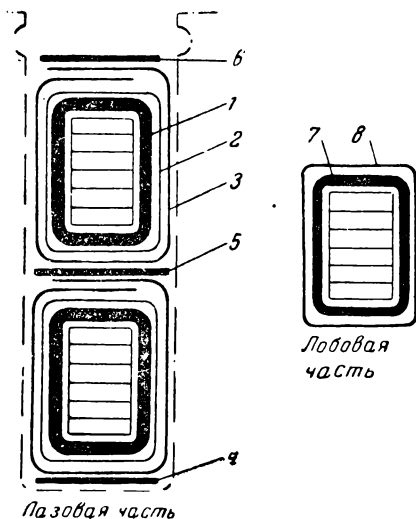
Ссылка на фиг. 2,33	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщина изоляции в мм	
				по ши- рине	по высоте
Пазовая часть					
1	Микафолый ММ	0,20 — 0,30	—	4,50	2 × 4,5
2	Бумага намоточная лаки- рованная	0,10	2		
3	Электрокартон ЭВП	0,30	1		
4	Электрокартон ЭВ (про- кладка на дне паза)	0,20	1	—	0,20
5	Электрокартон листовой ЭВ (прокладка между ка- тушками)	1,50	1	—	1,50
6	Электрокартон листовой ЭВ (прокладка под кли- ном)	0,50	1	—	0,50
Общая толщина изоляции (без витко- вой)		—	—	5,10	13,00
Лобовая часть					
7	Лакотканевая лента (диагональная)	0,20	5 слоев вполна- хлеста	4,00	4,00
8	Лента хлопчатобумаж- ная	0,20	1 слой вполна- хлеста	0,80	0,80
Пропитка в лаке и раз- бухание		—	—	1,00	1,00
Всего на катушку		—	—	5,80	5,80

тканевую и отдалять это место от стали статора для того, чтобы обеспечить достаточные запасы электрической прочности уложенных в машину катушек и исключить возможность перекрытия изоляции и ее пробоя в месте стыка.

В старых конструкциях применялся так называемый «прямой конус», при котором микафوليновая гильза 2 после опрессовки срезается на конус и затем производится изолировка лаколентой 3 уступами (фиг. 2,33). При этом способе даже при значительном удалении места перехода от стали статора 1 наблюдается перекрытие вдоль конуса при испытательных напряжениях.

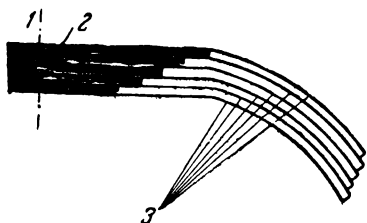
В современных конструкциях в статорных катушках высоковольтных машин с гильзовой изоляцией обычно применяется

«обратный конус» (фиг. 2,34), при котором конус из микаленты 3 вводится под гильзовую микафолиевую изоляцию 2. При этом способе изолировки микафолиевая гильза находит на слой микаленты в виде обратного конуса, что позволяет увеличить путь для поверхностных разрядов примерно в полтора раза при одном и том же расстоянии концы гильзы от стали статора 1. Кроме того, применение для изоляции уголков катушек микаленты позволяет сделать место перехода более однородным и отдалить неоднородность изоляции от стали статора. Однако применение обратного конуса и микалентной изоляции в месте перехода осложняет конструкцию изоляции и технологический процесс изолировки уголков, а также опрессовку перехода. Но даже при достаточно тщатель-

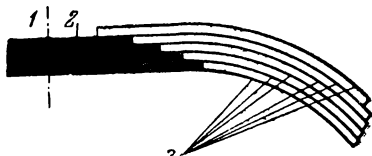


Фиг. 2,32.

ном технологическом выполнении изоляции в местах перехода микафолиевой гильзы к микалентной изоляции эта часть изоляции катушки оказывается более слабой, чем остальная, а поэтому приходится увеличивать вылет обмотки с тем, чтобы обеспечить необходимое расстояние от конца гильзы до стали.



Фиг. 2,33.



Фиг. 2,34.

Конструкция изоляции в месте перехода изоляции прямой части катушки в лобовую часть, принятая на советских электромашиностроительных заводах для статорных обмоток машин переменного тока напряжением 3 000—6 600 в, приведена на фиг. 2,35.

Число слоев изоляции на уголках и минимальные расстояния даны в табл. 2,22.

Таблица 2,22

Рабочее напряжение в в	Минимальные размеры в мм:			Число слоев изоляции		
	А	Б	В	Микалента	Лакоткань	Тафтяная лента (пропитанная)
3 000 — 3 300	35	15	10	3	1	1
6 000 — 6 600	60	25	15	5	1	1

Головки катушек изолируются так же, как и лобовые части. Конструкция изоляции выводных концов приведена на фиг. 2,36, а число слоев изоляции — в табл. 2,23.

Таблица 2,23

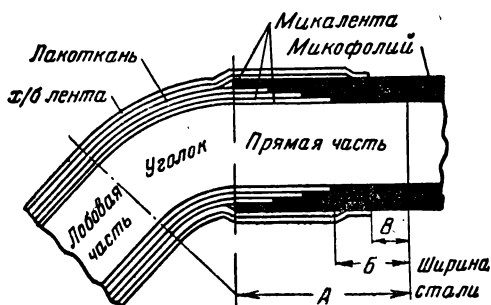
Рабочее напряжение машины в в	Размер А в мм	Число слоев изоляции		
		Микалента	Лакоткань 0,20 мм	Хлопчатобумажная лента
3 000 — 3 300	10	—	2	1
6 000 — 6 600	15	2	2	1

Изоляция выводных концов начинается на расстоянии от угла катушки, равном половине длины плеча. Каждый конец после изолировки закрепляется к катушке веревочным бандажом.

На фиг. 2,37 приведены толщины гильзовой микафолиевой изоляции статорных обмоток высоковольтных машин, принятые фирмой АЭГ. Из кривых фиг. 2,37 следует, что толщина микафолиевой гильзы у фирмы АЭГ определяется не только рабочим напряжением машины, но и длиной пакетов статора.

Лобовые части статорных катушек эта фирма изолирует светлой лакотентой вполнахлеста.

Число слоев лакотенты, накладываемой на лобовые части катушек, в зависимости от рабочего напряжения и расстояния лобовой части от стали приведено в табл. 2,24.

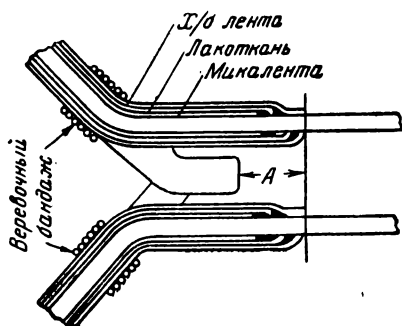


Фиг. 2,35.

Таблица 2,24

Расстояние лобовой части от стали в мм	Число слоев лаколенты для различных рабочих напряжений машины в в								
	1 500	1 500 — 3 000	3 000 — 4 500	4 500 — 6 000	6 000 — 7 500	7 500 — 9 000	9 000 — 10 500	10 500 — 12 000	12 000 — 13 500
	вполнахлеста						в две трети нахлеста		
5 — 9	1	3	4	4	4	4	4	4	4
10 — 14	1	2	3	3	3	3	3	3	3
15 — 19	—	1	2	2	2	3	3	3	3
20 — 24	—	1	1	2	2	2	2	2	2
25 — 29	—	—	1	1	2	2	2	2	2
30 — 34	—	—	—	1	1	2	2	2	2
35 — 39	—	—	—	1	1	1	1	2	2
40 — 44	—	—	—	—	1	1	1	1	1
45 — 49	—	—	—	—	—	1	1	1	1
50 — 59	—	—	—	—	—	—	1	1	1
60 — 69	—	—	—	—	—	—	—	1	1
70 — 79	—	—	—	—	—	—	—	—	1
80 — 89	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90									

Фирма АЭГ при переходе от гильзовой изоляции к изоляции лобовой части применяла обратный конус.



Фиг. 2,36.

Расстояния от конца микафолиевой гильзы до статора, нажимных пальцев и корпуса машины для разных рабочих напряжений указаны на фиг. 2,38 (по данным АЭГ).

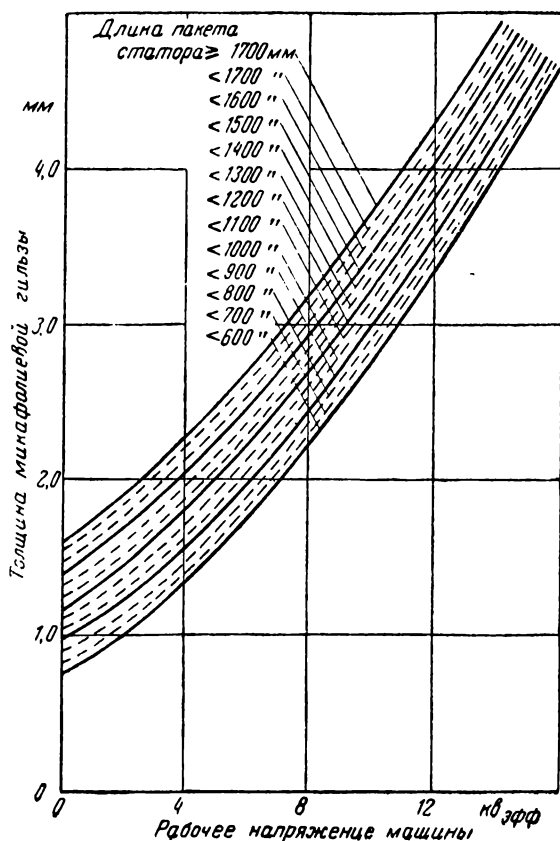
Английская фирма МВ (Метрополитен-Виккерс), до настоящего времени сохранившая в высоковольтных машинах переменного тока микафолиевую гильзу, применяет для турбо-

генераторов толщины микафолиевой изоляции, приведенные в табл. 2,25.

Эта фирма для изоляции лобовых частей высоковольтных машин применяет светлую лакотенту толщиной 0,18 мм. Число слоев лакотенты, накладываемой на лобовую часть вполнахлеста, дано в табл. 2,26.

У турбогенераторов фирмы МВ лобовые части обычно изолируются попеременно слоями микашелколенты толщиной 0,2 мм и лакотканевой ленты толщиной 0,15 мм. При этом каждый слой микаленты перед наложением следующего слоя

смазывается серой электроизоляционной эмалью. Поверх основной изоляции лобовых частей обмотки накладывается защитный слой хлопчатобумажной ленты вполнахлеста, который покрывается серой эмалью.



Фиг. 2,37.

Таблица 2,25

Рабочее напряжение в в	Односторонняя толщина гильзы в мм
601 — 2 500	2,28
2 501 — 3 600	2,54
3 601 — 5 000	3,05
5 001 — 6 600	3,05
6 601 — 9 000	3,81
9 001 — 11 000	4,83
11 001 — 13 000	5,60

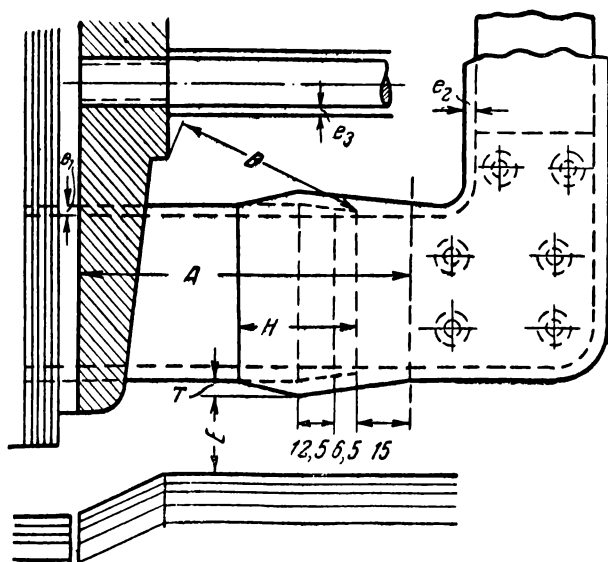
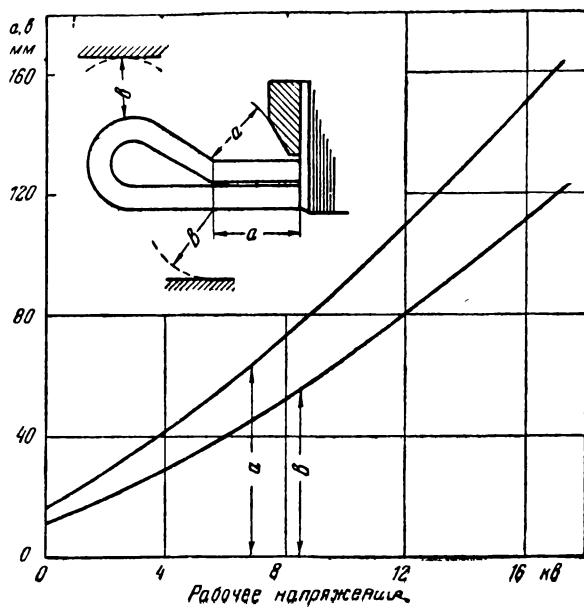


Таблица 2,26

Рабочее напряжение машины в в	Число слоев лакоеленты
0 — 2 500	2
2 501 — 3 600	3
3 601 — 5 000	4
5 001 — 6 600	5
6 601 — 9 000	7
9 001 — 11 000	8
11 001 — 13 000	10

Число слоев микашелковой и лакотканевой ленты, а также толщины основной изоляции в лобовых частях обмотки турбогенераторов МВ приведены в табл. 2,27.

Таблица 2,27

Наименование ленты	Число слоев при рабочем напряжении в в						
	601 — 2 500	2 501 — 3 600	3 601 — 5 000	5 001 — 6 600	6 601 — 9 000	9 001 — 11 000	11 001 — 13 000
Микашелковая . . .	1	2	3	4	4	5	6
Лакотканевая . . .	1	1	2	2	3	4	5
Односторонняя тол- щина изоляции в мм . .	1,8	2,3	3,2	3,8	4,1	4,7	5,9

Фирма МВ применяет в месте перехода гильзы в изоляцию лобовой части прямой конус. Наименьшие допускаемые расстояния (в мм) в лобовых частях обмотки турбогенераторов (фиг. 2,39) приведены в табл. 2,28.

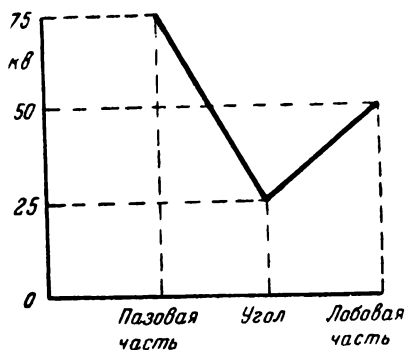
Таблица 2,28

Рабочее напряжение в в	A	B	E	H	T	I ₃
601 — 2 500	58	15	10	25	0,75	1,6
2 501 — 3 600	75	20	10	32	1,0	2,4
3 601 — 5 000	95	32	12,5	45	1,5	3,2
5 001 — 6 600	110	38	15	50	1,8	3,2
6 601 — 9 000	120	45	20	55	2,15	4,0
9 001 — 11 000	140	50	25	70	2,45	4,0
11 001 — 13 000	165	58	32	76	2,65	4,8

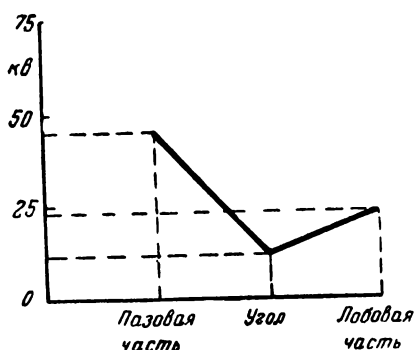
2,9. Основные характеристики гильзовой изоляции статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока

Электрическая прочность. Наличие различной изоляции по длине обмотки при гильзовой изоляции приводит к тому, что и электрическая прочность оказывается различной в прямой части, на уголках и в лобовых частях.

На фиг. 2,40 приведены значения электрической прочности изоляции полукатушек турбогенератора на рабочее напряжение 6 600 в в разных местах. Катушки турбогенератора имеют опрессованную микафолиевую гильзу на прямой части толщиной 3,25 мм на сторону. Уголок полукатушки изолирован четырьмя слоями микаленты толщиной 0,15 мм вполнахлеста в виде конуса и одним слоем микаленты поверх гильзы. Лобовые части имеют составную изоляцию, состоящую из четырех слоев микаленты толщиной 0,15 мм вполнахлеста, трех слоев лаколенты 0,2 мм вполнахлеста и одного слоя тафтяной ленты вполнахлеста.



Фиг. 2,40.



Фиг. 2,41.

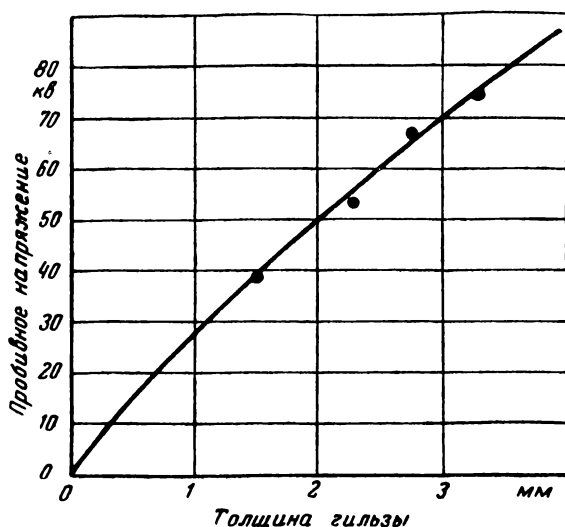
Значения электрической прочности изоляции катушки асинхронного двигателя на рабочее напряжение 6 000 в приведены на фиг. 2,41.

Эти статорные катушки имеют в прямой части микафолиевую гильзу толщиной 2,3 мм. Углы катушек изолированы в виде конуса тремя слоями лаколенты толщиной 0,2 мм вполнахлеста. Лобовая часть также имеет три слоя лаколенты. На самом углу с перекрытием на гильзу наложен еще один слой лаколенты. Место перехода и лобовая часть катушек сверху изолированы одним слоем тафтяной ленты вполнахлеста и покрыты битумным лаком.

Приведенные значения электрической прочности обмоток с гильзовой изоляцией наглядно показывают наличие большой разницы значений пробивных напряжений в разных частях катушки. Так, на углу полукатушек турбогенератора пробивное напряжение в 3 раза меньше, чем на прямой части, и в 2 раза меньше, чем на лобовой части. Пробивное напряжение на углу катушки асинхронного двигателя в 4 раза меньше, чем на прямой части.

На фиг. 2,42 приведены значения пробивных напряжений гильзовой изоляции в зависимости от толщины при температуре 20° С для катушек с хорошо выполненной гильзой.

Следует отметить, что электрическая прочность микафолиевой гильзы зависит от качества микафолия, а также технологии изготовления гильзы (особенно опрессовки). Для



Фиг. 2,42.

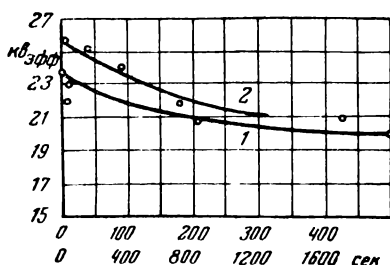
плохо изготовленных гильз значения пробивных напряжений значительно ниже приведенных. Значения пробивных напряжений изоляции уголков и лобовых частей при температурах 20 и 105° С даны в табл. 2,29.

Таблица 2,29

Тип обмотки	Рабочее напряжение в кВ	Температура в °С	Пробивное напряжение в кВ	
			Уголок	Лобовая часть
Полукатушки турбогенератора	6,6	20	27	50
	6,6	105	25	26
Катушки гидрогенератора	6,6	20	30,5	42,9
	6,6	105	26,8	37,2
Катушки синхронного генератора	3,15	20	7,2	8,5
	3,15	105	6,0	7,0

Из данных, приведенных в табл. 2,29, можно сделать вывод, что уменьшение электрической прочности лакотканевой изоляции в лобовых частях обмоток при нагревании до 105° С достигает 50%, т. е. значительно больше, чем у микафолиевой изоляции, для которой это уменьшение обычно не превосходит 10—15%.

Наличие значительных диэлектрических потерь в микафолиевой изоляции вызывает заметное уменьшение электрической прочности во времени, что следует из фиг. 2,43, где приведена зависимость пробивного напряжения от времени для

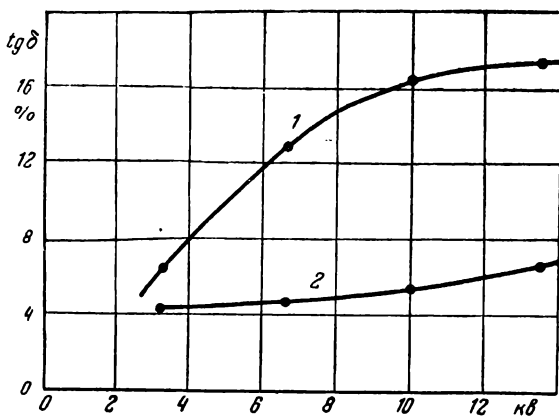


Фиг. 2,43.

изоляции из микафолия на мусковите при температуре 20°С (кривая 2, масштаб нижний) и температуре 105° (кривая 1, масштаб верхний).

Диэлектрические потери. Диэлектрические потери в микафолиевой гильзе зависят от качества микафолия, а также от технологии изготовления гильзы.

На фиг. 2,44 приведены кривые, характеризующие величину диэлектрических потерь при различных напряжениях и температуре 20°С для гильз, изготовленных из микафолия различными методами (кривая 1 при ручном, кривая 2 при машинном обмотывании). Из этих кривых следует, что только применение обкаточных станков, обеспечивающих постепенное уплотнение отдельных слоев микафолия при медлен-

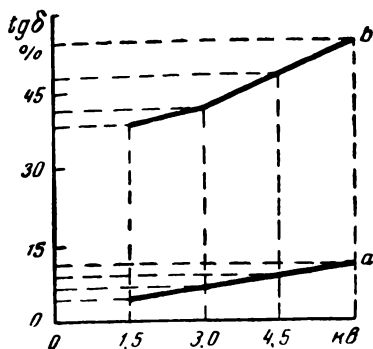


Фиг. 2,44.

ной и равномерной сушке, дает возможность получить высококачественную микафолиевую гильзу с малыми диэлектрическими потерями. Однако даже у катушек, имеющих вполне доброкачественную микафолиевую гильзу, величина диэлектрических потерь сильно увеличивается при нагреве до 90—

105° С (см. фиг. 2,45, где кривая *a* относится к 20° С, а кривая *b* — к температуре 90° С).

Значительный рост диэлектрических потерь в гильзе, изготовленной из микафолия на шеллаке, вызывается главным



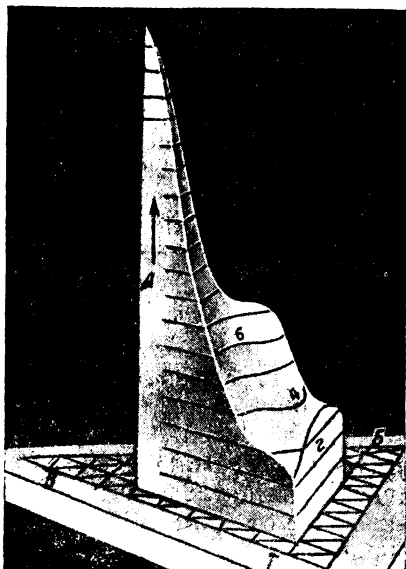
Фиг. 2,45.

образом разбуханием гильзы при нагреве, а также значительным ростом $\text{tg } \delta$ у шеллака при нагревании.

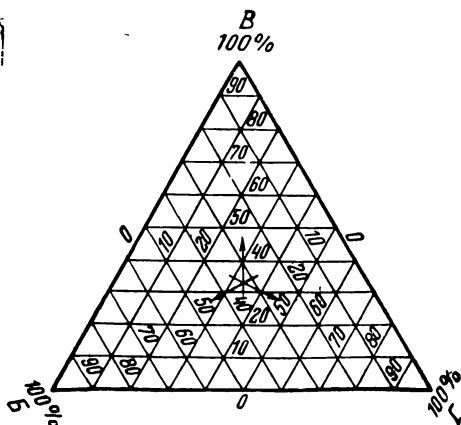
Улучшение диэлектрических потерь в гильзе при нагреве может быть достигнуто только путем замены шеллака другим лучшим лаком.

Величина диэлектрических потерь в микафолиевой изоляции зависит также от количественного соотношения слюды, шеллака и бумаги.

На фиг. 2,46 приведены характеристики микафолиевой изоляции в виде трехмерной диаграммы, где по оси ординат (*A*) отложены потери в ваттах на 1 дм^3 при напряженности в 10 кВ/см, а на основании — процентное содержание слюды (*Г*), шеллака (*В*) и бумаги (*Б*) согласно фиг. 2,47.



Фиг. 2,46.

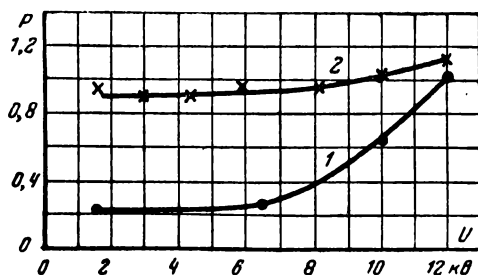


Фиг. 2,47.

Из фиг. 2,46 следует, что с уменьшением содержания шеллака в микафолиевой изоляции удельные диэлектрические потери уменьшаются. Однако при малом содержании шеллака наблюдается большая зависимость потерь от напряжения и температуры благодаря наличию неизбежных воздушных включений, которые, ионизируясь при сравнительно невысоких напряжениях, вызывают значительный рост диэлектрических потерь.

На фиг. 2,48, где показана зависимость удельных диэлектрических потерь в микафолиевой изоляции с различным содержанием шеллака от напряжения (1 — шеллака 14%; 2 — шеллака 62%), следует, что при малом количестве шеллака (14%) и напряжениях выше 6 кВ наблюдается значительный рост удельных потерь. Удельные диэлектрические потери в микафолиевой изоляции, содержащей 62% шеллака, хотя по абсолютной величине и несколько выше, чем у изоляции, содержащей 14% шеллака, но при изменении напряжения от 2 до 12 кВ не показывают заметного роста.

При повышенной температуре ионизация воздушных включений облегчается, а поэтому и диэлектрические потери растут значительно круче, чем при нормальной температуре, особенно если в шеллаке имеются остатки спирта и влаги. Зависимость диэлектрических потерь микафолиевой изоляции на шеллаке от времени выдерживания обмотки под напряжением при нормальной температуре приведена на фиг. 2,49 (по Гольдман). Из этой кривой следует, что вначале диэлектрик разогревается и диэлектрические потери в нем растут до тех пор, пока не устанавливается тепловое равновесие. При даль-



Фиг. 2,48.

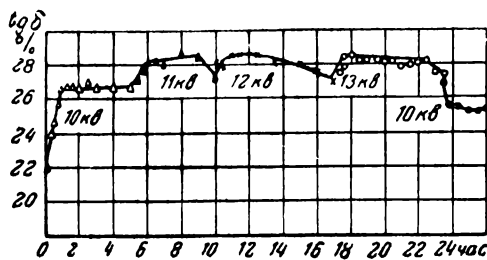
нейшем повышении напряжения нагрев изоляции увеличивается и потери несколько возрастают. Однако при длительном нагреве микафолиевой изоляции в электрическом поле остатки растворителя улетучиваются, изоляция высыхает и ее характери-

сти даже несколько улучшаются ($\operatorname{tg} \delta$ уменьшается).

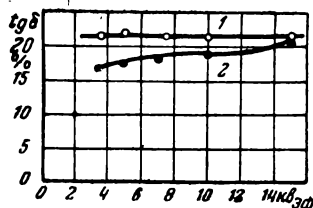
На фиг. 2,50 приведена в виде кривых зависимость удельных диэлектрических потерь от напряжения для микафолиевой изоляции стержней, подвергавшихся (кривая 2) и не подвергавшихся (кривая 1) воздействию напряжения (по Гольдман). Из этих кривых следует, что у образца 2 после воздей-

ствия на него электрического поля появилась характерная зависимость $\lg \delta$ от напряжения, указывающая на образование в микафолиевой изоляции воздушных включений.

Установлено, что шеллак при длительном воздействии на него короны разлагается, а поэтому микафолиевая изоляция, содержащая воздушные включения, подвержена значительному электрическому старению. При этом, наряду с химическими изменениями в органической части изоляции, разряды могут вызвать обугливание шеллака и бумаги, а также образовать механические повреждения (трещины), которые в конечном счете понижают электрическую прочность изоляции. Эти повреждения, прогрессируя во времени, могут привести к значительному разрушению микафолиевой изоляции и даже ее пробую.



Фиг. 2, 49.



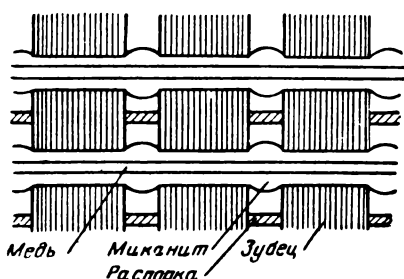
Фиг. 2, 50.

Нагревостойкость. Обычно полагают, что наличие в лобовых частях высоковольтных обмоток лакотканевой изоляции снижает общий класс изоляции машины до класса А, несмотря на то, что микафолиевая изоляция обмотки в пазовых частях относится к классу В. Однако европейские фирмы для гильзовой микафолиевой изоляции обмоток, имеющих витковую изоляцию класса В, допускают перегревы, соответствующие классу В, даже при наличии в лобовых частях лакоткани. Такой тип смешанной изоляции допустим только при сильном охлаждении лобовых частей обмоток.

Специально проведенные исследования нагревостойкости микафолиевой гильзы, а также эксплуатационный опыт, показывают, что даже удовлетворительно изготовленная гильза чувствительна к нагреву. Так, при нагреве катушек обмотки асинхронного двигателя до 50—60° С размер микафолиевой гильзы увеличился по ширине на 4,5 мм, а по высоте — на 1,5—2,0 мм. Разбухание гильзовой изоляции при нагреве исключает возможность подогрева изоляции катушек при укладке и вынуждает вести укладку обмотки в пазы в холодном виде, что вызывает нарушение монолитности изоляции, а иногда и излом гильзы.

В условиях эксплуатации разбухание микафолиевой гильзы приводит к образованию вздутий в вентиляционных каналах, как это показано на фиг. 2,51. При этом затрудняются тепловые перемещения изоляции обмотки, так как гильза оказывается зафиксированной в вентиляционных каналах разбухшими зонами. Это иногда приводит к надрывам и порезам изоляции.

Некоторые заграничные фирмы (например МВ), чтобы избежать выпучивания гильз в вентиляционные каналы, вынуждены применять специальные распорки в районе зубцов. Но даже при принятии специальных мер, предотвращающих разбухание гильзы в вентиляционных каналах, все же трудно



Фиг. 2,51.

добиться полного отсутствия разбухания гильзы, помещенной в паз машины, из-за наличия укладочного зазора (до 0,4 мм) и отрицательных допусков на размеры микафолиевой гильзы.

Отрицательное влияние на свойства высоковольтной изоляции даже небольших местных разбуханий уже указывалось выше и сво-

дится в основном к повышению диэлектрических потерь, местным дополнительным нагревам изоляции, форсированному старению, ухудшению теплопроводности и в конечном счете приводит к сокращению нормального срока службы изоляции в условиях эксплуатации.

При повышенных перегревах обмоток неизбежно усиленное тепловое старение лакотканевой изоляции в лобовых частях, что также может служить причиной преждевременного выхода машины из строя. Имеющийся эксплуатационный опыт показывает, что в ряде случаев крупные аварии машин и преждевременный выход из строя высоковольтных машин и турбогенераторов происходит из-за теплового и электрического старения гильзовой микафолиевой изоляции.

Влагостойкость. Электрические машины, имеющие гильзовую изоляцию обмоток, обладают сравнительно невысокой влагостойкостью, так как их изоляция быстро снижает свои диэлектрические свойства при воздействии влаги. Невысокая влагостойкость гильзовой изоляции вызывается наличием микроскопических неплотностей в гильзе, в которые легко засасывается влага, а также наличием достаточно большого числа слоев гигроскопической бумаги. Кроме того, шеллак, особенно в незапеченном состоянии, обладает заметной гигроскопичностью.

Озоностойкость. Наличие в микафолиевой гильзе

шеллака снижает озоностойкость изоляции. Специальные исследования, а также имеющийся эксплуатационный опыт, показывают, что при действии озона на микафолиевую гильзу наблюдается заметное ухудшение диэлектрических свойств этого вида изоляции и сокращение срока службы машины. Особенно сильно влияют на микафолиевую изоляцию внутренние очаги ионизации, возникающие в воздушных зазорах.

Старение изоляции. Как уже указывалось выше, шеллак, входящий в состав гильзовой изоляции, под влиянием повышенных температур и действия озона разлагается, что приводит к ухудшению диэлектрических и механических свойств микафолиевой изоляции, т. е. к ее старению; кроме того, шеллак, подвергаясь длительному воздействию повышенных температур (выше $70-80^{\circ}\text{C}$), со временем становится очень хрупким.

Этим объясняется постепенное разрушение (крошение) изоляции у машин с длиной стали статора более 2 м, т. е. там, где возникают значительные механические усилия в изоляции из-за значительной разности линейного расширения меди обмотки и миканитовой изоляции.

Вспухание микафолиевой изоляции, выполненной на шеллаке, и выкрашивание хрупкого шеллака способствуют образованию внутренних полостей, в которых происходит тихий разряд, форсирующий дальнейшее разрушение микафолиевой изоляции.

Практикой установлено, что в длинных машинах (турбогенераторах) напряжением 10—11 кВ после 60 000—80 000 час. работы микафолиевая изоляция на шеллаке бывает уже настолько разрушена, что пробивное напряжение ее падает почти до полусины, и такие машины целесообразно заблаговременно переизолировать, применив при этом более совершенную микалентную непрерывную изоляцию.

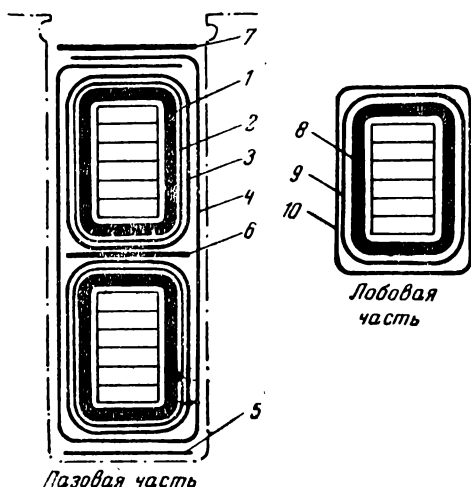
2,10. Непрерывная изоляция статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока

При непрерывной изоляции катушки, полукатушки и стержни изолируются по всей длине одним и тем же электроизолирующим материалом — изоляционной лентой.

Таким образом, при этом способе прямые и лобовые части обмоток имеют один и тот же тип изоляции, и поэтому отсутствуют переходы одного вида изоляции к другому, как это имеет место при гильзовой изоляции обмоток. Этот тип изоляции иногда называется «американским».

Непрерывная изоляция статорных обмоток высоковольтных машин относительно корпуса выполняется как по классу изоляции А, так и по классу В.

Непрерывная изоляция класса А. В этом случае статорные катушки, полукатушки и стержни изолируются по всей длине несколькими слоями лакотканевой ленты. Обычно для этого применяются ленты из черной высококачественной лакоткани толщиной 0,2—0,3 мм, обладающие более высокой озоностойкостью по сравнению со светлой.



Фиг. 2,52.

После наложения лакотканевой ленты на обмотку производится многократная пропитка в битумномасляном лаке типа 460. Применение многократной пропитки катушек, изолированных лакотканевыми лентами, повышает электрические характеристики, а также стабильность изоляции при высоких напряжениях.

Для скрепления и механической защиты лакотканевой изоляции катушки по всей длине

изолируются пропитанной в лаке хлопчатобумажной лентой. Число слоев лакотканевой ленты, накладываемой на катушку, зависит от рабочего напряжения машины, а также от веса катушки.

Конструкция непрерывной изоляции класса А статорных обмоток машин переменного тока напряжением 3 000—5 000 и 5 001—7 000 в приведена на фиг. 2,52, а толщины изоляции — в табл. 2,30 и 2,31.

Уголки катушек в этом случае имеют изоляцию, состоящую из трех слоев лакотканевой ленты, т. е. такую же, как и в пазовой части.

Уголки катушек в этом случае имеют такую же изоляцию, как и в пазовой части, т. е. четыре слоя лакотканевой ленты вполнахлеста.

Как показывает опыт, применение для изоляции катушек статорных обмоток машин напряжением до 3 300 в высококачественной черной лакоткани (на битумномасляном лаке) в сочетании с многократной пропиткой в битумномасляном лаке типа 460 позволяет получить вполне доброкачественную изоляцию класса А с достаточной электрической прочностью.

На фиг. 2,53 приведена кривая, характеризующая электрическую прочность изоляции относительно корпуса статор-

Таблица 2,30

Рабочее напряжение 3 001 — 5 000 в. Вес катушки не более 6 кг

Ссылка на фиг. 2,52	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двойная толщина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
Пазовая часть					
1	Лакотканевая лента черная	0,30	3 слоя вполна- хлеста	3,60	3,60 × 2
2	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
3	Шестикратная пропитка в битумномасляном лаке и допуск на разбухание . .	0,20	6	1,00	1,00 × 2
	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой вразбежку	0,40	0,40 × 2
	Двухкратное покрытие битумномасляным лаком типа 462-п	—	2	0,20	0,20 × 2
4	Электрокартон ЭВП . .	0,3	1	0,60	0,90
5	Электрокартон ЭВ . . .	0,3	1	—	0,30
6	Электрокартон ЭВ . . .	1,0	1	—	1,0
7	Электрокартон ЭВ . . .	0,5	1	—	0,5
Общая толщина изоля- ции в пазовой части (без витковой)		—	—	6,2	13,9
Лобовые части катушки					
8	Лакотканевая лента черная	0,3	2 слоя вполна- хлеста	2,40	2,40
9	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой вполна- хлеста	0,80	0,80
10	Шестикратная пропитка в битумномасляном лаке и разбухание	—	6	1,50	1,50
	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой враз- бежку	0,40	0,40
	Двухкратное покрытие лаком	—	2	0,20	0,20
Общая толщина изоля- ции в лобовых частях (без витковой)		—	—	5,30	5,30

ных катушек, изолированных черной лакотканевой лентой, на рабочее напряжение 3 000 в. Как видно из этой кривой, снижение электрической прочности катушек при переходе из прямой части в лобовую происходит без резкого скачка, что соответствует конструкции непрерывной изоляции.

Таблица 2,31

Рабочее напряжение 5 001 — 7 000 в. Вес катушки не более 15 кг

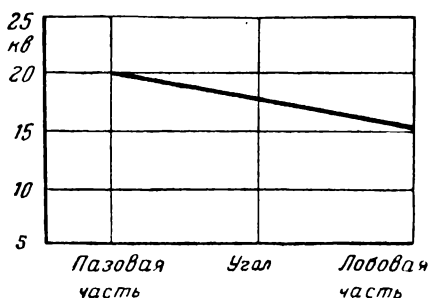
Ссылка на фиг. 2,52	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев изоляции	Двухсторонняя толщина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
Пазовая часть					
1	Лакотканевая лента черная	0,30	4 слоя вполна- хлеста	4,80	4,80 × 2
2	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
3	Шестикратная пропитка в битумномасляном лаке и разбухание	—	6	1,20	1,20 × 2
	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой враз- бежку	0,40	0,40 × 2
	Двухкратное покрытие лаком 462-п	—	2	0,20	0,20 × 2
4	Электрокартон ЭВП . .	0,30	1	0,60	0,90
5	Электрокартон ЭВ . . .	0,30	1	—	0,30
6	Электрокартон ЭВ . . .	1,0	1	—	1,0
7	Электрокартон ЭВ . . .	0,5	1	—	0,5
Общая толщина изоля- ции в пазовой части (без витковой),		—	—	7,60	16,70
Лобовые части катушек					
8	Лакотканевая лента черная	0,30	3 слоя вполна- хлеста	3,60	3,60
9	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой вполна- хлеста	0,80	0,80
10	Шестикратная пропитка в лаке и разбухание . . .	—	6	1,50	1,50
	Хлопчатобумажная лен- та	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40
	Двухкратное покрытие лаком 462-п	—	2	0,20	0,20
Общая толщина изоля- ции катушки в лобовых частях (без витковой) . .		—	—	6,50	6,50

Учитывая, что пазовая часть статорных катушек на рабочее напряжение 3 000 в испытывается до укладки напряжением 13,25 кВ, запас электрической прочности в данном случае достигает полуторакратного по отношению к испытательному и около 6,7-кратного по отношению к рабочему, что следует признать вполне достаточным.

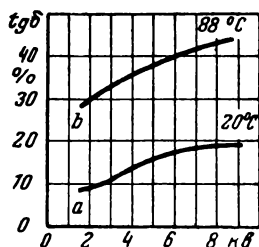
При применении для изолировки статорных обмоток обычных черных лакотканевых лент невозможно получить изоляцию с малыми диэлектрическими потерями, так как даже хорошие образцы черных лакотканей имеют относительно высокие потери, значительно большие, чем у миканитовой изоляции.

Значения $\operatorname{tg} \delta$ для статорных катушек напряжением 3 000—3 300 в, изолированных черной лакотканевой лентой, приведены на фиг. 2,54.

Имеющийся многолетний опыт по применению для статорных обмоток напряжением 3 000—3 300 в изоляции из высококачественной черной лакоткани показывает, что этот вид изоляции является вполне надежным и в ряде случаев, там,



Фиг. 2,53.



Фиг. 2,54.

где перегревы обмоток не выходят из пределов, допускаемых для изоляции класса А, может быть с успехом применен вместо более дорогой и дефицитной миканитовой изоляции.

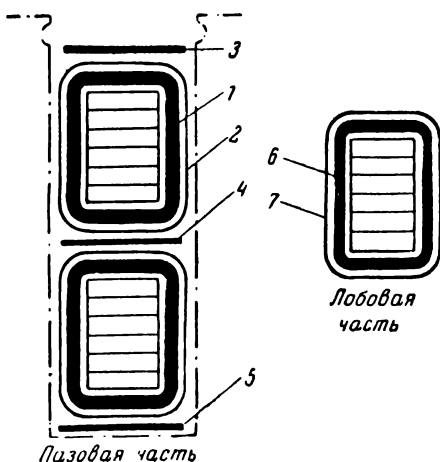
Недостатком непрерывной изоляции статорных обмоток высоковольтных машин, выполняемой из лакотканевых лент, является относительно большая толщина изоляции катушек в пазовых частях, что приводит к необходимости увеличивать общие размеры машины.

Однако, учитывая острую дефицитность слюды, в ряде случаев все же целесообразно применять изоляцию из черной лакоткани.

В последнее время для изоляции статорных катушек напряжением до 3 300 в с большим успехом применена непрерывная изоляция из синтетических пленок (триацетатных или ацетобутиратных), склеенных с микалентной бумагой (синтолента). При этом катушки после их полной изолировки подвергаются пропитке в битумном компаунде, что обеспечивает необходимую монолитность изоляции, а также хорошую влагостойкость и теплопроводность.

Имеются все основания полагать, что в ближайшее время пленочная изоляция полностью вытеснит миканитовую для статорных обмоток машин с изоляцией класса А напряжением до 3 300 в,

Непрерывная микалентная изоляция класса В. Катушки, полукатушки или стержни статорных обмоток электрических машин в этом случае изолируются непрерывно по всей длине несколькими слоями микаленты.



Фиг. 2,55.

Для механической защиты микалентной изоляции катушки изолируются слоем хлопчатобумажной ленты. Монолитность непрерывной микалентной изоляции обмоток достигается соответствующей компаундировкой полностью изолированных катушек (см. главу IV).

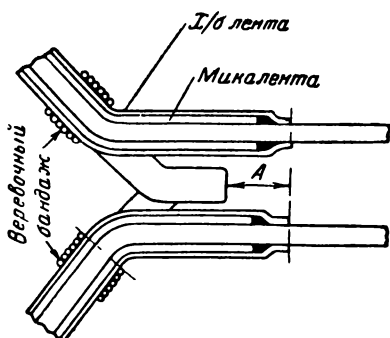
На фиг. 2,55 приведена конструкция непрерывной микалентной изоляции статорных обмоток синхрон-

ных и асинхронных машин с рабочим напряжением 3 000—6 600 в, а в табл. 2,32 и 2,33 соответственно даны толщины изоляции.

При применении более толстых микалент число слоев соответственно снижается. Расчетные размеры паза:

По ширине:

$B = \text{общее сечение меди} + \text{толщина витковой изоляции с допусками} + 3,70 \text{ мм} + \text{зазор на укладку } 0,20 \text{ мм.}$



Фиг. 2,56.

По высоте:

$H = \text{общее сечение меди} + \text{толщина витковой изоляции с допусками} + 9,9 \text{ мм} + \text{зазор на укладку } 0,3 \text{ мм.}$

Уголки катушек имеют то же число слоев микаленты 0,13 мм, что и прямые части. Головки (петли) изолируются тремя слоями микаленты вполнахлеста.

Конструкция изоляции выводных концов приведена на фиг. 2,56. Изоляция вы-

водных концов начинается на расстоянии, равном половине длины плеча от угла катушки.

Таблица 2,32

Рабочее напряжение 3 000—3 330 в. Нормальное исполнение

Ссылка на фиг. 2,55	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микалента ЛЧМ	0,13	5 впол- нахлеста	2,60	2,60 × 2
2	Допуск на компаундиро- вание и разбухание	—	—	0,70	0,70 × 2
	Лента хлопчатобумаж- ная	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
3	Электрокартон ЭВ	0,50	1	—	0,50
4	Электрокартон ЭВ	1,50	1	—	1,50
5	Электрокартон ЭВ	0,50	1	—	0,50
	Общая толщина изоля- ции в пазовой части (без витковой)	—	—	3,70	9,90
	Лобовая часть				
6	Микалента ЛЧМ	0,13	4 впол- нахлеста	2,08	2,08
	Допуск на компаундиро- вание и разбухание	—	—	1,52	1,52
7	Лента хлопчатобумаж- ная	0,20	1 слой вполнахлеста	0,80	0,80
	Общая толщина изоля- ции катушки в лобовой части (без витковой) . . .	—	—	3,40	3,40

Для машин, предназначенных для работы в тяжелых условиях, применяется усиленная изоляция, которая отличается от нормальной наличием дополнительного слоя микаленты. Толщина микалентной изоляции катушек в пазовой части в этом случае (с учетом разбухания) составляет около 4,0 мм. Для машин повышенной надежности (торф, водостлив и т. п.) изоляция усиливается еще одним слоем микаленты (общее число слоев микаленты в пазовой части 7). Толщина микалентной изоляции катушек этих машин в пазовой части достигает 4,60 мм.

При применении для изолировки катушек более толстых микалент число слоев микаленты в пазовой и лобовой частях соответственно снижается.

Расчетные размеры паза при напряжении 6 000—6 600 в.

По ширине:

$B =$ общее сечение меди по ширине + толщина витковой изоляции с допусками + 5,80 + зазор на укладку 0,20 мм.

Таблица 2,33

Рабочее напряжение 6 000—6 600 в. Нормальное исполнение

Ссылка на фиг. 2,55	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по шири- не паза	по высоте паза
Пазовая часть					
1	Микалента ЛЧМ	0,13	9 <small>вполне- хлеста</small>	4,68	$4,68 \times 2$
	Допуск на компундирование и разбухание	—	—	0,72	$0,72 \times 2$
2	Лента хлопчатобумажная . . .	0,20	1 <small>слой впритык</small>	0,40	$0,40 \times 2$
3	Электрокартон ЭВ	0,50	1	—	0,50
4	Электрокартон ЭВ	2,50	1	—	2,50
5	Электрокартон ЭВ	0,50	1	—	0,50
Общая толщина изоляции в па- зовой части (без витковой) . .		—	—	5,80	15,10
Лобовая часть					
6	Микалента ЛЧМ	0,13	8 <small>вполне- хлеста</small>	4,16	4,16
	Допуск на компаундирование и разбухание	—	—	1,34	1,34
7	Лента хлопчатобумажная . . .	0,20	1 <small>слой вполне- хлеста</small>	0,80	0,80
Общая толщина изоляции катуш- ки в лобовой части (без вит- ковой)		—	—	6,30	6,30

По толщине:

H = общее сечение меди по высоте + толщина витковой изоляции с допусками + 15,10 + зазор на укладку 0,30 мм.

Уголки катушек имеют то же число слоев микаленты 0,13 мм, что и прямые части. Головки катушек изолируются пятью слоями микаленты.

Для машин, предназначенных для тяжелых условий работы, применяется усиленная изоляция, при которой число слоев микаленты в пазовой части берется на один слой больше, чем для нормальной (по табл. 2,33).

Для машин повышенной надежности, предназначенных для работы в условиях повышенной влажности (торф, водотлив и т. п.), число слоев микаленты в пазовой части берется на два больше, чем для нормальной изоляции по табл. 2,33.

Для турбогенераторов и крупных гидрогенераторов число слоев микаленты увеличивается на 1—2 против табл. 2,33.

В табл. 2,34 указано число слоев микаленты толщиной 0,13 мм, которое необходимо применять для изоляции кату-

шек, полукатушек и стержней статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока напряжением от 3 000 до 18 000 в.

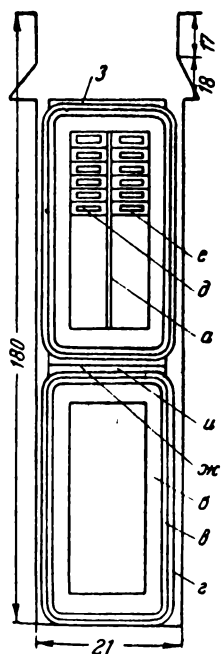
Таблица 2,34

Рабочее напряжение в в	Число слоев микаленты			Двойная толщина изоляции в пазовой части в мм	
	в пазовой части	в лобовой части	в головке	микалентной	общей
3 001 — 4 000	5	4	3	3,3	3,7
4 001 — 4 500	6	5	4	3,8	4,2
4 501 — 5 000	7	6	4	4,3	4,7
5 001 — 6 000	8	7	5	4,9	5,3
6 001 — 7 000	9	8	5	5,4	5,8
7 001 — 8 000	10	9	6	5,8	6,8
8 001 — 9 000	11	10	6	6,4	7,4
9 001 — 10 000	12	11	6	6,9	7,9
10 001 — 11 000	13	12	7	7,4	8,4
11 001 — 12 000	14	13	7	7,9	8,9
12 001 — 13 000	15	14	8	8,4	9,4
13 001 — 14 000	16	15	8	8,9	9,9
14 001 — 15 000	17	16	9	9,4	10,4
15 001 — 16 000	18	17	10	9,9	10,9
16 001 — 17 000	19	18	11	10,4	11,4
17 001 — 18 000	20	19	12	10,9	11,9

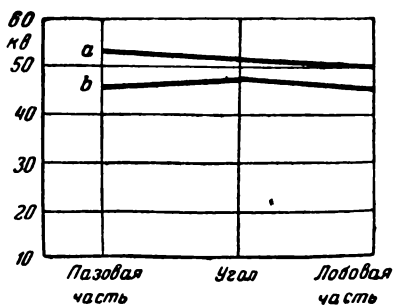
Число слоев микаленты для обмоток турбогенераторов и крупных гидрогенераторов увеличивается на 1—2 по сравнению с табл. 2,34.

Обычно для напряжений до 6 600 в применяется покровная хлопчатобумажная лента, которая в пазовых частях накладывается впритык, а в лобовых частях — вполнахлеста.

Для более высоких напряжений на пазовые части обмоток накладываются полупроводящие асбестовые ленты толщиной



Фиг. 2,57.



Фиг. 2,58.

0,40 мм. Наложение асбестовых железистых лент на пазовую часть обмотки с заходом на лобовую часть в сочетании с полупроводящими лаками позволяет устранить коронирование как в пазовой части машины, так и в месте выхода обмотки из паза (см. § 2,13).

На фиг. 2,57 показано сечение паза статора турбогенератора мощностью 50 000 кВт и напряжением 11 000 в. Каждый стержень этого турбогенератора изолирован 14 слоями микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста. Общая толщина миканитовой изоляции составляет 8,4 мм. На пазовую часть стержня с заходом на лобовую наложена асбестовая железистая лента толщиной 0,4 мм впритык, покрытая полупроводящим лаком. (Обозначения на фиг. 2,57: *а* — асбестовая бумага; *б* — микалентная изоляция; *в* — хлопчатобумажная лента впритык; *г* — асбестовая железистая лента впритык; *д* — медный провод; *е* — дельта-асбестовая изоляция провода; *ж*, *з* и *и* — миканитовые прокладки).

Приводим средние данные, характеризующие электрические свойства изоляции обмотки советских турбогенераторов напряжением 11 кВ, имеющих микалентную изоляцию:

1. Пробивное напряжение:

а) при 20°C	65 — 75 кВ
б) при 100°C	50 — 60 .
2. Тангенс угла диэлектрических потерь:

а) при 20°C	4 — 6%
б) при 100°C	8 — 12%
3. Рост $\operatorname{tg} \delta$ при увеличении напряжения от 0,5 до 1,5 рабочего 1 — 2%
4. Диэлектрическая проницаемость при 20°C . . 4,0 — 4,5

2,11. Основные характеристики непрерывной микалентной изоляции статорных обмоток высоковольтных машин переменного тока

Электрическая прочность. Применение непрерывной изоляции обеспечивает однородность электрической прочности изоляции по всей длине катушки, что видно из фиг. 2,58, где приведена электрическая прочность изоляции статорных катушек гидрогенератора напряжением 6 000 в при 18° С (кривая *а*) и 105° С (кривая *б*). Эти катушки изолированы в прямой части десятью слоями, в лобовой — восемью слоями и в головках (петле) — пятью слоями микаленты и затем компаундированы. Следует отметить, что в некоторых случаях уголки катушек, изолированных непрерывной микалентой, имеют даже несколько большую электрическую прочность, так как на изгибах микалента накладывается несколько более чем вполнахлеста, и поэтому изоляция в этих местах оказывается утолщенной по сравнению с прямой частью.

Электрическая прочность микалентной изоляции при температурах 105—110° С сравнительно мало отличается от электрической прочности при нормальной температуре (не более, чем на 10—15%).

На электрическую прочность основной изоляции обмоток, изолированных микалентой, оказывают влияние следующие факторы:

- 1) толщина, номер и сорт применяемой слюды;
- 2) количество и качество входящих в изоляцию лаков и компаундов;
- 3) наличие неплотностей в изоляции;
- 4) режим компаундирования (степень сушки, пропитки и гидростатической опрессовки);
- 5) механические повреждения, возникающие при изолировке, транспортировке, а также укладке обмоток в пазы машины.

Пробивные напряжения обмоток, изолированных микалентой на флогопите, несколько ниже (на 15—30%), чем при применении мусковита, при прочих равных условиях. Так, статорные катушки машины с рабочим напряжением 6 000 в, изолированные микалентой, изготовленной на мусковите I толщины, имеют среднее пробивное напряжение 38,9 кв. Эти же катушки, изолированные микалентой на флогопите I толщины, имеют при той же толщине среднее пробивное напряжение 32,5 кв. Неоднократные попытки применить для изоляции статорных катушек напряжением 6 000 в микаленту на флогопите всегда приводили к повышенному браку при испытании изоляции катушек повышенным напряжением. Поэтому для высоковольтной изоляции обмоток электрических машин следует применять только микаленту на слюде мусковит (ЛЧМ).

Рядом исследований, проведенных на ХЭМЗ и в ВЭИ, установлено, что на электрическую прочность микалентной изоляции оказывает существенное влияние толщина примененной для изготовления микаленты слюды. На фиг. 2,59 показана зависимость пробивного напряжения при 100° С изоляции статорной катушки толщиной 2,35 мм на сторону при применении микалент различной толщины. Так как для изготовления микалент в этом случае применялась слюда мусковит одного и того же сорта и номера, одна и та же микалентная бумага и один и тот же лак, то толщина микаленты определялась толщиной слюды.

Из кривой, характеризующей зависимость пробивного напряжения от толщины микаленты, следует, что уменьшение толщины микаленты приводит к повышению пробивного напряжения непрерывной микалентной изоляции катушек.

Повышение пробивной прочности микалентной изоляции при применении более тонких слюд может быть отнесено в основном за счет большей гибкости микалент, изготовленных

на тонких слюдах. Однако возможность использования более высокой электрической прочности микалент тоньше 0,13 мм практически ограничивается острой дефицитностью высоких качественных слюд I толщины ($0,005 \pm 0,005$ мм).

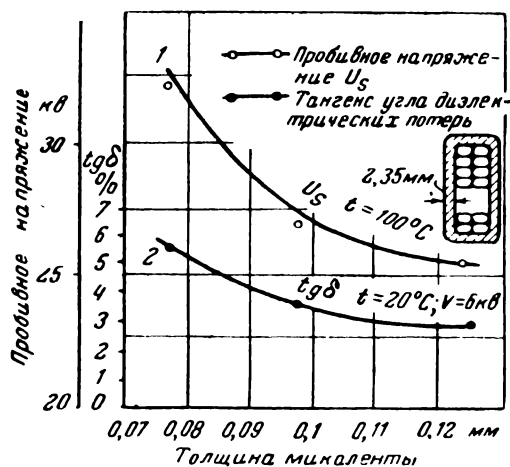
Увеличение содержания лака и компаунда в микалентной изоляции снижает ее электрическую прочность, что следует из табл. 2,35.

Таблица 2,35

Содержание лака в изоляции	Температура в °С	Толщина изоляции в мм	Пробивное напряжение в кВ
Нормальное	20	2,60	38,6
То же	100	2,60	31,6
Повышенное	20	2,90	35,9
То же	100	2,90	30,8

Из приведенных выше данных, характеризующих влияние количества лака на электрическую прочность микалентной изоляции, вытекает бесполезность и даже вредность введения промазочного лака при наложении микаленты на катушки

при их изолировке. Поэтому на советских электромашиностроительных заводах (ХЭМЗ, «Электросила») уже давно не применяется промазка микаленты лаком, сохранившаяся на американских заводах. Отказ от применения промазки позволил не только улучшить электрические свойства микалентной изоляции, но и удешевил технологический процесс изолировки, а также облегчил труд изолировщиц.



Фиг. 2,59.

Некоторое влияние на электрическую прочность микалентной изоляции оказывает плотность затяжки микаленты при ее наложении на обмотку (при более плотной намотке удастся уложить большее число микалент в одну и ту же толщину). Так, при укладке лишнего слоя при изолировке статорной ка-

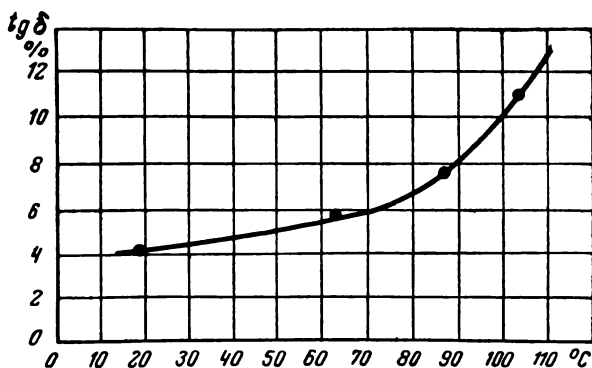
тушки напряжением 6 000 в пробивное напряжение увеличивается на 8—12%.

Существенное влияние на электрическую прочность микалентной изоляции оказывает процесс компаундирования и особенно предварительная подсушка изоляции обмоток перед пропиткой в компаунде. У хорошо высушенных катушек напряжением 6 000 в пробивное напряжение составляет 46,9 кв. У аналогичных катушек, но плохо высушенных перед пропиткой, электрическая прочность составляет всего 32,2 кв.

Поэтому применение укороченных за счет сушки режимов компаундирования микалентной изоляции высоковольтных обмоток следует признать недопустимым.

Диэлектрические потери. Диэлектрические потери в микалентной компаундированной изоляции определяются в основном потерями в лаках, бумаге и компаунде. При применении высококачественных лаков и компаундов и хорошей компаундировке тангенс угла диэлектрических потерь в микалентной изоляции обычно не превосходит при нормальной температуре 3—6%.

При нагреве до 105—110°C $\operatorname{tg} \delta$ несколько увеличивается: однако при этом значение $\operatorname{tg} \delta$ обычно не превосходит 10—15%. На фиг. 2,60 приведена зависимость диэлектрических потерь в изоляции стержня турбогенератора при рабочем напряжении 11 кв от температуры.



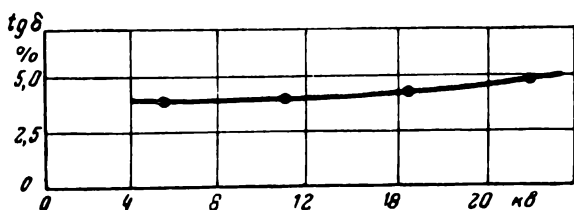
Фиг. 2,60.

Отсутствие в хорошо опрессованной и пропитанной битумом микалентной изоляции воздушных „мешков“ и прослоек исключает возможность значительного роста тангенса угла диэлектрических потерь при увеличении напряжения до 1,5 U_p . На фиг. 2,61 приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения для микалентной компаундированной изоляции статорной обмотки турбогенератора ХТГЗ напряжением 11 000 в при тем-

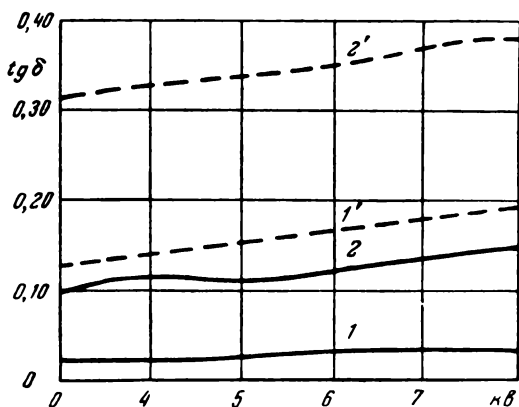
пературе 20°C . Для катушек с хорошо прокомпаундированной микалентной изоляцией рост $\text{tg } \delta$ при увеличении напряжения от 0,5 до 1,5 рабочего обычно не превосходит 2—3%.

На величину диэлектрических потерь микалентной изоляции наиболее существенное влияние оказывают следующие факторы:

- 1) сорт, размер и толщина слюды;
- 2) количество и качество входящих в микалентную изоляцию лаков и компаундов;
- 3) плотность изолировки;
- 4) процесс компаундирования.



Фиг. 2,61.

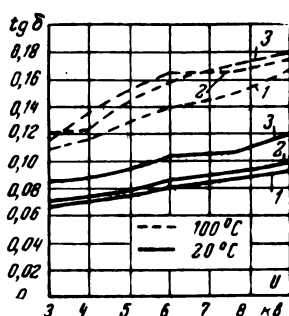


Фиг. 2,62.

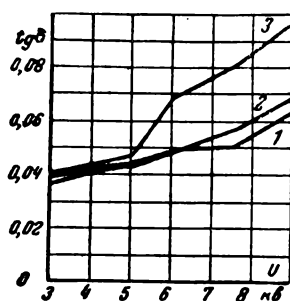
На фиг. 2,62 показаны в виде кривых зависимости $\text{tg } \delta$ от напряжения для статорных катушек на 6000 в, изолированных микалентой на мусковите и флогопите (1 — мусковит, $t = 20^{\circ}\text{C}$; 1' — мусковит, $t = 100^{\circ}\text{C}$; 2 — флогопит, $t = 20^{\circ}\text{C}$; 2' — флогопит, $t = 100^{\circ}\text{C}$). Из этих кривых следует, что диэлектрические потери у изоляции, выполненной из микаленты, изготовленной из слюды флогопит, значительно выше, чем у непрерывной изоляции из микаленты на мусковите. Зависимость $\text{tg } \delta$ от толщины микаленты при 20°C дана на

фиг. 2,59, из которой следует, что при применении более тонких микалент величина $\operatorname{tg} \delta$ несколько увеличивается. Повышение тангенса угла диэлектрических потерь при уменьшении толщины микаленты должно быть отнесено за счет увеличения содержания лака в изоляции катушек.

Влияние количества лака на величину диэлектрических потерь в микалентной изоляции можно видеть из фиг. 2,63 (1 — без подмазывающего лака; 2 — нормальное количество подмазывающего лака; 3 — без лака). Из кривых этой фигуры следует, что увеличение содержания лака в микалентной изоляции выше оптимального приводит к увеличению потерь в изоляции. Поэтому и по этой причине нельзя допускать из-



Фиг. 2,63.



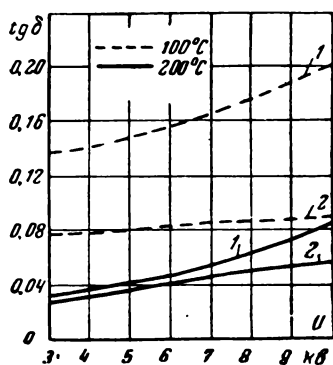
Фиг. 2,64.

лишков лака в микалентной изоляции и применять промазку лаком при наложении микаленты на обмотку. Заметное влияние на диэлектрические потери в микалентной изоляции оказывает также величина диэлектрических потерь в связующем лаке и компаунде.

Плотность намотки микаленты также оказывает существенное влияние на величину диэлектрических потерь. На фиг. 2,64 приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения у статорных катушек напряжением 6000 в при различной степени натяжки микаленты во время намотки (1 — плотная намотка; 2 — средняя намотка; 3 — слабая намотка). Из кривых этой фигуры следует, что при слабой намотке микаленты наблюдается значительный рост $\operatorname{tg} \delta$ при напряжениях выше 5 кВ. На величину диэлектрических потерь в микалентной изоляции заметное влияние оказывает процесс компаундирования катушек и особенно процесс предварительной сушки. Приведенные на фиг. 2,65 зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения для катушек, изолированных микалентой, компаундированных обычным способом (кривые 2 — 27 час.) и укороченным процессом (кривые 1 — 15 час.), показывают, что при сокращении процесса величина $\operatorname{tg} \delta$ резко возрастает. Так, у ка-

тушек, компаундированных нормально, $\operatorname{tg} \delta$ при рабочем напряжении составляет около 0,04, а у катушек, компаундированных по сокращенному режиму, величина $\operatorname{tg} \delta$ при 6000 в и температуре 100°C достигает почти 0,16, т. е. в 4 раза больше.

У катушек, уложенных в пазы машины, значение $\operatorname{tg} \delta$ обычно превосходит величину $\operatorname{tg} \delta$ отдельных катушек из-за добавочных потерь, возникающих в воздушном зазоре между изоляцией катушки и стенкой паза, а также в местах выхода обмотки из паза и в лобовых частях. Применение полупроводящих слоев на пазовых частях обмоток и в месте выхода обмотки из паза уменьшает эту разницу.



Фиг. 2,65.

Влагостойкость. Непрерывная микалентная изоляция, хорошо пропитанная и опрессованная в процессе компаундирования, обладает очень высокой влагостойкостью.

Приводим результаты испытаний на влагостойкость статических катушек асинхронного двигателя на напряжение 3300 в, имеющих непрерывную микалентную компаундированную изоляцию нормальной толщины, проведенных на ХЭМЗ. Комплект катушек этой машины был подвергнут следующему испытанию: после измерения сопротивления и диэлектрических потерь и испытания основной изоляции повышенным напряжением катушки были погружены на 10 суток в воду. Сопротивление и диэлектрические потери в изоляции при этом практически не изменились.

Средние результаты этих испытаний приведены в табл. 2,36.

Таблица 2,36

Наименование характеристики	До погружения в воду	После 240 час. пребывания в воде
Сопротивление изоляции при $U=1000$ в и $t=20^\circ\text{C}$, ом . . .	$6,2 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^{10}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при $U=4000$ в и $t=20^\circ\text{C}$	0,100	0,108

После 10-суточной выдержки катушек в воде они были испытаны напряжением 10 кВ. Эти испытания они выдержали и были уложены в машину без подсушки.

По другим данным статорные катушки на напряжение 6000 в были погружены в воду на 30 суток. Измерение сопротивления изоляции производилось непосредственно в воде. При этом первоначальное сопротивление изоляции катушек, равное $4,7 \cdot 10^{10}$ ом, через 30 суток выдержки в воде упало всего до $1,7 \cdot 10^{10}$ ом, т. е. практически не изменилось. Столь высокая влагостойкость непрерывной микалентной компаундированной изоляции в турбогенераторах допускает возможность применения водяного пара для тушения пожара внутри генератора.

Нагревостойкость. Непрерывная микалентная изоляция относится к классу В, если при ее компаундировании применен достаточно тугоплавкий битум, причем в отличие от гильзовой изоляции у непрерывной микалентной изоляции и пазовые и лобовые части катушек имеют один и тот же класс изоляции.

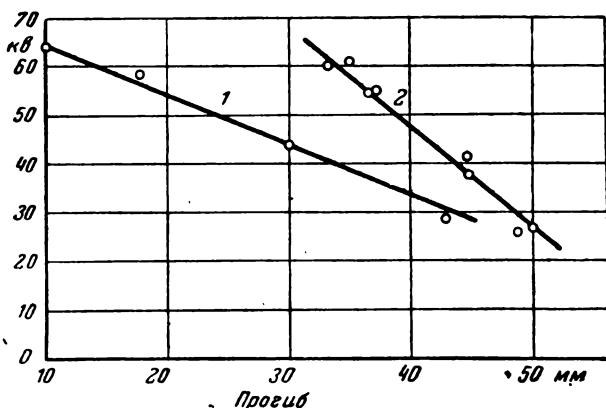
Следует отметить, что даже при применении нормального компаунда с температурой размягчения $105-110^\circ\text{C}$ не следует опасаться вытекания компаунда из изоляции даже при предельных превышениях температур обмотки, допустимых для изоляции класса В (85°C), так как вследствие перепада температуры по толщине изоляции наружная температура изоляции обмотки обычно оказывается достаточно низкой и вытекание разогретого компаунда из внутренних слоев исключено.

Благодаря относительно-высокой нагревостойкости битумно-масляных лаков, применяемых для изготовления микаленты, и битумных компаундов, длительный нагрев микалентной изоляции при $120-130^\circ\text{C}$ не вызывает опасного температурного старения, что подтверждается многочисленными исследованиями, а также эксплуатационным опытом. В мощных турбогенераторах наибольшая допускаемая температура, определяемая по заложенным в паз детекторам, установлена равной 100°C , исходя из того, что температура размягчения компаунда, пропитывающего микалентную изоляцию, лежит около 110°C . При этом температура внутренних слоев изоляции, непосредственно прилегающих к меди обмотки, несколько больше 100°C . И в этом случае размягчение компаунда в слоях, прилегающих к меди, вполне допустимо. Более того, размягчение компаунда придает дополнительную эластичность изоляции обмотки.

Озоностойкость. Хорошая озоностойкость битумно-масляных клеящих лаков, применяемых при изготовлении микалент и битумных компаундов, а также монолитность микалентной компаундированной изоляции, определяет ее высокую озоностойкость. Специально проведенные исследования озоностойкости непрерывной микалентной изоляции и многолетний эксплуатационный опыт работы высоковольтных машин и

турбогенераторов, имеющих непрерывную микалентную изоляцию, показывают отсутствие заметного влияния озона на этот вид изоляции.

Механические свойства. Непрерывная микалентная изоляция статорных катушек обладает хорошей эластичностью при температурах выше $50\text{--}60^\circ\text{C}$. При нормальной температуре, а также при более низких температурах, микалентная изоляция менее эластична, и при деформации обмотки возможно появление в изоляции механических повреждений (трещин, надрывов), что приводит к снижению электрической прочности. Поэтому холодные обмотки, изолированные мика-



Фиг. 2,66.

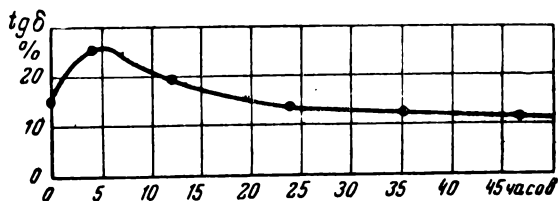
лентой, не должны подвергаться сколько-нибудь значительным деформациям, способным повредить их изоляцию. Но даже у обмоток, нагретых до 70°C и выше, наблюдается снижение электрической прочности при их изгибе, причем пробивное напряжение непрерывной микалентной изоляции в большинстве случаев линейно зависит от прогиба (фиг. 2,66, где кривые 1 и 2 относятся к разным сечениям стержня и разным толщинам изоляции). В холодном состоянии эта зависимость нелинейна вследствие слома изоляции.

Специальными исследованиями Г. И. Сканави установлено, что для стержней крупных турбогенераторов напряжением 11 кВ допустимым прогибом в горячем состоянии (температура поверхности изоляции 70°C) можно считать прогиб не более 5 мм на плече 50 мм. Коэффициент запаса электрической прочности при этих прогибах остается более пятикратного.

Применение для непрерывной микалентной изоляции более эластичных лаков и компаундов, что является одной из важных задач, позволит повысить эластичность этого вида изоляции.

Старение изоляции. В противоположность гильзовой изоляции на шеллаке непрерывная микалентная изоляция, выполненная на битумномасляных лаках и прокомпаундированная, хорошо противостоит воздействию нагрева и рабочего напряжения.

Некоторое представление о степени воздействия на микалентную изоляцию напряжения и нагрева может дать искусственное старение, при котором изоляция обмоток подвергается длительному нагреву при одновременном воздействии повышенного против нормального напряжения. При этом периодически производятся измерения диэлектрических потерь. Если $\operatorname{tg} \delta$ в этом случае не обнаруживает тенденции к увеличению, то это может служить доказательством отсутствия старения изоляции.



Фиг. 2,67.

На фиг. 2,67 приведены кривые, показывающие изменения $\operatorname{tg} \delta$ во время искусственного старения доброкачественной микалентной непрерывной изоляции, из которых следует, что $\operatorname{tg} \delta$ при воздействии на изоляцию повышенного напряжения, равного двухкратному рабочему при температуре 100°C , вначале несколько увеличивается, а затем даже уменьшается.

Некоторое увеличение $\operatorname{tg} \delta$ в первый период старения вызывается физико-химическими процессами, происходящими в клеящих лаках. При дальнейшей полимеризации лаков $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается и сохраняет практически неизменное значение.

Имеющийся опыт длительной работы высоковольтных машин с непрерывной микалентной изоляцией в условиях нормальной эксплуатации подтверждает отсутствие сколько-нибудь заметных признаков разрушения изоляции, подобных тому, как это имеет место в гильзовой микафолиевой изоляции на шеллаке.

2,12. Сравнение гильзовой и непрерывной микалентной изоляции статорных обмоток высоковольтных машин

При проектировании новых высоковольтных машин, а также при ремонтах, требующих полной замены обмотки, возникает вопрос: какой же тип изоляции следует применить для

статорной обмотки высоковольтной машины? Этот вопрос может быть правильно разрешен только в том случае, если будут учтены достоинства и недостатки существующих типов изоляции высоковольтных машин.

В статорах с открытым пазом и с двухслойной обмоткой корзиночного типа возможно применение как гильзовой, так и непрерывной изоляции. И тот и другой тип изоляции имеет свои преимущества и недостатки, которые были частично рассмотрены выше. Для облегчения задачи выбора типа изоляции приводим в табл. 2,37 сравнение основных технических и экономических показателей гильзовой (микафолиевой) и непрерывной (микалентной) изоляции.

Анализ данных табл. 2,37 приводит нас к выводу, что непрерывная изоляция имеет все преимущества перед гильзовой.

Достижения последнего времени в области механизации процессов наложения микаленты на изолируемые обмотки высоковольтных машин позволили устранить весьма существенное возражение, которое иногда выдвигалось против непрерывной изоляции, — большая трудоемкость наложения микаленты.

Следовательно, производя выбор типа изоляции при проектировании новых машин или замене статорной обмотки у машин напряжением 3 кВ и выше, следует ориентироваться на применение более совершенной непрерывной микалентной изоляции.

Для машин напряжением 3 000—3 300 в, рассчитанных на перегревы, соответствующие классу изоляции А, следует рекомендовать применение черной лакотканевой ленты или же синтетических пленок из триацетат- или ацетобутиратцеллюлозы. В последнем случае возможно компаундирование обмоток в битуме, что повышает качество изоляции.

2,13. Изоляция статорных обмоток турбогенераторов напряжением 33÷36 кВ и выше

Применяемые в настоящее время конструкции изоляции статорных обмоток турбогенераторов с рабочим напряжением 33÷36 кВ могут быть разделены на следующие основные типы:

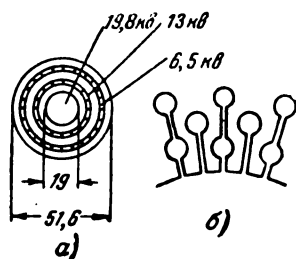
1. Кабельный тип с последовательной изоляцией витков. В этом случае обмотка в пазовой части представляет собой кабель с концентрическим расположением изолированных между собой жил (фиг. 2,68,а). При такой конструкции обмотки центральная жила изолирована тремя слоями изоляции; следующая жила, являющаяся промежуточной, — двумя, а наружная жила — одним слоем. Благодаря последовательному соединению проводников разных зон под полным напряже-

Таблица 2,37

Наименование характеристик	Непрерывная микрокалентная изоляция	Гильзовая микрокалентная изоляция
1. Электрическая прочность в пазовой части (до укладки) в кВ/мм:		
а) При 20°C	18 — 20	20 — 25
б) При 105°C	17 — 18	18 — 20
2. Пробивное напряжение в лобовой части в % к пробивному напряжению в пазовой части:		
а) При 20°C	90 — 100	30 — 50
б) При 105°C	93 — 95	20 — 30
3. Пробивное напряжение на уголках в % к пробивному напряжению в пазовой части:		
а) При 20°C	90 — 105	20 — 30
б) При 105°C	90 — 95	15 — 20
4. Тангенс угла диэлектрических потерь в пазовой части изоляции:		
а) При 20°C	0,04 — 0,08	0,05 — 0,08
б) При 105°C	0,10 — 0,20	0,30 — 0,50
5. Прирост тангенса угла диэлектрических потерь при увеличении напряжения от 0,5 U_n до 1,5 U_n		
а) При 20°C	0,01 — 0,025	0,04 — 0,06
б) При 105°C	0,02 — 0,06	0,20 — 0,30
6. Нагревостойкость:		
а) В пазовой части	Класс изоляции В	Класс изоляции В
б) В лобовой части	Класс изоляции В	Класс изоляции А
7. Влагостойкость	Высокая	Невысокая
8. Озоностойкость	Высокая	Низкая
9. Величина вылета прямой части обмотки из паза	Небольшая	Большая, для 6 кВ 60—70 мм
10. Гибкость и эластичность изоляции:		
а) При 20°C	Малая	Малая
б) При 80 — 120°C	Хорошая	Малая
11. Разбухание изоляции в пазовой части при нагреве до 100°C	Небольшое	Значительное
12. Трудоемкость изолировки	При механизации небольшая	Средняя
13. Потребное технологическое оборудование	Компаундировочная установка	Обкаточные станки, прессовое оборудование
14. Стоимость набора катушек на 6 кВ	100%	91 — 97%
15. Повреждение изоляции при укладке катушек в машину	При подогреве небольшое	Больше, особенно на углах

нием находятся только внутренние проводники (жилы). Средние проводники находятся под напряжением, не превышающим двух третей от полного напряжения. Внешние проводники имеют напряжение не более одной трети от рабочего напряжения машины. Формы пазов при этом виде обмотки показана на фиг. 2,68,б.

В выполненных конструкциях турбогенераторов на 33 000 в (фирма Парсонс), имеющих кабельный тип изоляции с последовательным соединением витков, в качестве основного материала применен миканит. При этом напряженность электрического поля в миканитовой гильзе достигает около 60 кВ/см.



Фиг. 2,68.

В соответствии с конструкцией изоляции обмотки испытание повышенным напряжением производилось: для центрального ядра напряжением 67 кВ, среднего слоя проводников — 45 кВ и наружного — 23 кВ (для обмотанного статора).

Учитывая, что даже у хорошо выполненной миканитовой гильзы электрическая прочность при 100° С в неповрежденном состоянии не превосходит 150—180 кВ/см, принятую фирмой Парсонс напряженность электрического поля миканитовой изоляции в обмотке кабельного типа следует признать завышенной.

В соответствии с принятыми в СССР нормами испытательных напряжений центральная группа проводников должна быть испытана (до укладки обмотки в машину) одноминутным напряжением $2,75U_p + 7 \text{ кВ} = 89,5 \text{ кВ}$. При этом максимальная напряженность электрического поля будет достигать 157 кВ/см, т. е. близка к пробивному. Лобовые части турбогенератора этого типа выполнены в форме дуг, расположенных в девяти поверхностях, причем в одной из групп этих поверхностей располагаются лобовые части соединения центральных проводников, в другой — промежуточных проводников, а в третьей плоскости, ближайшей к стали статора, размещаются лобовые соединения наружных проводников. Такая конструкция обмотки в лобовых частях несколько облегчает изолировку мест соединений проводников лобовых частей с пазовыми и самих лобовых частей обмотки.

К существенным недостаткам статорной изоляции кабельного типа следует отнести неравномерное распределение электрического поля по толщине изоляции.

Описанная выше конструкция изоляции имеет также следующие недостатки:

- 1) Опасность перегрева проводников внутренних зон.
- 2) Невозможность контроля температуры внутренних зон.

3) Прерывность изоляции в местах перехода в лобовые части.

4) Возможность разбухания неопрессованной изоляции.

5) Сложность изоляции лобовых частей.

2. Ступенчатая изоляция статорной обмотки, примененная фирмой Сименс для турбогенератора на напряжение 33 кв. Конструкция этого типа изоляции показана на фиг. 2,69. Благодаря применению трапециoidalных пазов и спиральной обмотки толщина изоляции плавно увеличивается по мере роста величины напряжения от нулевой точки к началу фазы ($a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < a_5$). Для этого все проводники, лежащие на одной и той же глубине паза, соединяются последовательно, затем все такие обходы обмотки опять-таки соединяются последовательно. Первый обход у расточки соединяется с нейтралью, которая заземляется; последний, наиболее удаленный от расточки, выводится к зажимной доске. Для предотвращения разбухания миканитовая гильза, имеющая трапециoidalную форму, плотно заклинивается металлической планкой Т-образной формы. Образующееся между миканитовой гильзой и дном паза пространство используется как вентиляционный канал, причем и сама планка способствует отдаче тепла от обмотки.

К недостаткам этого типа конструкции изоляции следует отнести:

1) Трудность изготовления стержней трапециoidalной формы с разной толщиной изоляции по высоте.

2) Наличие ослабленной изоляции в местах перехода от пазовых частей в лобовые.

3) Сложность изолировки в лобовых частях.

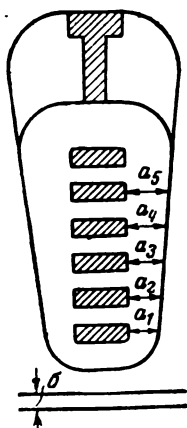
3. Ступенчатая обмотка при обычной (прямоугольной) форме паза. При этом обмотка выполняется на две или три ступени напряжения, причем эти ступени могут быть расположены в одних и тех же пазах либо каждая ступень располагается отдельно в чередующихся пазах.

На фиг. 2,70 приведена конструкция пазовой изоляции статорной однослойной обмотки на три ступени турбогенератора напряжением 31,5 кв, спроектированного заводом «Электросила». Наружный (к расточке) виток 3 обмотки имеет изоляцию, рассчитанную на рабочее напряжение 10,5 кв, состоящую из 15 слоев микаленты 0,13 мм вполнахлеста 6, средний виток 2, имеющий рабочее напряжение относительно корпуса 21 кв, изолирован добавочно 10 слоями микаленты вполнахлеста 5 и, наконец, самый глубокий виток 1, лежащий на дне паза, изолирован добавочно 11 слоями 4, т. е. $15 + 10 + 11 = 36$ слоями микаленты вполнахлеста.

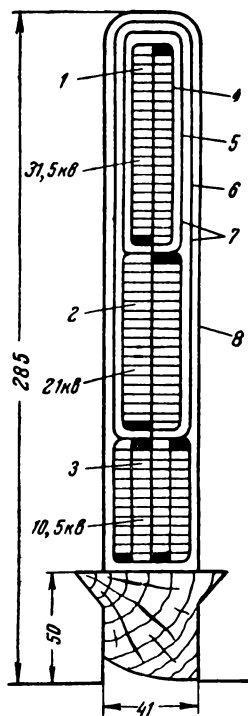
Для более равномерного распределения электрического поля по толщине пазовой изоляции каждый слой изоляции, отделяющий одну ступень напряжения от другой, покрыт полу-

проводящей асбестовой лентой 7. Такой же лентой 8 покрыта и наружная поверхность для устранения возможности коронирования обмотки в пазовой части из-за неплотного прилегания стержня к стенкам паза.

Кроме того, полупроводящей лентой покрыты наружные поверхности лобовых частей обмотки отдельных ступеней напряжения. Вариант конструкции изоляции двухслойной обмотки турбогенератора напряжением 31,5 кВ на три ступени показан на фиг. 2,71 (проект завода «Электросила»). На фиг. 2,72 показана конструкция изоляции паза турбогенератора на 31,5 кВ, имеющего две ступени напряжения — на 17,75 кВ и 31,5 кВ, причем в каждом пазу находится только



Фиг. 2,69.



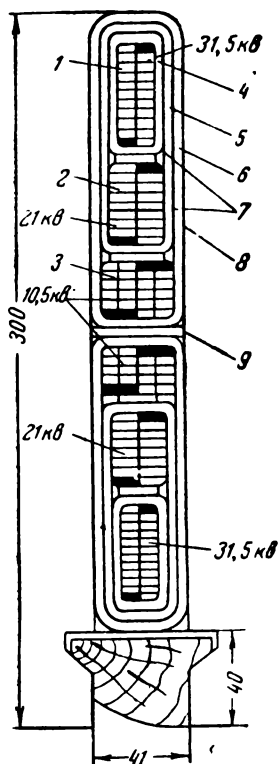
Фиг. 2,70.

одна ступень. Статорная обмотка в этом случае не отличается от обычной двухслойной обмотки (проект завода «Электросила»). Стержни, имеющие напряжения относительно корпуса 15,75 кВ, изолированы 19 слоями микаленты 0,13 мм вполнахлеста. Стержни, имеющие полное напряжение 31,5 кВ, изолированы 34 слоями микаленты. Для предотвращения коронирования поверхность статорной обмотки первой и второй ступени напряжения покрыта асбестовой полупроводящей лентой по всей длине статорной обмотки.

В некоторых конструкциях для улучшения распределения электрического поля по толще изоляции стержней применяются полупроводящие конденсаторные прослойки.

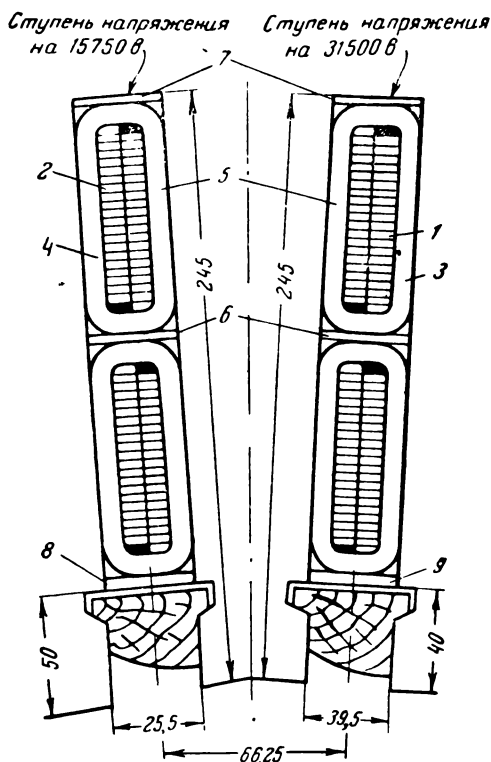
Наиболее сложной задачей конструирования двухслойных обмоток является проблема ограничения явлений коронирования в местах выхода обмотки из паза, а также в лобовых частях.

4. Одинаковая толщина изоляции всей обмотки при кабельной форме проводников, изолированных на полное напря-



Фиг. 2,71.

1, 2 и 3—медь, изолированная асбестом или стеклом; 4—11 слоев микаленты; 5—10 слоев микаленты; 6—15 слоев микаленты; 7—полупроводящие ленты; 8—наружная проводящая лента; 9—миканитовая прокладка.



Фиг. 2,72.

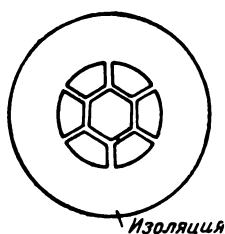
1, 2—медь, изолированная асбестом или стекловолокном; 3—34 слоя микаленты; 4—19 слоев микаленты; 5—наружная полупроводящая лента; 6, 7, 8 и 9—миканитовые прокладки.

жение. Конструкция пазовой изоляции этого типа обмотки турбогенератора на 36 кв и вид плетеного стержня показаны на фиг. 2,73. У турбогенератора мощностью 31 250 квт и напряжением 36 кв, изготовленного фирмой Броун-Бовери, в каждом пазу находится по пяти круглых стержней, изолированных на полное напряжение. При этом радиальная толщина

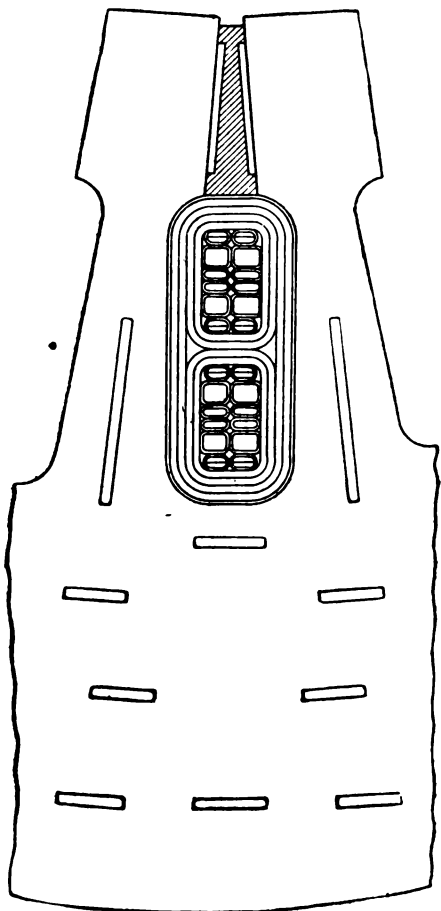
миканитовой изоляции принята равной 8 мм. Относительно небольшая толщина изоляции, принятая фирмой, потребовала применения особо высококачественной миканитовой изоляции, имеющей малые диэлектрические потери. Очевидно, при этом вместо шеллака, который применяет ВВС для обычной изоляции, применен высококачественный асфальтомаляный лак.

Применение специальных клеящих лаков позволило выполнить обмотку турбогенератора на 36 кВ, выдержавшую длительное испытание напряжением 60 кВ при температуре стали 70°С и нагреве меди 120°С. При толщине изоляции улучшенного типа 9 мм изолированные стержни выдерживали напряжение 100 кВ в течение 10 мин. и пробивались напряжением 200 кВ при скорости подъема напряжения 5 кВ/сек.

К недостаткам этого типа изоляции следует отнести:



Фиг. 2,73.



Фиг. 2,74.

- 1) Неравномерное распределение напряженности по толщине изоляции.
- 2) Малый коэффициент заполнения паза.
- 3) Трудность изготовления монолитной изоляции при круглой форме паза.
- 4) Сложность изолировки в лобовых частях обмотки.
- 5) Обычный тип обмотки и изоляции. В этом случае изоляция статорной обмотки конструктивно не отличается от

обычной, применяемой в высоковольтных машинах и турбогенераторах.

У выполненных по этому типу конструкций на напряжение 33—36 кВ для турбогенератора 25 000 кВт была применена обычная двухслойная обмотка с непрерывной микалентной изоляцией (АЭГ). Обмотка многократно прокомпаундирована и уложена в открытые пазы.

К недостаткам этого типа изоляции относятся:

- 1) малый коэффициент заполнения паза;
- 2) дороговизна изоляции.

Кроме описанных выше выполненных конструкций изоляции статорной обмотки турбогенераторов напряжением 33—36 кВ, представляют интерес и предложенные конструкции изоляции статорных обмоток турбогенераторов с масляным охлаждением статора.

На фиг. 2,74 приведена конструкция пазовой изоляции турбогенератора с масляным охлаждением на напряжение 110 кВ, разработанная и предложенная в СССР С. В. Краузом. В этом случае для изоляции обмотки предусмотрено применение бумажномасляной изоляции, что вполне допустимо с точки зрения нагревов, так как охлаждение самой обмотки, а также стали статора, обеспечивается циркулирующим трансформаторным маслом или же синтетической жидкостью (типа «совол»).

Представляют также некоторый интерес и другие аналогичные конструкции изоляции синхронных генераторов с масляным охлаждением статора и в частности разработанные фирмой ДЖИИ проекты генераторов на напряжения 66 и 132 кВ. При этом предусмотрена система масляного охлаждения с отводом тепла непосредственно от меди проводов статора. В качестве изоляции обмотки принята промасленная кабельная бумага.

Невозможность использования свинцовой оболочки для статорной обмотки требует применения специальной эквипотенциальной оболочки без потерь. Особое внимание в этих машинах уделено экранированию пазовой части, которую предлагалось выполнить из тончайшей изолированной проволоки высокого сопротивления.

В связи с рассмотрением конструкций изоляции статорных обмоток с масляным охлаждением необходимо упомянуть выполненный в ВЭИ высоковольтный генератор постоянного тока на 80 000 в, 50 кВт, со статором, наполненным трансформаторным маслом, и дуговым выпрямителем. В этом генераторе для изоляции высоковольтной обмотки применена бакелизированная бумага. Для предотвращения ионизации и ослабления краевого эффекта в пазовых частях обмотки на определенных толщинах изоляции были применены графитовые эквипотенциальные слои.

В этой конструкции между статором и ротором установлен бумажнобакелитовый цилиндр и маслом залит только статор. Ротор выполнен с воздушным охлаждением.

Предложение о применении жидкостного охлаждения статора и статорной обмотки мощных турбогенераторов появилось также в самое последнее время.

Из рассмотрения существующих конструкций изоляции статорных обмоток турбогенераторов 33 ÷ 36 кВ следует, что все они имеют те или другие недостатки. Кроме того, при существующих изоляционных материалах толщина изоляции обмотки все же получается значительной, что сильно снижает заполнение паза и уменьшает использование активной зоны машины.

Основными задачами в области высоковольтной изоляции турбогенераторов являются:

1) разработка новых, более совершенных электроизолирующих материалов;

2) разработка более совершенных конструкций изоляции обмоток, позволяющих наиболее полно использовать примененные изоляционные материалы и устраняющих возможность коронирования обмотки как в пазовых, так и в лобовых частях.

Вопрос о повышении рабочего напряжения в генераторах требует дальнейших работ, связанных с разработкой новых, более совершенных типов изоляции.

2,14. Коронирование статорных обмоток высоковольтных машин и методы его устранения

У высоковольтных обмоток, уложенных в машину, иногда наблюдается явление коронирования, представляющее собой местную ионизацию воздуха. Коронирование приводит к образованию озона и окислов азота, которые действуют разрушающе на некоторые электроизолирующие материалы (электрокартоны, целлюлозные бумаги, хлопчатобумажные ленты, шеллак и др.). Кроме того, корона оказывает также механическое и термическое действие на изоляцию. Поэтому в настоящее время у машин напряжением выше 6 кВ применяются специальные меры, устраняющие коронирование при их работе или же по возможности уменьшающие это нежелательное явление.

В высоковольтных машинах явление коронирования в первую очередь наблюдается в следующих местах:

1) в местах выхода обмотки из пазов, где напряженность электрического поля может достигать высоких значений, достаточных для местной ионизации воздуха;

2) в вентиляционных каналах статора, где также имеет место сгущение силовых линий электрического поля у острых

краев стали, т. е. благоприятные условия для местной ионизации воздуха;

3) во внутренних воздушных и газовых зазорах в толще изоляции, где корона (ионизация) возникает из-за неблагоприятного распределения напряженности в миканите и воздушных зазорах;

4) в воздушном зазоре между поверхностью изоляции обмотки и сталью статора также возникает коронирование из-за неравномерного распределения напряженности в миканитовой изоляции и воздушном зазоре;

5) в лобовых частях обмотки, особенно в местах крепления обмоток к поддерживающим кольцам.

Выясним условия возникновения короны в высоковольтных машинах. Для этого рассмотрим паз высоковольтной машины напряжением 11 кВ, в который уложена обмотка, изолированная миканитом, с зазором 0,30 мм на сторону.

Напряженность поля в воздушном зазоре может быть приближенно найдена, если принять, что провода обмотки являются одной обкладкой плоского конденсатора, а корпус машины — другой. В этом случае для определения напряженности в воздушном зазоре может быть применена формула двухслойного диэлектрика:

$$E_s = \frac{U}{\varepsilon_s \left(\frac{d_s}{\varepsilon_s} + \frac{d_m}{\varepsilon_m} \right)} \text{ кВ/см.} \quad (2,19)$$

При

$$U_{\max} = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \text{ кВ}_{\max}/\text{см};$$

$$d_s = 0,03 \text{ см}; d_m = 0,40 \text{ см}; \varepsilon_s = 1; \varepsilon_m = 5$$

$$E_s = \frac{11 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \left(0,03 + \frac{0,40}{5} \right)} = 81,5 \text{ кВ}_{\max}/\text{см.}$$

Таким образом, даже при рабочем напряжении в зазоре между поверхностью изоляции обмотки и стенками паза воздух будет ионизирован.

Возникшая корона, соприкасаясь с изоляцией, будет оказывать на нее химическое, механическое и термическое разрушающее действие.

Особенно сильное действие оказывает корона на такие материалы, как электрокартон, который иногда вкладывается в пазы статора высоковольтных машин для облегчения укладки обмотки. Так как практически невозможно добиться укладки изолированной обмотки в пазы без всяких воздушных зазоров, даже при наличии вкладки электрокартона, то

при появлении короны в воздушном зазоре она будет действовать на электрокартон и разрушать его.

Исходя из изложенного выше, не следует вкладывать в паз высоковольтной машины коробочку из электрокартона, так как она будет неизбежно разрушена короной.

Если наружная корона, возникающая в воздушном зазоре между поверхностью изоляции обмотки и стенкой паза, воздействует на наружные слои изоляции, то внутренняя корона, возникающая в воздушных и газовых прослойках, расположенных в толще изоляции, воздействует на внутренние части миканитовой изоляции (лак, бумагу). Это — наиболее опасный вид ионизации (коронирования), который в конечном счете может привести к разрушению и пробою изоляции.

Установим расчетным путем условия возникновения ионизации в воздушных прослойках, расположенных в толще изоляции и в зазоре между стальной паза и поверхностью изоляции. При этом будем считать пазовую изоляцию диэлектриком плоского типа. Такое допущение справедливо только для плоских граней изоляции. На углах, в вентиляционных каналах и в местах выхода обмотки из паза электрическое поле искажается благодаря наличию острых углов, и поэтому в этих местах можно ожидать появления ионизации при несколько меньших напряжениях, что имеет место в действительности. Однако можно полагать, что искажающее влияние углов во всяком случае скажется не качественно, а количественно. Напряженность электрического поля в воздушных прослойках

$$E_s = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \left(d_s + \frac{d_u}{\epsilon_u} \right)} = \frac{4,1U}{5d_s + d_u} [\kappa\text{в}_{\text{max}}/\text{мм}] \quad (2,20)$$

где d_s — суммарная толщина воздушных прослоек в см;

d_u — суммарная толщина сплошной изоляции в см;

U — рабочее напряжение машины (эффект).

Толщина изоляции обмоток электрических машин практически устанавливается в зависимости от номинального рабочего напряжения машины. Эта зависимость с достаточной точностью может быть выражена формулой

$$d = d_s + d_u = (0,35U + 0,7) [\text{мм}]. \quad (2,21)$$

Подставляя d_u из формулы (2,21) в формулу (2,20), получим:

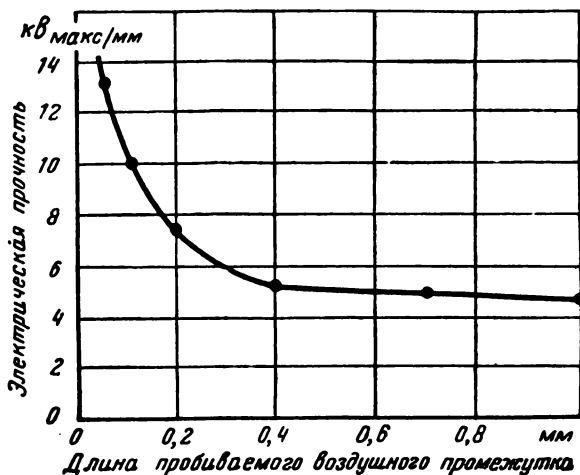
$$U = \frac{E_s (4d_s + 0,7)}{4,1 + 0,35E_s} [\kappa\text{в}]. \quad (2,22)$$

Формула (2,22) позволяет получить связь между номинальным напряжением машины, толщиной воздушных про-

слоек и напряженностью электрического поля в этих зазорах.

Рассмотрим наиболее общий случай, когда имеется ряд прослоек самых разнообразных толщин.

Подставим в формулу (2,22) вместо d_s суммарную толщину прослоек, а значение E_g , при котором пробивается воздушный зазор в равномерном электрическом поле, возьмем из кривой фиг. 2,75, где даны значения пробивного напряжения прослоек воздуха различной толщины от 0,05 до 1,0 мм, в равномерном электрическом поле. Подсчитанные таким образом значения U для воздушных прослоек толщи-



Фиг. 2,75.

ной от 0,2 до 1,0 мм приведены на фиг. 2,76 в виде семейства кривых, причем каждая кривая соответствует различной суммарной толщине воздушных прослоек.

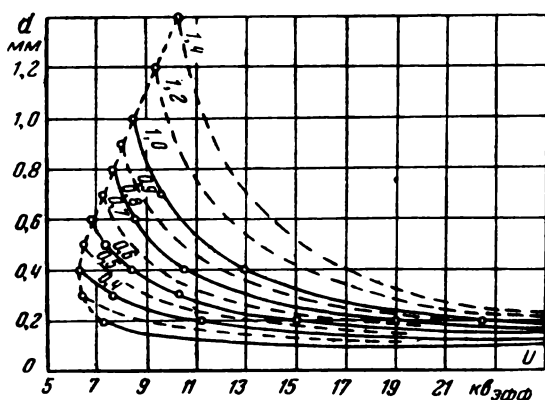
Из кривых фиг. 2,76 можно сделать весьма важный вывод, что пробой воздушных промежутков будет происходить у машин с напряжением не ниже 6,4 кВ, причем самыми опасными с точки зрения ионизации являются воздушные прослойки толщиной около 0,4 мм.

На фиг. 2,77 приведена зависимость $d = f(U)$ для случая, когда рассматриваемая прослойка составляет 100%, 80% и т. д. от общей толщины прослоек (d_s), а последняя изменяется. Но более опасным является случай одной прослойки (100%). Из кривых фиг. 2,76 и 2,77 следует, что не существует однозначной зависимости между номинальным напряжением машины и толщиной ионизируемых им прослоек.

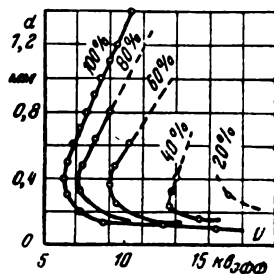
Практически явление короны может наблюдаться и в машинах с рабочим напряжением несколько меньшим, чем 6,4 кВ, из-за наличия искажений электрического поля.

На основании многочисленных наблюдений можно считать установленным, что при номинальном напряжении машины до 3,3 кВ и нормальной толщине изоляции явление короны в пазовой части машины не наблюдается. При номинальном напряжении машины 6,0—6,6 кВ уже возможно возникновение короны в воздушных зазорах. В машинах напряжением 10 кВ и выше ионизация будет происходить практически во всех зазорах.

Устранение ионизации во внутренних прослойках воздуха может быть достигнуто только путем уничтожения этих прослоек в процессе



Фиг. 2,76.



Фиг. 2,77.

изолировки, прессовки и компаундирования. Отсутствие внутренних воздушных включений (монолитность) изоляции контролируется на каждой катушке путем измерения $\tan \delta$ при разных напряжениях (см. § 5,8), и только катушки, имеющие незначительный рост потерь, могут быть допущены для укладки в статор.

Для устранения ионизации в воздушном зазоре между сталью паза и поверхностью изоляции наибольшее применение нашли полупроводящие покрытия, наносимые на поверхность изоляции обмотки в пазовой части. Для этого используются асбестовые железистые ленты, графитированные бумаги, графитовые покрытия и сажные лаки. Нанесение полупроводящих покрытий полностью устраняет корону в пазовой части обмоток, даже при наличии вентиляционных каналов, так как при этом поверхность изоляции приобретает тот же потенциал, что и статор, и в воздушном зазоре практически отсутствует электрическое поле.

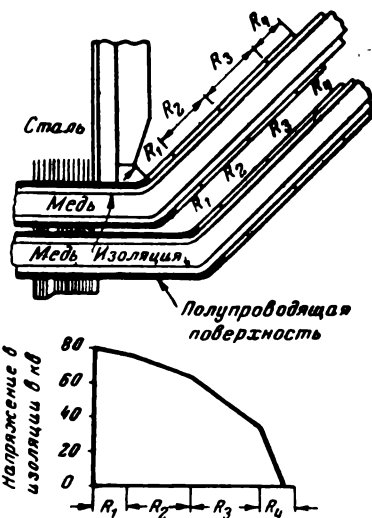
В СССР для устранения короны в пазовой части высоковольтных машин и турбогенераторов напряжением 10 кВ и

выше применяется железистая асбестовая лента в сочетании с полупроводящими (сажnymi) лаками.

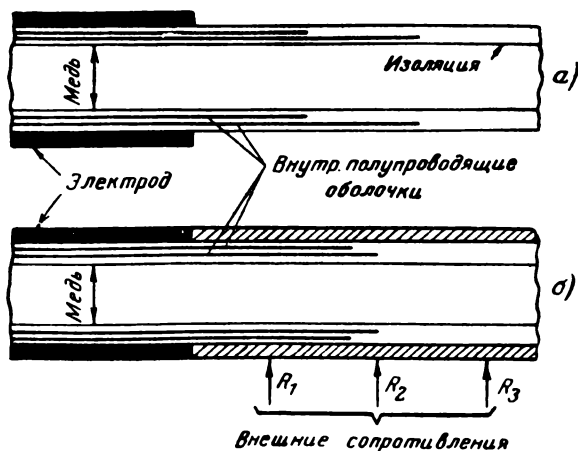
Наиболее сильное коронирование в высоковольтных машинах наблюдается в местах выхода обмотки из пазов статора. В этих местах для незащищенных от короны обмоток коронирование заметно даже при 4 кв. Для устранения короны в местах выхода обмотки из паза применяются следующие основные меры:

1. Нанесение полупроводящего слоя на поверхность изоляции в месте выхода обмотки из паза (асбестовых железистых лент, полупроводящих лаков).

2. Применение ступенчатого увеличения поверхностного сопротивления от места выхода обмотки из паза с заходом на лобовую часть (фиг. 2,78). В этом случае хорошие результаты получаются при применении железистых асбестовых лент в сочетании с двумя полупроводящими лаками, имеющими удельное поверхностное сопротивление 10^4 — 10^5 ом и 10^{10} — 10^{11} ом.



Фиг. 2,78.

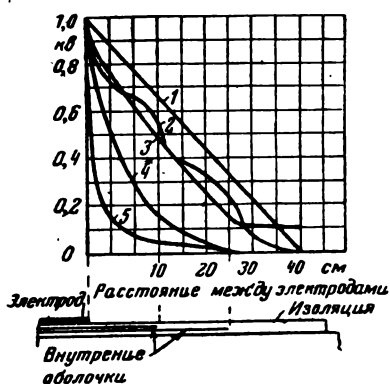


Фиг. 2,79.

3. Применение полупроводящих внутренних экранов, играющих роль конденсаторных обкладок. Этот метод сложен

и обычно применяется для обмоток турбогенераторов напряжением 30—36 кВ (фиг. 2,79,а).

4. Комбинация второго и третьего методов, т. е. применение полупроводящих ступенчатых покрытий и внутренних полупроводящих экранов (фиг. 2,79,б). Это — наиболее совершенный и вместе с тем наиболее сложный метод защиты обмотки от коронирования в месте выхода из паза.



Фиг. 2,80.

Распределение тангенциальной составляющей на поверхности изоляции в месте выхода обмотки из паза при отсутствии защиты, а также при применении различных методов защиты, показано на фиг. 2,80, где 1 — желательное распределение; 2 — при наличии внутренних полупроводящих экранов; 3 — при наличии внутренних экранов и наружных полупроводящих покрытий; 4 — при применении только внешних полупроводящих покрытий; 5 — без защиты.

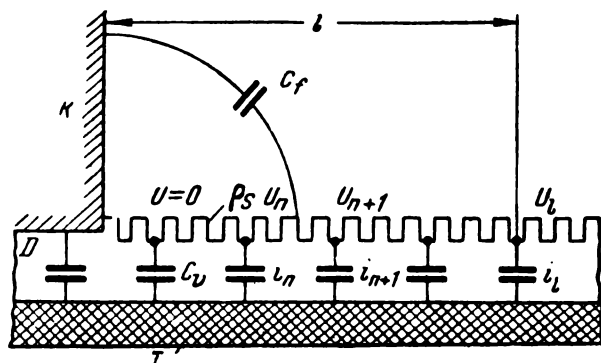
Методы расчета полупроводящих слоев для выравнивания распределения напряжения на поверхности изоляции приведены в § 2,15.

Для защиты от коронирования лобовых частей обмоток турбогенераторов напряжением 22—36 кВ также применяются специальные меры (полупроводящие покрытия, экраны, опорные кронштейны из изоляционного материала, увеличение расстояний в лобовых частях между отдельными элементами обмотки и др.).

2,15. Расчет полупроводящих покрытий обмоток высоковольтных машин

Как было уже указано выше, в высоковольтных машинах корона может возникать в следующих частях обмотки: 1) в лобовых частях, главным образом у места выхода обмотки из паза, и 2) в пазовой части. Для устранения короны в этих частях на поверхность обмоток обычно наносятся полупроводящие слои. Для того, чтобы полупроводящие слои обеспечивали полное устранение короны, их поверхностное сопротивление должно иметь вполне определенное значение. Выбор величины поверхностного сопротивления полупроводящих покрытий обмоток может быть произведен экспериментально, а также расчетным путем.

На фиг. 2,81 приведена схема замещения для места выхода обмотки из паза, предложенная М. И. Мантровым для расчета высоковольтного ввода и учитывающая емкостные и активные токи, протекающие в толще изоляции, а также между поверхностью изоляции и корпусом машин. Используя



Фиг. 2,81.

эту схему замещения, можно определить величину потенциала в любой точке поверхности полупроводящего слоя и соответственно величину напряженности электрического поля.

Для точки, лежащей на поверхности полупроводящего слоя и отстоящей на расстоянии x от стали статора,

$$U_x = \frac{1}{\text{sh}al} \left[(U_l - U_0 \frac{\dot{\gamma}_1^2}{a^2}) \text{sh}ax - U_0 \frac{\dot{\gamma}_1^2}{a^2} \text{sh}a(l-x) \right] + \frac{\dot{\gamma}_1^2}{a^2} U_0, \quad (2,23)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_x = -\frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{1}{\text{sh}al} \times \\ \times \left[a \left(U_0 \frac{\dot{\gamma}_1^2}{a^2} - U_l \right) \text{ch}ax - U_0 \frac{\dot{\gamma}_1^2}{a} \text{ch}a(l-x) \right], \quad (2,24) \end{aligned}$$

где U_x — потенциал на поверхности изоляции полупроводящего слоя в точках на расстоянии x от стали статора в σ ;

\dot{E}_x — напряженность электрического поля в точке x ;

U_0 — потенциал на меди обмотки σ ;

U_l — потенциал на краю полупроводящего слоя в σ длиной l ;

$$\dot{\gamma}_1 = \sqrt{\rho_s (\sigma + j\omega C_v)}, \quad (2,25)$$

где ρ_s — удельное поверхностное сопротивление изоляции;
 $\varepsilon = \frac{1}{\rho_v d}$ — объемная проводимость единицы поверхности
 изоляции; ω — круговая частота ($2\pi f$); C_v — емкость единицы
 поверхности изоляции;

$$\dot{a} = \sqrt{\dot{\gamma}_2^2 - \dot{\gamma}_1^2}, \quad (2,26)$$

где

$$\dot{\gamma}_2 = \sqrt{j\rho_s \cdot \omega C_v} \quad (2,27)$$

C_f — емкость между корпусом машины и поверхностью
 изоляции.

Если пренебречь величиной C_f и принять $U_l = U_0$, то
 формулы (2,23) и (2,24) несколько упростятся:

$$U_x = U_0 \left[1 - \frac{\text{sh} \dot{\gamma}_1 (l-x)}{\text{sh} \dot{\gamma}_1 l} \right]; \quad (2,28)$$

$$\dot{E}_x = U_0 \dot{\gamma}_1 \frac{\text{ch} \dot{\gamma}_1 (l-x)}{\text{sh} \dot{\gamma}_1 l}. \quad (2,29)$$

Наибольший интерес представляет место выхода обмотки из паза. В этом месте напряженность электрического поля равна

$$\dot{E}_{x=0} = U_0 \dot{\gamma}_1 \text{cth} \dot{\gamma}_1 l. \quad (2,30)$$

Для облегчения расчетов несколько преобразуем выражение (2,25) для $\dot{\gamma}_1$. Подставляя значения ε и C_v и учитывая, что

$$\text{tg } \delta = \frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}}{\omega \cdot \varepsilon \cdot \rho_v}, \text{ получим}$$

$$\dot{\gamma}_1 = \sqrt{\frac{\rho_s \omega \varepsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} d} (\text{tg } \delta + j)}. \quad (2,31)$$

Модуль величины $\dot{\gamma}_1$:

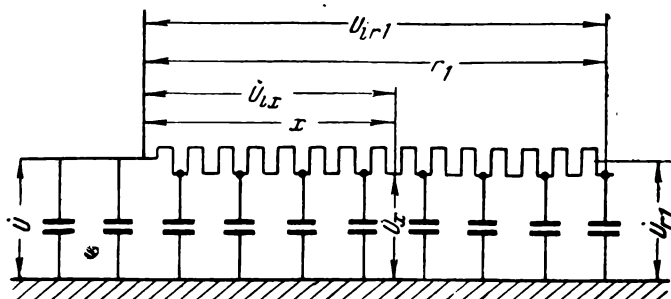
$$|\dot{\gamma}_1| = \sqrt{\frac{\rho_s \omega \varepsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} d}} \cdot \sqrt{\text{tg } \delta^2 + 1} \quad (2,32)$$

Для машинной слюдяной изоляции $\text{tg } \delta \ll 1$, и для практических целей можно воспользоваться более простой формулой:

$$\dot{\gamma}_1 = \sqrt{\frac{\rho_s \omega \varepsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} d}}. \quad (2,33)$$

Задаваясь различными значениями ρ_s , можно легко найти величину $\dot{\gamma}_1$, при которой распределение поля по поверх-

ности изоляции будет практически равномерным, а величина $E_{\tau=0}$ допустимой. При этом не следует брать слишком низких значений ρ_s , так как корона может переместиться на край полупроводящего покрытия.



Фиг. 2,82.

Г. Г. Шве́ц, приняв более простую схему замещения у места выхода обмотки из паза (фиг. 2,82), предложил следующий метод расчета полупроводящего покрытия лобовых частей обмоток высоковольтных машин, дающий вполне надежные результаты. Для схемы замещения по фиг. 2,82

$$\frac{d^2 \dot{U}_x}{dx^2} = j\omega C_1 r_1 \dot{U}_x, \quad (2,34)$$

где \dot{U}_x — вектор разности напряжений между медью и точкой x покрытия в в;

ω — угловая частота ($2\pi f$);

C_1 — удельная емкость поверхности изоляции в $\phi/\text{см}^2$;

r_1 — удельное поверхностное сопротивление полупроводящего слоя в ом.

У края стали статора $x=0$ и $\dot{U}_x = U$.

На краю полупроводящего покрытия длиной l_1 вектор тока \dot{I}_x (в а), протекающего вдоль покрытия в полоске шириной в 1 см, равен нулю ($\dot{I}_{l_1} = 0$) и $\frac{d\dot{U}_x}{dx} = 0$.

При эффективном значении напряжения между медью обмотки и сталью статора, равном U (фазное напряжение), решение уравнения (2,34) с учетом граничных условий дает значение вектора разности напряжений между медью обмотки и точкой x покрытия:

$$\dot{U}_x = U \frac{\text{ch} k_1 (x - l_1)}{\text{ch} k_1 l_1} \quad (2,35)$$

где

$$\dot{k}_1 = \sqrt{j\omega r_1 C_1} = \sqrt{\frac{\omega r_1 C_1}{2}} (1 + j). \quad (2,36)$$

Соответственно напряженность электрического поля в точке x

$$\dot{E}_x = - \frac{d\dot{U}_x}{dx} = -U \dot{k}_1 \frac{\operatorname{sh} \dot{k}_1 (x - l_1)}{\operatorname{ch} \dot{k}_1 l_1}. \quad (2,37)$$

Зная величину U_λ , можно легко определить и вектор разности напряжений между любой точкой x на покрытии и статорной сталью:

$$\dot{U}_{ix} = U \left(1 - \frac{\operatorname{ch} \dot{k}_1 (x - l_1)}{\operatorname{ch} \dot{k}_1 l_1} \right), \quad (2,38)$$

и соответствующее значение напряженности электрического поля вдоль поверхности изоляции:

$$\dot{E}_{ix} = - \frac{d\dot{U}_{ix}}{dx}. \quad (2,39)$$

При определении величины сопротивления полупроводящего слоя необходимо, чтобы:

1) напряженность электрического поля вдоль поверхности изоляции у места выхода обмотки из паза была бы меньше напряженности, при которой в воздухе на поверхности изоляции возникает тихий разряд, т. е. 20 кВ/см ;

2) разность напряжения между краем полупроводящего покрытия и медью обмотки не была более 310 в .

У места выхода обмотки из стали статора напряженность электрического поля максимальна.

$$\dot{E}_{x=0} = - \left(\frac{d\dot{U}_x}{dx} \right)_{x=0} = -U \dot{k}_1 \operatorname{th} \dot{k}_1 l_1. \quad (2,40)$$

В практических расчетах при определении абсолютной величины E_x может быть использована формула

$$E_{x=0} = \left| \left(\frac{d\dot{U}_x}{dx} \right)_{x=0} \right| = \sqrt{\frac{\omega r_1 C_1}{2}} \cdot \varphi_2 U, \quad (2,41)$$

где

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega r_1 C_1} - |\dot{k}_1 \operatorname{th} \dot{k}_1 l_1|}. \quad (2,42)$$

Задаваясь допустимым $E_{x=0}$, величиной l_1 и зная величину C_1 для данной обмотки, можно определить величину r_1 , т. е. удельное поверхностное сопротивление полупроводящего

покрытия, которое обеспечит отсутствие короны у места выхода обмотки статора из паза, при фазном напряжении U . На краю полупроводящего покрытия ($x=l$) вектор разности напряжений между медью обмотки и краем покрытия

$$\dot{U}_{l_1} = \frac{U}{\operatorname{ch} k_1 l_1}, \quad (2,43)$$

и вектор напряжения между краем полупроводящего покрытия и сталью статора

$$\dot{U}_{ii} = U \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} k_1 l_1} \right), \quad (2,44)$$

или же

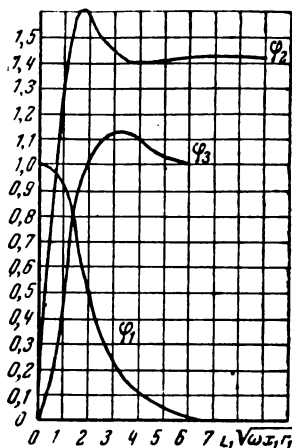
$$|\dot{U}_{l_1}| = U_{l_1} = \varphi_1 U, \quad (2,45)$$

$$|\dot{U}_{ii}| = U_{ii} = \varphi_3 U, \quad (2,46)$$

где

$$\varphi_1 = \left| \frac{1}{\operatorname{ch} k_1 l_1} \right|, \quad (2,47)$$

$$\varphi_3 = \left| 1 - \frac{1}{\operatorname{ch} k_1 l_1} \right|. \quad (2,48)$$



Фиг. 2,83.

Для облегчения расчетов на фиг. 2,83 приведена зависимость φ_1 , φ_2 и φ_3 от величины $l_1 \sqrt{\omega \epsilon_1 \eta}$. Используя выражения (2,41), (2,45) и (2,46) и графики фиг. 2,83, можно легко рассчитать полупроводящий слой, если задаться величинами $E_{x=0}$ и U_{l_1} . При толщине миканитовой изоляции 4—6 мм значение U_{l_1} должно быть не более 310 в. $E_{x=0}$ должно быть меньше или равно 20 кВ/эфф/см.

При применении двухступенчатого полупроводящего покрытия лобовой части обмоток схема замещения будет иметь вид, показанный на фиг. 2,84. Для этого случая Г. Г. Швец рекомендует следующие расчетные формулы:

$$\dot{U}_x = U \frac{\frac{k_2 z_1}{r_1} \operatorname{ch} k_2 (x - l_2) - \operatorname{sh} k_2 (x - l_2)}{\operatorname{sh} k_2 l_2 + \frac{k_2 z_1}{r_2} \operatorname{ch} k_2 l_2}; \quad (2,49)$$

$$\dot{E}_x = -\frac{d\dot{U}_x}{dx} = -U k_2 \frac{\frac{k_2 z_1}{r_2} \operatorname{sh} k_2 (x - l_2) - \operatorname{ch} k_2 (x - l_2)}{\operatorname{sh} k_2 l_2 + \frac{k_2 z_1}{r_2} \operatorname{ch} k_2 l_2}, \quad (2,50)$$

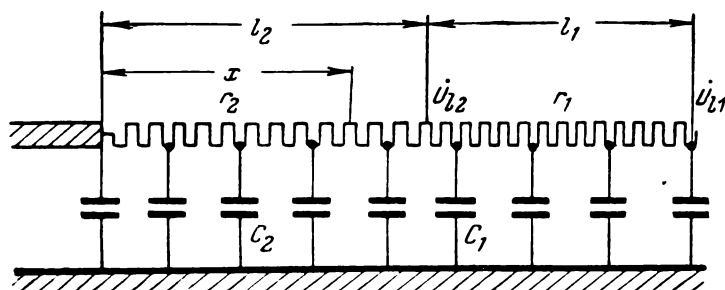
где

$$\dot{z}_1 = \frac{r_1}{k_1 \operatorname{th} k_1 l_1} \quad (2,51)$$

$$\dot{k}_2 = \sqrt{j\omega r_2 C_2} = \sqrt{\frac{\omega r_2 C_2}{2}} (1 + j) \quad (2,52)$$

При расчете двухступенчатого полупроводящего покрытия основной интерес представляет:

1) напряжение U_{l_2} в месте сопряжения двух ступеней покрытия;



Фиг. 2,84.

2) напряжение U_{l_1} на краю полупроводящего покрытия;

3) напряженность в месте выхода обмотки из паза.

Для $x = l_2$

$$\dot{U}_{l_2} = \frac{U}{\operatorname{ch} k_2 l_2} \varphi_4, \quad (2,53)$$

где

$$\dot{\varphi}_4 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_1 r_2}{C_2 r_1}} (\operatorname{th} k_1 l_1) (\operatorname{th} k_2 l_2)} \quad (2,54)$$

и

$$\dot{U}_{l_1} = \frac{\dot{U}_{l_2}}{\operatorname{ch} k_1 l_1} \quad (2,55)$$

В месте сопряжения двух ступеней покрытия будет иметь место разрыв непрерывности напряженности электрического поля.

Напряженность электрического поля для точки, лежащей справа от точки сопряжения,

$$\dot{E}_1 = -\dot{U}_{l_1} k_1 \operatorname{th} k_1 l_1. \quad (2,56)$$

Напряженность электрического поля в месте выхода обмотки из паза ($x=0$)

$$E_{x=0} = -U \dot{k}_2 \dot{\varphi}_4 \dot{\varphi}_5, \quad (2,57)$$

где

$$\dot{\varphi}_5 = \operatorname{th} \dot{k}_2 l_2 + \sqrt{\frac{C_1 r_2}{C_2 r_1}} \operatorname{th} \dot{k}_1 l_1. \quad (2,58)$$

Ток, расходуемый на питание полупроводящего покрытия,

$$I_0 = \frac{pn}{r_2} \cdot E_0, \quad (2,59)$$

где p — наружный периметр каждого стержня (или стороны катушки);

n — число стержней.

Приведенные формулы дают возможность произвести исчерпывающий расчет полупроводящих двухступенчатых покрытий высоковольтных обмоток в лобовых частях.

Практически для обмоток машин напряжением 10—16 кВ удельное поверхностное сопротивление в месте выхода обмотки из статора составляет 10^6 — 10^8 ом. При двухступенчатом покрытии удельное поверхностное сопротивление полупроводящего покрытия, прилегающего к статору, составляет 10^4 — 10^6 ом, которое затем переходит в полупроводящее покрытие сопротивлением 10^{10} — 10^{11} ом.

При расчете полупроводящих покрытий высоковольтных обмоток в пазовой части следует учитывать возможность появления короны между поверхностью изоляции и поверхностью паза статора, а также в вентиляционных каналах, где имеет место неравномерное электрическое поле.

Удельное поверхностное сопротивление полупроводящего слоя в пазовой части может быть легко определено, если задаться определенным безопасным напряжением между поверхностью покрытия и сталью статора.

Принимая $U_{ii} \leq 200$ в, т. е. не больше катодного падения, из выражения (2,46) получим:

$$\varphi_3 = \frac{200}{U}. \quad (2,60)$$

Зная φ_3 , можно из графика фиг. 2,83 определить соответствующее $(l_1 \sqrt{\omega r_1 C_1})$, а значит, и r_1 .

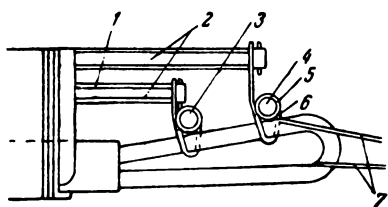
Максимальная протяженность зазора между поверхностью полупроводящего покрытия и сталью статора равна половине глубины паза (при двухслойной обмотке).

Величину полупроводящего покрытия в пазовой части не следует брать ниже 10^4 ом из-за опасения увеличения потерь

в стали. Практически удельное поверхностное сопротивление полупроводящего покрытия в пазовой части обмоток высоковольтных обмоток должно находиться в пределах 10^5 — 10^6 ом.

2,16. Изоляция бандажных колец и кронштейнов статоров машин переменного тока

При возникновении в статорных обмотках электрических машин больших токов (короткое замыкание в случае генераторов, пуск или реверс короткозамкнутых двигателей) в лобовых частях и соединениях возникают значительные усилия из-за притяжения их между собою и всех их к стали статора. Эти усилия приводят к деформации лобовых частей обмоток



Фиг. 2,85.

1 — микалитовая изоляция; 2 — шпильки;
3 и 4 — бандажные кольца; 6 — выводные концы катушек.

и могут вызвать повреждение изоляции, в особенности в месте выхода обмотки из пазов, и привести в конечном счете к пробое изоляции. Для предотвращения возможных деформаций обмотки лобовые части и соединения крепятся к одному или нескольким поддерживающим бандажным кольцам круглого или же квадратного сечения (фиг. 2,85).

Так как потенциал наружного покрова изоляции лобовых соединений почти равен потенциалу меди, то поддерживающие кольца высоковольтных машин следует изолировать на полное рабочее напряжение.

Бандажные кольца машин напряжением до 550 в обычно изолируются двумя слоями лакотканевой ленты толщиной 0,2—0,3 мм и сверху одним слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста. При рабочих напряжениях от 551 до 3150 в кольца изолируются тремя слоями лакотканевой ленты толщиной 0,3 мм вполнахлеста и одним слоем хлопчатобумажной ленты. У машин напряжением выше 3150 в применяется смешанная изоляция из лакотканевой ленты и микаленты. Так, для напряжений от 3150 до 6000 в изоляция кольца состоит из трех слоев микаленты толщиной 0,13—0,17 мм вполнахлеста, четырех слоев лакотканевой ленты толщиной 0,2 мм и одного слоя хлопчатобумажной ленты.

Полностью изолированные кольца покрываются битумно-масляным лаком воздушной сушки (типа 462-п)) или пигментированной эмалью (СВД или КВД).

Бандажные кольца и кронштейны статоров мощных турбогенераторов изолируются микалентой, на которую сверху накладывается защитный слой хлопчатобумажной ленты.

Число слоев микаленты, необходимых для изолировки бандажных колец и кронштейнов мощных турбогенераторов, дано в табл. 2,38.

Таблица 2,38

Рабочее напряжение машины в в	Бандажные кольца		Кронштейны	
	Число слоев микаленты	Минимальная толщина микалентной изоляции в мм	Число слоев микаленты	Минимальная толщина микалентной изоляции в мм
10 000 — 11 000 . . .	10	3,0	6	1,8
11 001 — 12 000 . . .	11	3,3	7	2,1
12 001 — 13 000 . . .	11	3,3	7	2,1
13 001 — 14 000 . . .	12	3,6	8	2,4
14 001 — 15 000 . . .	12	3,6	8	2,4
15 001 — 16 000 . . .	13	3,9	9	2,7

2,17. Изоляция внутримашинных соединений и выводных концов статорных обмоток машин переменного тока

У машин с изоляцией класса А напряжением до 550 в, имеющих всыпную обмотку, соединения обычно изолируются при помощи лакированных трубок. При этом лакированные трубки одеваются на выводные концы с таким расчетом, чтобы каждый конец выходил из трубки на расстояние, достаточное для соединений, после чего последние изолируются лакотканевой лентой.

В тех случаях, когда необходима более усиленная изоляция, соединения изолируются лакотканевой лентой толщиной 0,2 мм вполнахлеста и поверх тафтяной лентой вполнахлеста. Для выводных концов обычно применяется провод с резиновой изоляцией марки ПРГ или ПРГМ.

Внутримашинные соединения из прямоугольной меди (статорных обмоток) изолируются лакотканевой лентой и сверху тафтяной. Числа слоев лент для статорных обмоток напряжением до 11 000 в приведены в табл. 2,39.

В мощных турбогенераторах напряжением 10 кВ и выше места соединений статорных стержней изолируются миканитовыми манжетами, поверх которых накладывается изоляция из черной лакотканевой ленты и затем покрываются хлопчатобумажной лентой. Сверху эта изоляция лакируется битумномасляным лаком (типа 462-п).

Полюсные соединения и выводы мощных турбогенераторов, представляющие собой толстые медные шины, изолируются микалентой, а сверху хлопчатобумажной лентой. Рекомендуется компаундирование этой изоляции, что значительно повышает ее качество.

Число слоев микаленты на соединениях и выводах приведены в табл. 2,40.

Таблица 2,39

Напряжение в в	Наименование соединений	Наименование лент						Двухсторонняя толщина изоля- ции с допуском в мм
		Лакоткане- вая светлая		Лакоткане- вая черная		Тафтяная пропитан- ная		
		Число слоев	Тол- щина в мм	Число слоев	Тол- щина в мм	Число слоев	Тол- щина в мм	
до 550	{ Междукатушечные . . Междуполусные и вет- вей	1	0,2	—	—	1	0,20	1,8
		2	0,2	—	—	1	0,20	2,6
3 000—3 300	{ Междукатушечные . . Междуполусные и вет- вей	2	0,2	—	—	1	0,20	2,6
		3	0,2	—	—	1	0,20	3,5
6 000—6 600	{ Междукатушечные . . Междупо- { Провода . . люсные и ветвей { Места спаев	6	0,2	—	—	1	0,20	6,0
		7	0,2	—	—	1	0,20	7,2
		7	0,2	—	—	2	0,20	8,5
		—	—	7	0,3	1	0,20	9,5
10 000 — 11 000	{ Междупо- { Провода . . люсные и ветвей { Места спаев	—	—	8	0,3	1	0,20	10,8
		—	—	8	0,3	2	0,20	11,5

Таблица 2,40

Рабочее напряжение в в	Соединения		Выводы	
	Число слоев микаленты	Толщина мика- лентной изоля- ции в мм	Число слоев микаленты	Толщина мика- лентной изоля- ции в мм
11 000 — 12 000 . . .	13	3,9	16	4,8
12 001 — 13 000 . . .	14	4,2	17	5,1
13 001 — 14 000 . . .	14	4,2	17	5,1
14 001 — 15 000 . . .	16	4,8	19	5,7
15 001 — 16 000 . . .	17	5,1	20	6,0

Для обеспечения необходимых запасов электрической прочности изоляции лобовых частей и соединений статорных обмоток высоковольтных машин должны быть выдержаны определенные расстояния между головками обмотки, межгрупповыми соединениями и щитами (фиг. 2,86).

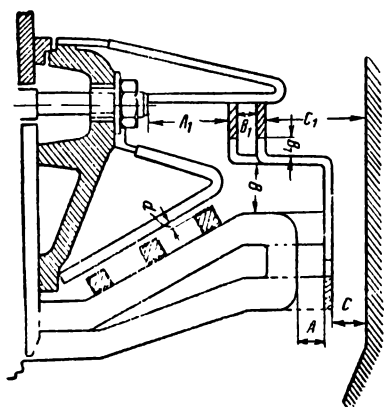
Минимальные расстояния (в мм) от головок лобовых соединений до межгрупповых и междупазовых соединений и от них до щита или диффузора указаны в табл. 2,41.

В машинах с нагревостойкой изоляцией, там, где температура в изоляции соединений и выводов превосходит допустимые для класса изоляции А, необходимо применение микалентной или даже стекломикалентной изоляции, которая сверху покрывается стеклянной или же асбестовой лентой.

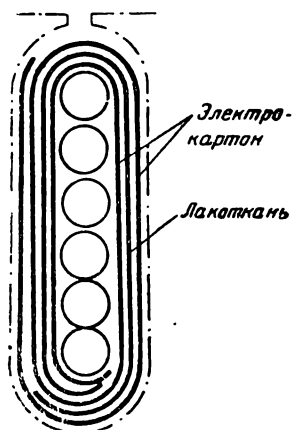
Таблица 2,41

Рабочее напряжение машины в в	A	B	C	A ₁	B ₁	C ₁	d
0 — 600	25	35	50	60	45	60	4
601 — 3 300	35	40	55	65	50	70	4
3 301 — 6 600	40	45	60	70	55	75	4
6 601 — 10 00	45	50	65	75	60	85	4
10 501 — 13 500	50	55	75	85	65	100	4
13 501 — 16 000	55	60	90	100	70	120	6

Выводные щитки или коробки низковольтных машин изготовляются из гетинакса, текстолита или же прессуются из пластмассы. У высоковольтных машин выводные шины крепятся на фарфоровых опорных изоляторах.



Фиг. 2,86.



Фиг. 2,87.

2,18. Изоляция роторных обмоток асинхронных двигателей

В настоящее время в роторах асинхронных двигателей применяется три типа обмоток: всыпная, протяжная (катушечная) и стержневая, конструкция изоляции которых различна. Изоляция роторных всыпных обмоток практически не отличается от якорных с тем же типом обмотки (см. § 2,21).

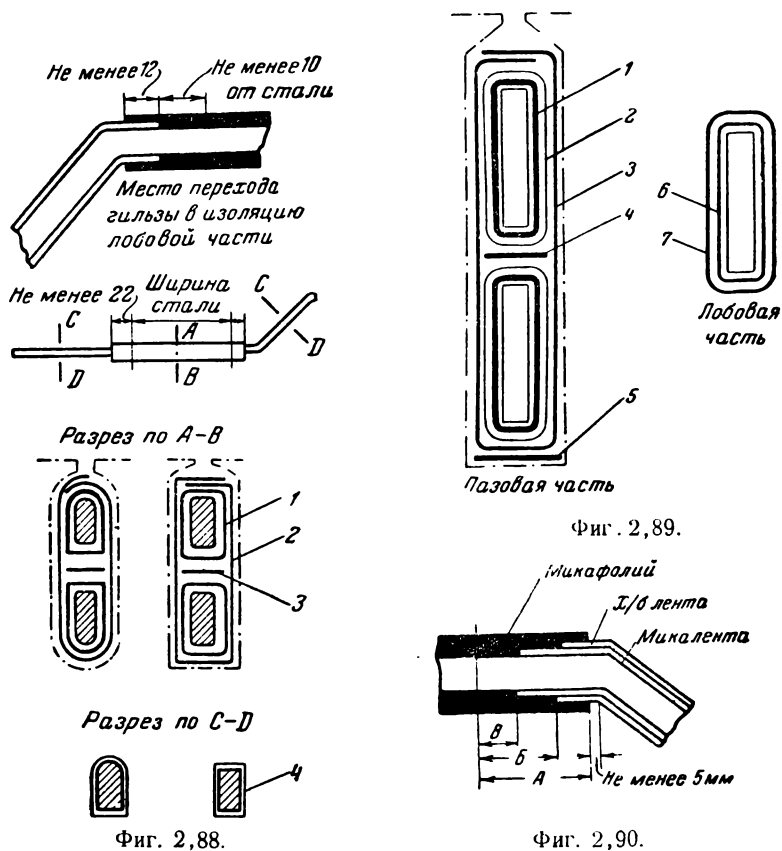
Изоляция протяжных (катушечных) обмоток роторов напряжением до 300 в состоит из электрокартона и лакоткани.

На фиг. 2,87 приведена конструкция пазовой изоляции класса А роторной протяжной обмотки для напряжения до 300 в. В этом случае возможно применение и пленкокартона, обладающего лучшей влагостойкостью и нагревостойкостью по сравнению с лакотканевой изоляцией.

Для роторов с изоляцией класса В, а также для роторов с влагостойкой изоляцией, необходимо применение миканита

в сочетании с электрокартоном или же микрофольевой гильзы. Если перегревы роторной обмотки превышают 120°C , то для пазовой изоляции роторов следует применять стекломиканит на нагревостойких лаках (глифталевых, кремнийорганических и т. п.).

Лобовые части катушечных роторных обмоток относительно корпуса и между собой обычно не изолируются, так как они



не соприкасаются друг с другом и с корпусом ротора. Применяется только крепление лобовых частей катушек с предварительно изолированными кольцом и вентилятором помощью шпагата.

Для стержневых обмоток применяется более сложная изоляция. Так как стержень вставляется в полузакрытый паз ротора с торца и затем производится выгибание второй стороны стержня для придания ему необходимой формы, то изоляция роторных стержней имеет разную конструкцию в пазовой и лобовой частях. В пазовой части роторный стержень

Таблица 2,42

Ссылка на гл. 2,89	Наименование материалов	Двухсторонняя толщина по ширине паза в мм для				Двухсторонняя толщина по высоте паза в мм для			
		До 500 в		1 000—1 500 в		До 500 в		1 000—1 500 в	
		500—1 000 в	1 000—1 500 в	1 500—2 000 в	2 000 в	500—1 000 в	1 000—1 500 в	1 500—2 000 в	2 000 в
Пазовая часть									
1	Лакировка стержня	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
2	Микафол	0,9	1,4	1,8	2,2	0,9×2	1,4×2	1,8×2	2,2×2
3	Телефонная бумага лакированная 0,07 мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2×2	0,2×2	0,2×2	0,2×2
4	Электрокартон 0,2—0,3 мм	0,4	0,6	0,6	0,6	0,90	0,90	0,90	0,90
5	Электрокартон 0,5 мм	—	—	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	Электрокартон 0,3 мм	—	—	—	—	0,3	0,3	0,3	0,3
Общая толщина изоляции в пазовой части									
		1,6	2,3	2,7	3,1	4,1	5,1	5,9	6,7
Лобовая часть									
6	Микалента 0,13—0,15 мм	0,6	0,6	1,04	1,56	0,6	0,6	1,04	1,56
7	Хлопчатобумажная лента	0,4	0,8	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8	0,8
	Лакировка и разбухание	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Общая толщина изоляции в лобовой части стержня									
		1,2	1,6	2,04	2,56	1,2	1,6	2,04	2,56

имеет жесткую, механически прочную (прессованную) изоляцию из бумаги, покрытой фенольноформальдегидным лаком, или же микафолия. В лобовой части роторные стержни изолируются лакотканевой лентой или микалентой и затем хлопчатобумажной лентой.

На фиг. 2,88 показана конструкция изоляции класса А роторной стержневой обмотки напряжением до 300 в в пазовой и лобовой частях (на фиг. 2,88 1 — пять слоев бакелизированной бумаги общей толщиной 0,42 мм; 2 — электрокартон толщиной 0,2 мм; 3 — прокладка из электрокартона толщиной 0,5 мм.). Двухсторонняя толщина пазовой изоляции по ширине при этом составляет 1,24 мм. Общая толщина изоляции по высоте паза составляет 2,78 мм. Изоляция в лобовой части (4) — хлопчатобумажная лента вполнахлеста.

При напряжениях выше 300 в роторные стержни обычно изолируются микафолием, который подвергается горячей опрессовке для получения твердой, механически прочной гильзы. Лобовые части стержней в этом случае изолируются или лакотканевой лентой или микалентой, на которые сверху накладывается один слой защитной хлопчатобумажной ленты.

На фиг. 2,89 приведена конструкция изоляции класса В роторной обмотки напряжением до 2 000 в, а в табл. 2,42 — толщины изоляции в пазовой и лобовой частях.

Напряжения, для которых приведены толщины изоляции, относятся к неререверсивным двигателям. Выбор толщины изоляции для реверсивных двигателей необходимо производить, исходя из двойного рабочего напряжения.

Конструкция изоляции в месте перехода от микафолиевой гильзы к микалентной изоляции роторных стержней показана на фиг. 2,90, а размеры А, Б и В для разных напряжений даны в мм в табл. 2,43.

Таблица 2,43

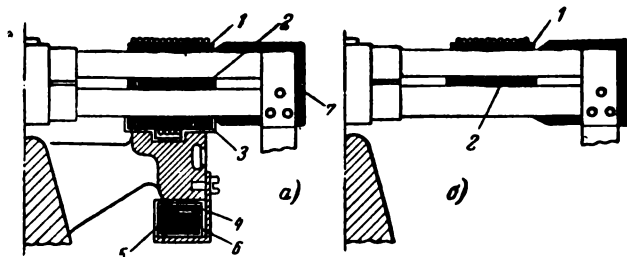
Напряжение на кольцах в в	Размеры в мм		
	А	Б	В
От 500 до 1 500	25	20	15
От 1 501 до 2 000	30	25	20

Изоляция деталей креплений и соединений роторных стержневых обмоток показана на фиг. 2,91 для напряжений 500—2 000 в — для роторов с обмоткодержателями на фиг. 2,91,а и без них — на 2,91,б.

Подбандажная изоляция 1 состоит из одного слоя миканита толщиной 0,2 мм, расположенного между двумя слоями электрокартона толщиной 0,5 мм, закрепленного к обмотке хлопчатобумажной лентой. Изоляция в лобовой части ротор-

ной обмотки между верхним и нижним слоем и стержнем 2 состоит из нескольких слоев электрокартона толщиной 0,5 мм, скрепленных хлопчатобумажной лентой вразбежку.

Изоляция обмоткодержателя 3 осуществляется следующим образом. Полоска хлопчатобумажной ткани или парусины привязывается шпагатом к обмоткодержателю. Затем на обмоткодержатель накладывается полоска миканита толщиной 0,2—0,3 мм, проложенная между двумя слоями электро-



Фиг. 2,91.

картона толщиной 0,3—0,5 мм, после чего свободные концы хлопчатобумажной полоски заворачиваются и закрепляются по всей окружности несколькими слоями хлопчатобумажной ленты. Между соединительными шинами прокладывается электрокартон 4. Изоляция в местах крепления соединительных шин 5 состоит из электрокартона толщиной 2,0 мм, скрепленного хлопчатобумажной лентой впритык. Изоляция соединительных шин 6 и хомутиков 7 для разных напряжений дана в табл. 2,44.

Таблица 2,44

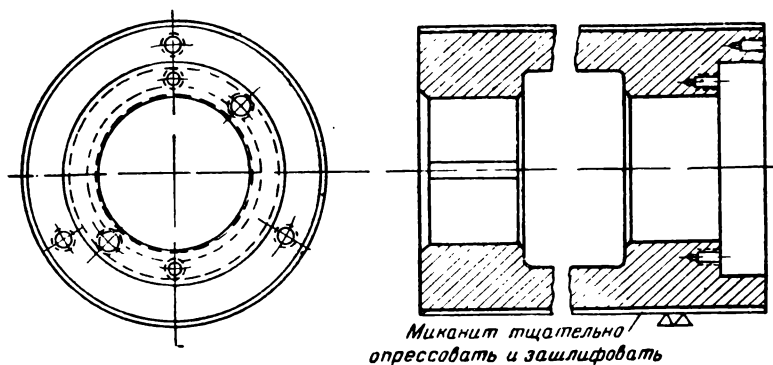
Напряжение на кольцах в в	Изоляция соединительных шин		Изоляция хомутиков	
	Лакотканевая лента 0,2 мм	Хлопчатобу- мажная лента 0,2 мм	Лакотканевая лента 0,2 мм	Хлопчатобу- мажная лента 0,2 мм
До 500	1 слой в 2/3 нахлеста	1 слой впол- нахлеста	1 слой впол- нахлеста	1 слой впол- нахлеста
От 500 до 1 000	2 слоя впол- нахлеста	То же	2 слоя впол- нахлеста	То же
От 1 000 до 1 500	2 слоя в 2/3 нахлеста	То же	2 слоя в 2/3 нахлеста	То же
От 1 500 до 2 000	3 слоя впол- нахлеста	То же	3 слоя впол- нахлеста	То же

Провода или шины, соединяющие роторную обмотку с контактными кольцами, также изолируются лакотканевыми лентами и сверху хлопчатобумажной лентой.

Контактные кольца фазного ротора насаживаются (нагорячо) на миканизированную втулку (фиг. 2,92). Для предохранения от выветривания миканит сверху закрепляется шпа-

гатов или же хлопчатобумажной лентой, которые покрываются покровным лаком или эмалью.

В последнее время для изоляции роторных стержней вместо миканитовой изоляции с большим успехом применены синтетические пленки из триацетат- или ацетобутиратцеллюлозы. В этом случае пазовые части стержней обертываются несколькими слоями композиционного материала, состоя-



Фиг. 2,92.

щего из пленки, склеенной с кабельной бумагой или же тонким электрокартоном (0,1 мм). Лобовые части при этом изолируются лентой из пленки. Толщина изоляции и в этом случае зависит от напряжения на кольцах ротора.

В тех случаях, когда температура перегрева роторных стержневых обмоток превосходит 95° С (предельно допустимая для класса изоляции В), необходимо применять в качестве основной изоляции стеклослюдяные материалы и стеклоленты или асбестовые ленты в качестве скрепляющих и защитных лент.

2,19. Изоляция роторных обмоток синхронных машин с явно выраженными полюсами

Конструкция изоляции класса А роторных катушек синхронных машин с явно выраженными полюсами видна из фиг. 2,93.

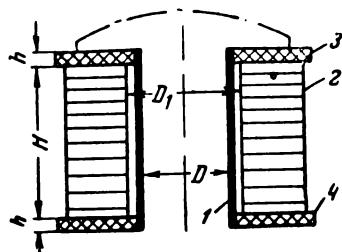
В этом случае роторные катушки 2 изолированы относительно корпуса четырьмя слоями лакированного электрокартона 1 толщиной 0,3—0,4 мм и двумя гетинаксовыми или текстолитовыми рамками 3 и 4 толщиной от 5 до 15 мм (h).

Следует отметить, что изоляция роторов синхронных машин подвергается значительным механическим воздействиям как в процессе сборки, так и при работе машины. Поэтому изоляция роторных катушек относительно корпуса имеет боль-

шую толщину (1,2—1,4 мм), несмотря на относительно низкое рабочее напряжение (до 220 в постоянного тока), что позволяет обеспечить достаточную механическую прочность роторной изоляции.

Опыт применения для шайб фанеры не дал хороших результатов из-за ее ссыхания и значительной усадки, и поэтому следует применять гетинаксовые или текстолитовые шайбы.

Если катушки возбуждения изготавливаются из голой прямоугольной меди (шины), то междувитковой изоляцией служит лакированный электрокартон, помещаемый между витками в виде разрезных рамок или полурамок. После прокладывания между витками рамок из лакированного электрокартона катушки нагреваются до 120°C и прессуются, что обеспечивает монолитность катушки. После окончательной сборки катушек на полюсе и выполнения соединений торцевые поверхности катушек и рамки покрываются битумномасляным лаком типа 458 или 447.

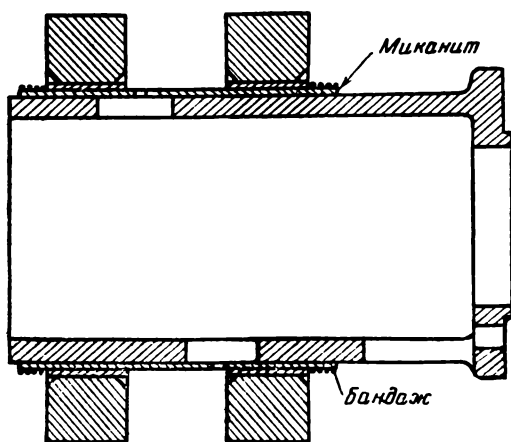


Фиг. 2,93.

Провода или шины, соединяющие роторную обмотку с контактными кольцами, изолируются двумя-тремя слоями лакоканиевой ленты толщиной 0,2—0,3 мм вполнахлеста и сверху слоем хлопчатобумажной ленты, которая покрывается лаком или эмалью.

Контактные кольца насаживаются на предварительно миканизированную втулку (фиг. 2,94).

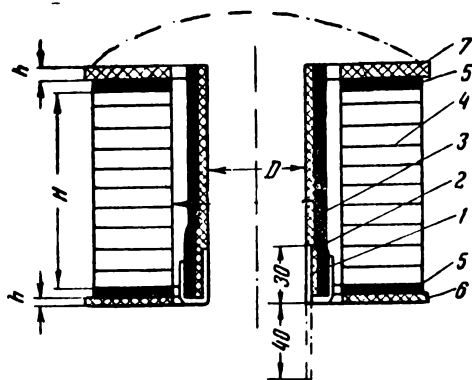
Изоляция роторной обмотки синхронных машин В и ВС состоит из миканитовых и асбестовых материалов.



Фиг. 2,94.

На фиг. 2,95 приведена типичная конструкция изоляции класса В роторных катушек, изготовленных из прямоугольной меди. В этом случае междувитковая изоляция 4 состоит из асбестовой бумаги толщиной 0,3 см, покрытой с двух сторон лаком (например, глифтале-бакелитовым). После укладки витковой изоляции катушки нагреваются до $130\text{—}150^{\circ}\text{C}$ и прессуются

под большим давлением. На торцевые стороны катушек наклеиваются рамки из асбестовой ткани толщиной 0,5—1,5 мм. Сердечник полюса обычно изолируется по всей высоте несколькими слоями асбестовой лакированной бумаги 2 толщиной 0,2—0,3 мм (общая толщина асбестовой изоляции 1,0—1,4 мм на сторону) и тремя слоями микафолия 3 толщиной 0,20—0,30 мм. Эта изоляция плотно приутюживается к сердечнику.



Фиг. 2,95.

Для усиления механической прочности изоляции сердечника полюса в нижней части ставится манжета 1 из сурового полотна толщиной около 0,25 мм. Рамки 6 и 7 обычно изготавливаются из гетинакса. Зазор по высоте сердечника при сборке устраняется подклеиванием к нижней части катушки подкладок 5 из асбестовой бумаги или плотного асбокартона.

В роторах, обмотка которых имеет перегрев выше 95°C , для изоляции сердечников применяется формовочный миканит на глифтале в сочетании с асбестовой бумагой, а для рамок — асбобакелит, асботекстолит или стеклотекстолит.

Отводы в этом случае следует изолировать микалентами или стеклослюдяными лентами с последующим покрытием асбестовыми и стеклянными лентами. После соединений и окончательной сборки ротора катушки, шайбы и отводы покрываются теплостойким лаком или эмалью (например, СПД).

2,20. Изоляция роторных обмоток синхронных машин с неявновыраженными полюсами

Изоляция обмотки ротора турбогенератора подвергается воздействию огромных механических усилий и повышенных температур. Поэтому, несмотря на невысокое напряжение на обмотке ротора турбогенератора (обычно до 220 в), толщина изоляции обмотки ротора относительно корпуса берется достаточно большой. Точный расчет всех механических усилий, возникающих в изоляции обмотки ротора, затруднителен. Однако, можно представить себе характер тех воздействий, которые вызывают в изоляции ротора механические напряжения. К этим воздействиям в первую очередь относятся:

1. Механические воздействия, возникающие в изоляции при

укладке обмотки в пазы, а также при опрессовке обмотки, выпечке ротора, одевании и подгонке седел к лобовым частям и т. п., т. е. в процессе технологической сборки и термообработки. Точный расчет механических усилий, возникающих при этом, невозможен.

2. Центробежные силы, вызывающие главным образом сжимающие усилия в некоторых частях изоляции. Величина центробежных сил, возникающих в обмотке ротора при его вращении, может быть определена по формуле

$$P = 56 \cdot G \cdot D_0 \left(\frac{n_y}{1000} \right)^2 (\text{кг}), \quad (2,61)$$

где G — вес катушки в кг;

D_0 — диаметр окружности расположения центров тяжести катушек в см;

n_y — число оборотов в минуту.

3. Воздействия, возникающие в изоляции при нагреве и охлаждении обмотки ротора. Величина этих воздействий может достигать огромных значений, особенно при нагреве и охлаждении вращающихся длинных роторов мощных турбогенераторов, когда обмотка прижимается к клину огромными центробежными силами. Порядок этих воздействий может быть определен расчетом.

В старых конструкциях для изоляции отдельных витков, а также всей обмотки ротора относительно корпуса, применялись такие материалы, как электрокартон, летеорид.

В современных турбогенераторах роторная изоляция выполняется из слюдяных и асбестовых или стекловолокнистых материалов, что позволяет допускать повышенные перегревы обмотки ротора (до 145°C и выше).

В табл. 2,45 приведены основные типы изоляции роторных обмоток турбогенераторов, представляющие наибольший интерес.

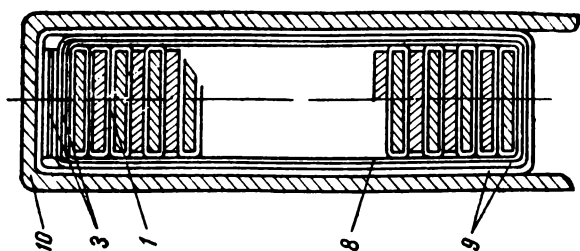
В СССР для изоляции роторной обмотки применяется последний (VI), наиболее совершенный тип изоляции, сочетающий в себе высокую нагревостойкость и механическую прочность витковой и основной изоляции. Толщина миканитовой изоляции, представляющей собой прессованную из формовочного миканита гильзу, зависит от мощности турбогенератора.

У турбогенераторов небольшой мощности (3,5—6 тыс. кВт) толщина миканитовой гильзы составляет около 1 мм. Толщина миканитовой гильзы у роторов мощных турбогенераторов (50—100 тыс. кВт) достигает 1,5—2,0 мм.

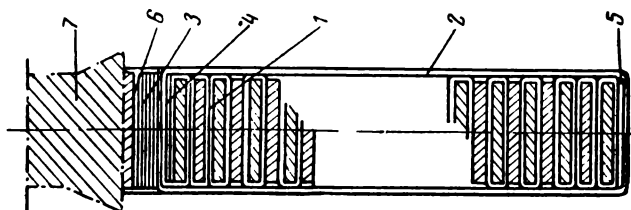
У мощных турбогенераторов, имеющих специальные вентиляционные отверстия для выхода воздуха из подпазовых каналов, миканитовая гильза ротора армируется листовой мягкой сталью (толщиной 0,5 мм), которая защищает мика-

Таблица 2.45

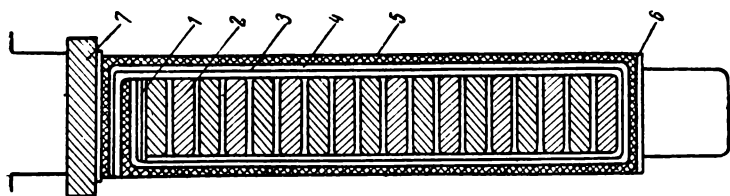
Тип	Класс	Изоляция в пазовой части		Изоляция в лобовой части	
		витковая	основная	витковая	основная
I	A	Электрокартон и хлопчатобумажная лента	Электрокартон или литеорид	Электрокартон и хлопчатобумажная лента	а) Вокруг катушек на выходе из паза хлопчатобумажная лента, в остальной части воздушные промежутки. б) Относительно каппы (бандажа) — электрокартон в) Изоляция торца большой катушки относительно центрирующего кольца электрокартон
II	A	Электрокартон и хлопчатобумажная лента	Электрокартон и миканит	Электрокартон и хлопчатобумажная лента	а) То же, что у типа I б) Относительно каппы (бандажа) — электрокартон и миканит в) То же, что у типа I
III (фяг. 2,90)	Смешанный	Миканитовая прокладка	Гильза 5, склеенная из электрокартона 0,4 мм в два слоя, между которыми заложены миканит толщиной 0,2 мм. Снаружи коробка из белой жести. Под клином 1, латуниным угольником 2 и медными полосками 3 миканитовые прокладки 4	Миканит	а) То же, что у типа I б) Относительно каппы (бандажа) электрокартон и миканит. в) То же, что у типа I
IV	B	Миканит	Миканит	Миканит	а) Вокруг катушек, на выходе из паза асбестовая лента, в остальной части воздушные промежутки. б) Относительно каппы (бандажа) миканит с защитным слоем электрокартона. в) Изоляция торца большой катушки относительно центрирующего кольца — асбестовая прокладка
V (фяг. 2,97)	B и BC	Микалента ЛСФ 2	Асбестовая бумага 3, микарент 4 и асбестовая ткань 5, на дне фибровая прокладка 6 Под клином 7 миканитовые прокладки 1	Микалента	Вокруг катушек микалента и асбестовая лента под алюминиевыми седлами
VI (фяг. 2,98 и 2,99)	B и BC	Микалента ЛСФ 1	Миканитовая формованная гильза 2, микалитовая прокладка 3, 4 и 5, фибра 6 под клином 7	Микалента 1	Вокруг катушек микалента 8 и асбестовая лента 9, под алюминиевыми седлами 10 миканитовые прокладки 3



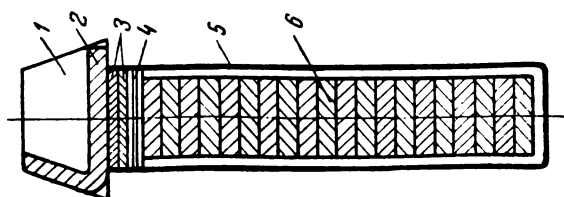
Фиг. 2, 99.



Фиг. 2, 98.



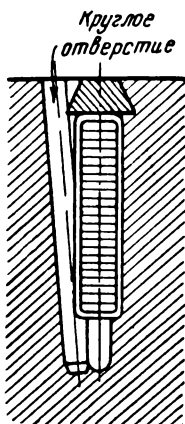
Фиг. 2, 97.



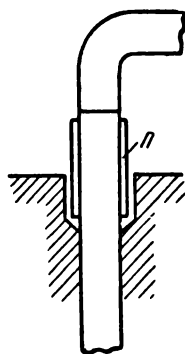
Фиг. 2, 96.

нит от повреждения омывающей ее воздушной струей (фиг. 2,100).

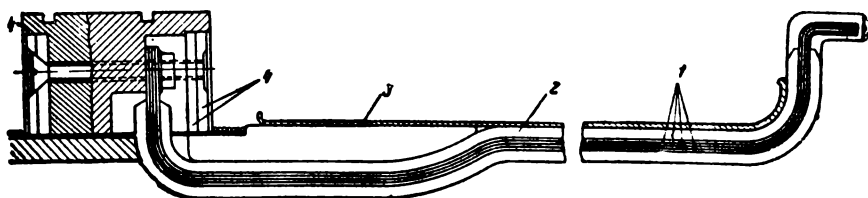
Эта армировка защищает также изоляцию роторной обмотки от перегирания при температурных перемещениях меди. Особое внимание уделяется усилению пазовой изоляции в ме-



Фиг. 2,100.



Фиг. 2,101.



Фиг. 2,102.

стах выхода обмотки из паза. В этих местах устанавливаются специальная миканитовая концевая коробочка *П* толщиной 1—2 мм (фиг. 2,101).

Изоляция токоподвода видна из фиг. 2,102 (1 — медные шины; 2 — миканитовая изоляция; 3 — металлическая деталь; 4 — гетинакс).

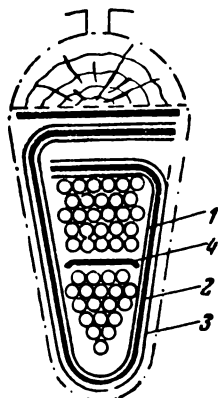
2,21. Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока

Конструкция изоляции относительно корпуса в якорных обмотках имеет много общего с конструкцией изоляции статорных обмоток, имеющих ту же форму паза. Поэтому при рассмотрении изоляции якорных обмоток ограничимся схематическим описанием применяемых в настоящее время основ-

ных типов изоляции, а также изложением основных соображений по выбору изоляции для якорных обмоток машин постоянного тока разных типов и исполнений.

1. Всыпные якорные обмотки машин с полукрытым пазом. В табл. 2,46 и соответственно на фиг. 2,103 приведены конструктивные данные для пазовой изоляции класса А всыпных якорных обмоток машин постоянного тока, нормального исполнения, напряжением до 500 в, мощностью выше 1 квт, которые могут быть рекомендованы для практического использования.

В лобовых частях между катушками прокладываются прокладки из тонкого электрокартона (0,1—0,2 мм), или лакоткань (0,15—0,20 мм), или же сочетание этих материалов. В машинах мощностью меньше 1 квт применяется более тонкая пазовая изоляция, состоящая из двух слоев плотного электрокартона толщиной 0,10—0,15 мм и лакоткань толщиной 0,06—0,10 мм. Толщина прокладки из электрокартона между катушками в этом случае составляет 0,2—0,3 мм. В лобовых частях мелких машин между катушками обычно прокладывается лакоткань. В машинах напряжением до 24 в для пазовой изоляции применяется один слой электрокартона толщиной 0,2—0,4 мм. Для пазовой изоляции якорных обмоток очень хорошие результаты дает применение пленкокартона толщиной 0,2—0,5 мм. В этом случае повы-

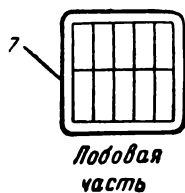
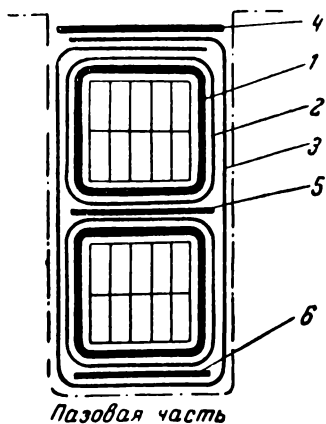


Фиг. 2,103.

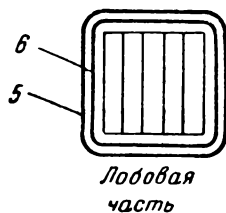
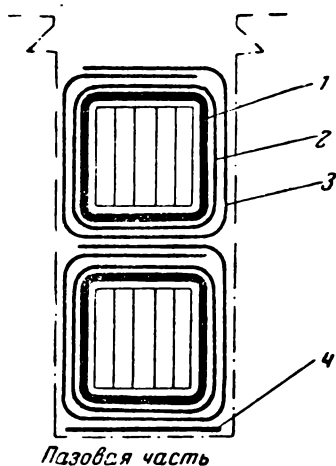
Таблица 2,46

Пазовая часть

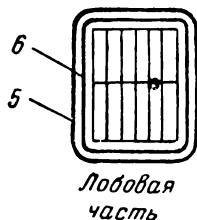
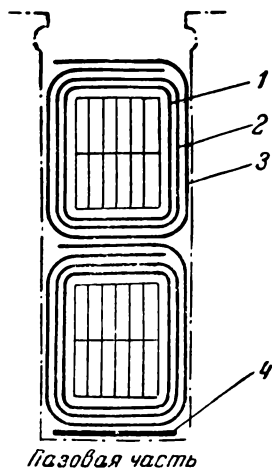
Ссылка на фиг. 2,103	Наименование материалов	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
1	Электрокартон (проходная коробка)	0,20	1 1/4	0,40	0,60
2	Лакоткань хлопчатобумажная	0,20	1 1/4	0,40	0,60
3	Электрокартон (вкладка паза)	0,20	1 1/4	0,40	0,60
4	Электрокартон (прокладка между катушками)	0,5	1	—	0,50
	Суммарный размер изоляции в пазу (без витковой изо- ляции)	—	—	1,20	2,30



Фиг. 2, 104.



Фиг. 2, 105.



Фиг. 2, 106.

Таблица 2,47

**Изоляция класса А. Нормальное исполнение. Напряжение до 500 в
Мощность до 100 квт**

Ссылка на фиг. 2,104	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
Пазовая часть					
1	Лакоткань вокруг каждой стороны катушки (пере- крой сбоку)	0,20	2 ¹ / ₂	1,00	0,8×2
2	Хлопчатобумажная лента	0,20	1 слой	0,40	0,40×2
	Пропитка в лаке и раз- бухание	—	впритык	0,20	0,2×2
3	Электрокартон (выкладка паза)	0,2—0,3	1	0,40	0,60
4	Электрокартон (проклад- ка под бандажем) . . .	0,50	1	—	0,50
5	Электрокартон (проклад- ка между секциями) . .	0,30	1	—	0,30
6	Электрокартон (проклад- ка на дне паза)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изо- ляции в пазу (без вит- ковой изоляции)	—	—	2,00	4,50
Лобовая часть					
7	Хлопчатобумажная лента	0,20	1 слой	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	в полно- хлеста	0,50	0,50
	Суммарный размер изоля- ции секции (без витко- вой изоляции)	—	—	1,30	1,30

шаются влагостойкость, нагревостойкость и теплопроводность изоляции, а также несколько улучшается заполнение паза.

У якорей с изоляцией класса В лакоткань (или лакошелк) в пазовой части должна быть заменена гибким миканитом или же нагревостойкой стеклолакотканью соответствующей толщины. Прокладки между катушками в пазовой и лобовой частях должны быть из миканита или микакартона. Если необходи-

Таблица 2,48

Изоляция класса В. Нормальное исполнение. Напряжение до 500 в.
Длина пазовой части секции до 300 мм. Мягкая гильза

Ссылка на фиг. 2,104	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщи- на изоляции в мм	
				по высоте паза	по ширине паза
	Пазовая часть				
1	Гибкий миканит с под- ложками (микабумага) .	0,20	2½	1,0	0,80×2
2	Хлопчатобумажная лента	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40×2
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—		—	0,20
3	Электрокартон (выкладка паза)	0,2—0,3	1	0,40	0,60
4	Электрокартон (проклад- ка под бандаж)	0,5	1	—	0,50
5	Миканит (прокладка меж- ду секциями)	0,30	1	—	0,30
6	Электрокартон (на дне паза)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изоляции в пазу (без витковой изоляции) . .	—	—	2,00	4,50
	Лобовая часть				
7	Хлопчатобумажная или стеклянная лента . . .	0,20	1 слой вполна- хлеста	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и раз- бухание	—	—	0,50	0,50
	Суммарный размер изоляции секций (без- витковой изоляции) . .	—	—	1,30	1,30

ма изоляция классов ВС и СВ, то для изоляции якорной обмотки необходимо применять стеклослюдяные материалы, изготовленные на нагревостойких лаках. Для клина в этом случае должен применяться стеклотекстолит или асбобакелит.

2. Якоря с открытым пазом и шаблонными секциями (стержневыми и катушечными). Для якорных обмоток, состоящих из шаблонных секций, применяются следующие основные типы конструкций изоляции:

Таблица 2,49

Изоляция класса В. Нормальное исполнение. Напряжение до 500 в.
Твердая микафолиевая гильза

Ссылка на фиг. 2,105	Наименование материала	Толщина материала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщи- на изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микафолый ММ или МФ	0,20	2 1/3 оборота	1,00	0,80×2
2	Телефонная лакированная бумага	0,07	1 1/2 оборота	0,21	0,14×2
3	Электрокартон (вокруг каж- дой стороны секции)	0,20	1	0,40	1,20
4	Электрокартон (на дне паза)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изоляции в пазу . . .	—	—	1,61	3,38
	Лобовая часть				
5	Хлопчатобумажная или стеклянная лента . . .	0,20	1 слой вполнах- леста	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
	Суммарный размер изоляции секций . . .	—	—	1,30	1,30

Тип I, класс А. В пазовой части обертка из лакоткани толщиной 0,15—0,20 мм. По всей длине секции хлопчатобумажная лента; в пазовой части впритык, в лобовой — вполнахлеста.

Тип I, класс В. В пазовой части обертка из гибкого миканита с подложками (микобумага) толщиной 0,20—0,25 мм (мягкая гильза). По всей длине секции хлопчатобумажная, асбестовая или стеклянная лента (в зависимости от перегрева обмотки); в пазовой части впритык, в лобовой — вполнахлеста. Углы в некоторых случаях имеют дополнительную изоляцию из микаленты.

Тип II, классы А и В. На пазовой части твердая микафолиевая гильза. Лобовые части обычно изолируются хлопчатобумажной или стеклянной (для класса В) лентой вполнахлеста, а при усиленной изоляции — микалентой толщиной

Таблица 2,50

**Изоляция класса В. Нормальное исполнение. Напряжение 500 — 1 000 в.
Твердая микафолиевая гильза**

Ссылка на фиг. 2,105	Наименование материалов и допуски	Толщина ма- териала в мм	Число слоев	Двухсторонняя тол- щина изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микафолий ММ или МФ . .	0,20	3 1/2 оборота	1,40	1,60 × 2
2	Телефонная лакированная бумага	0,07	1 1/2 оборота	0,21	0,14 × 2
3	Электрокартон ЭВП (вокруг каждой стороны секции)	0,20	1	0,40	1,20
4	Электрокартон (на дне па- за)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изоляции в пазу (без витковой)	—	—	2,01	4,98
	Лобовая часть				
6	Микалента ЛМЧ или ЛЧФ	0,13	1 слой впол- нахлеста	0,52	0,52
5	Хлопчатобумажная или сте- клянная лента	0,20	То же	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
	Суммарный размер изоляции секций (без витковой)	—	—	1,82	1,82

0,13—0,15 мм вполнахлеста, и сверху пропитанной хлопчатобумажной лентой вполнахлеста.

Тип III, класс В. Микалентная непрерывная изоляция. Сверху микаленты хлопчатобумажная или стеклянная лента: в пазовой части впритык, в лобовой — вполнахлеста.

В табл. 2,47—2,52 и фиг. 2,104, 2,105 и 2,106 приведены конструктивные данные по наиболее применяемым типам изоляции якорных шаблонных обмоток машин постоянного тока напряжением до 1 000 в (вкл.).

Для якорных обмоток с изоляцией классов ВС и СВ необходимо применять стекловолокнистую и стеклослюдяную изоляцию на нагревостойких лаках.

Таблица 2,51

Изоляция класса В. Нормальное исполнение. Напряжение до 500 в.
Непрерывная микалентная изоляция

Ссылка на фиг. 2,106	Наименование материалов	Толщина мате- риала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщй- на изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микалента ЛЧМ или ЛЧФ	0,13	2 слоя впол- нахлеста	1,04	1,04 × 2
2	Хлопчатобумажная лента	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
3	Пропитка в лаке и разбуха- ние	—	—	0,20	0,20 × 2
	Электрокартон (вокруг ка- ждой стороны секции) . .	0,20	1	0,40	1,20
4	Электрокартон (на дне паза)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изоляции в пазу (без витковой)	—	—	2,04	4,78
	Лобовая часть				
5	Лента хлопчатобумажная или стеклянная	0,20	1 слой впол- нахлеста	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
	Суммарный размер изоляции секций (без витковой изоляции)	—	—	1,30	1,30

Для изоляции обмотки от проволочных бандажей, накладываемых на лобовые части обмотки, а иногда и на корпус якоря (при отсутствии пазовых клиньев), обычно применяется несколько слоев электрокартона толщиной 0,3—0,5 мм. Ширина изоляции под бандажом при рабочих напряжениях до 500 в должна быть более общей ширины бандаж на 10—15 мм, так чтобы изоляция выступала с обеих сторон бандаж на 5—7,5 мм.

У машин с влагостойкой изоляцией класса В, а также у особо ответственных крупных машин, под бандаж прокладываются изоляция, состоящая из гибкого миканита толщиной 0,5 мм (снизу) и электрокартона толщиной 0,3—0,5 мм. Полоски миканита и электрокартона накладываются встык со смещением стыков. Если на якорную обмотку накладывается

Таблица 2,52

Изоляция класса В. Нормальное исполнение. Напряжение 500—1 000 в.
Непрерывная микалентная изоляция

Ссылка на фиг. 2,105	Наименование материала	Толщина мате- риала в мм	Число слоев	Двухсторонняя толщи- на изоляции в мм	
				по ширине паза	по высоте паза
	Пазовая часть				
1	Микалента ЛЧМ или ЛЧФ	0,13	3 слоя впол- нахлеста	1,56	1,56 × 2
2	Хлопчатобумажная лента	0,20	1 слой впритык	0,40	0,40 × 2
	Пропитка в лаке и разбуха- ние	—	—	0,20	0,20 × 2
3	Электрокартон (вокруг ка- ждой стороны секции) . .	0,20	1	0,40	1,20
4	Электрокартон (на дне па- за)	0,30	1	—	0,30
	Суммарный размер изоляции в пазу (без витковой)	—	—	2,56	5,82
	Лобовая часть				
6	Микалента ЛЧМ или ЛЧФ	0,13	1 слой впол- нахлеста	0,52	0,52
5	Лента хлопчатобумажная или стеклянная	0,20	1 слой впол- нахлеста	0,80	0,80
	Пропитка в лаке и разбу- хание	—	—	0,50	0,50
	Суммарный размер изоляции секций (без витковой изоляции)	—	—	1,82	1,82

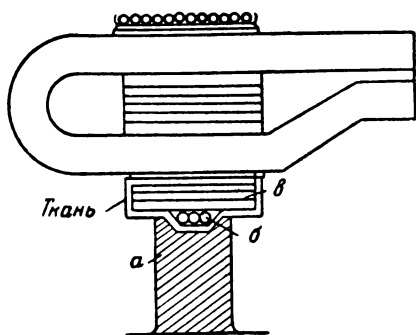
многослойный проволочный бандаж, то для избежания сильных нагревов бандаж от вихревых токов между слоями прокладывается асбестовая ткань.

Выбор типа изоляции для якорных обмоток производится на основании тех же соображений, которые были приведены для статорных катушек низковольтных машин переменного тока (см. § 2,3—2,5).

2,22. Изоляция обмоткодержателей якорей машин постоянного тока

Конструктивное выполнение изоляции обмоткодержателей зависит от формы обмоткодержателей, а выбор материалов для изоляции обмоткодержателей определяется главным образом классом и исполнением изоляции, а также рабочим напряжением.

На фиг. 2,107 приведена конструкция нормальной изоляции класса А обмоткодержателя *a* задней стороны якоря напряжением до 1 000 в. Поверхность обмоткодержателя перед наложением изоляции покрывается битумномасляным лаком типа 462-п или пигментированной эмалью типа СВД или КВД. Затем на наружную



Фиг. 2,107.

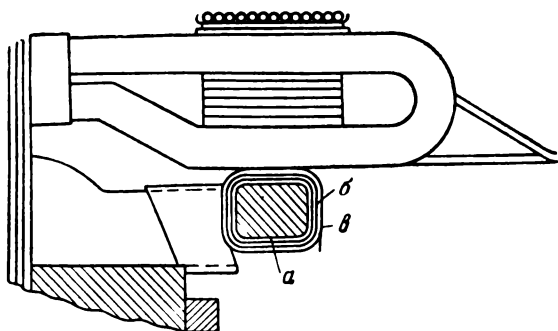
поверхность обмоткодержателя накладывается полоска хлопчатобумажной ткани шириной немного больше тройной ширины обмоткодержателя так, чтобы ткань свисала одинаковой ширины с обеих сторон. Эта полоска ткани укрепляется шпагатом *б*, который располагается в выточке обмоткодержателя. Часть ткани, лежащая на ободу, и шпагат смазываются лаком. Поверх ткани и шпагата накладываются полоски электрокартона *в* толщиной 1—2 мм и шириной на 10—15 мм более ширины обмоткодержателя. После наложения каждого слоя электрокартона производится промазка лаком.

Общая толщина полосок электрокартона, накладываемого на обмоткодержатель, определяется из конструктивных соображений. Наложённый на обмоткодержатель электрокартон смазывается сверху и с боков лаком, после чего ткань, предварительно подрезанная по ширине в 6—8 местах с обеих сторон, загибается на электрокартон и тщательно выравнивается.

Иногда сверху накладывается скрепляющая хлопчатобумажная лента, которая покрывается лаком.

Конструкция изоляции обмоткодержателя передней стороны якоря дана на фиг. 2,108. В этом случае после покрытия поверхности обмоткодержателя *a* лаком он обматывается четырьмя-пятью слоями хлопчатобумажной ленты *б* и затем одним слоем лакотканевой ленты *в* толщиной 0,20—0,30 мм вполнахлеста.

В машинах с изоляцией класса В и влагостойкого исполнения для изоляции обмоткодержателей должна применяться миканитовая изоляция.



Фиг. 2,108.

2,23. Изоляция коллекторов машин постоянного тока

В коллекторах машин постоянного тока различают: изоляцию между отдельными медными пластинами и изоляцию всех коллекторных пластин относительно корпуса. Учитывая особые условия работы изоляции между пластинами (наличие электрических искр, повышенных температур и давлений), а также применение значительных нагревов коллектора при опрессовке и пайке, для изоляции между пластинами применяется специальный сорт миканита — коллекторный.

В малых коллекторах обычно применяется коллекторный миканит толщиной 0,4—0,5 мм. В крупных коллекторах толщина миканита достигает 1,0—1,5 мм и выше. Если не производится продоразживания коллекторного миканита, то необходимо применять более мягкий коллекторный миканит на флогопите (марка КФ). Для продоразживаемых коллекторов возможно применение как мусковитного (марка КМ), так и флогопитного (марка КФ) коллекторного миканита. В последнее время имеется стремление заменить коллекторный миканит более дешевыми и менее дефицитными материалами на основе асбестовой бумаги и специальных лаков.

Для изоляции коллекторных пластин относительно корпуса в настоящее время применяются два основных типа изоляции — миканитовая и пластмассовая (последняя для небольших коллекторов).

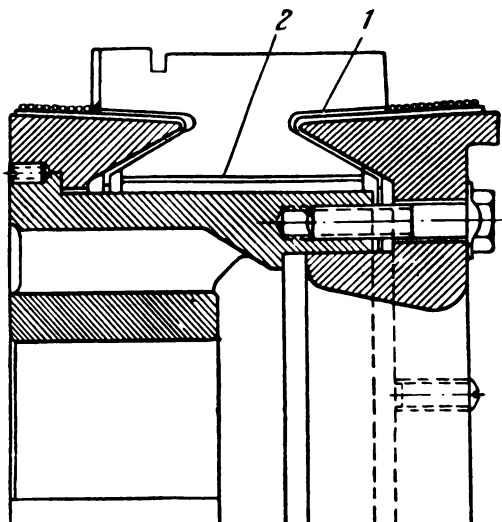
На фиг. 2,109 показана миканитовая изоляция коллекторных пластин относительно корпуса. В этом случае коллекторные пластины, стянутые между двумя конусными кольцами, изолированы относительно корпуса фасонными конусными ми-

канитовыми кольцами-манжетами 1. Кроме того, между цилиндрической частью корпуса коллектора и коллекторными пластинами имеется цилиндрическая миканитовая прокладка 2. Манжеты и цилиндр изготавливаются из формовочного миканита. У крупных коллекторов манжеты делаются составными. Толщина миканитовых конусов зависит от размеров коллектора, скорости вращения, а также рабочего напряжения, и обычно лежит в пределах от 0,5 до 2—3 мм. Как показывает опыт, для некоторых коллекторов возможна частичная замена миканита в манжетах асбестовой бумагой или даже целлюлозной лакированной бумагой.

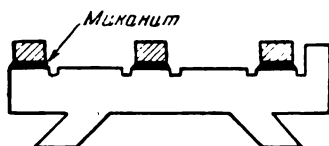
В крупных коллекторах быстроходных машин применяются стягивающие кольца, которые изолируются от коллектора прокладками из формовочного миканита (фиг. 2,110).

Для изоляции небольших коллекторов (диаметром до 50—80 мм) относительно корпуса в настоящее время широко применяются специальные теплостойкие пластмассы (типа К-6 и др.).

В быстроходных коллекторах в этом случае для увеличения механической прочности коллектора в пластмассу запрессовываются два стальных кольца.



Фиг. 2,109.



Фиг. 2,110.

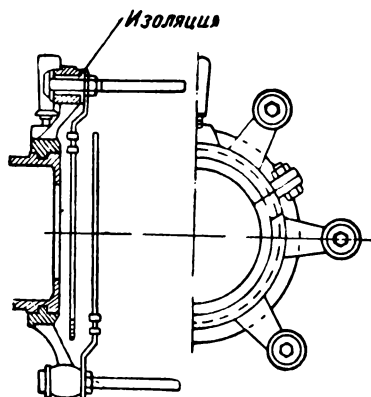
2,24. Изоляция щеткодержателей машин постоянного тока

Конструкция изоляции щеткодержателей зависит от общей конструкции щеткодержательной системы.

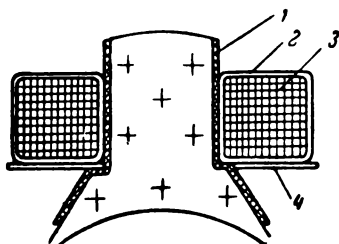
В малых машинах постоянного тока, где угольные щетки вставляются в трубочки, обычно применяется пластмассовая или же бумажнобакелитовая изоляция.

В более крупных машинах, где щеткодержатели крепятся на прямоугольных штырях, применяется гетинакс или текстолит.

В машинах, где щетки расположены на отдельных пальцах, закрепленных в траверзе (фиг. 2,111), применяются гетинаксовые или миканитовые втулки и шайбы.



Фиг. 2,111.



Фиг. 2,112.

помещается на полюс (фиг. 2,118). Последний тип изоляции применяется главным образом в тяговых электромоторах.

В небольших машинах, где обычно применяется тип I изоляции, полюс обертывается электрокартоном, лакотканью или же гибким миканитом (с бумажной или тканевой подложкой). Толщина изоляции при напряжениях до 550 в составляет 0,6—1,0 мм (на сторону). Для машин постоянного тока с нагревостойкой и влагостойкой изоляцией применяется миканизация полюсов формовочным миканитом (фиг. 2,112). Толщина миканитовой опрессовки 1 при этом составляет около 1,0—1,5 мм (на сторону). Ниже приведены типовые конструкции изоляции классов А и В главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока, напряжением до 550 в и мощностью до 100 кВт, нормального исполнения (табл. 2,53—2,58 и фиг. 2,114—2,116) применительно к различным вариантам количества катушек на полюсе.

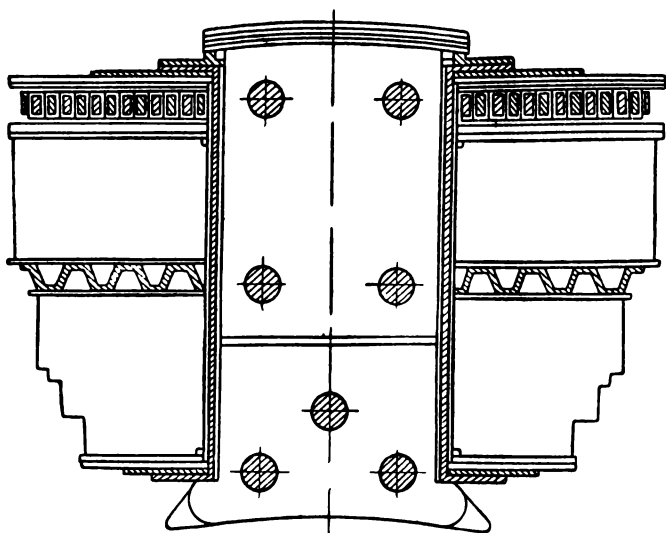
2,25. Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока

В настоящее время применяются три основных типа изоляции катушек главных и дополнительных полюсов относительно корпуса:

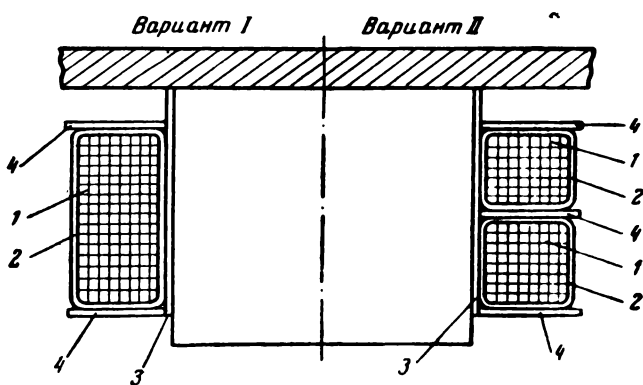
Тип I. Катушка 3, скрепленная лентой 2, помещается на предварительно изолированный полюс 1 (фиг. 2,112).

Тип II. Катушка, скрепленная лентой, помещается или наматывается на предварительно изолированный металлический или же пластмассовый каркас (фиг. 2,113).

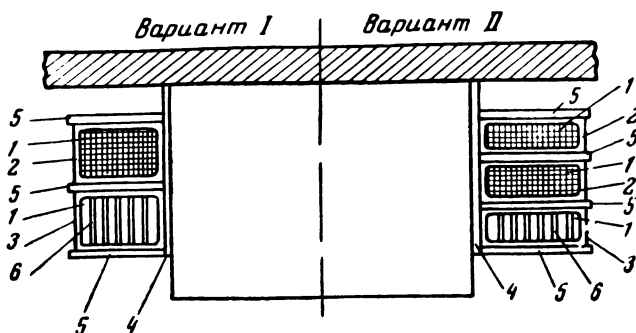
Тип III. Катушка изолируется лакотканевой лентой или микалентой, а сверху защищается хлопчатобумажной, асбестовой или стеклянной лентой (в зависимости от класса изоляции) и в таком виде помещается на полюс (фиг. 2,118).



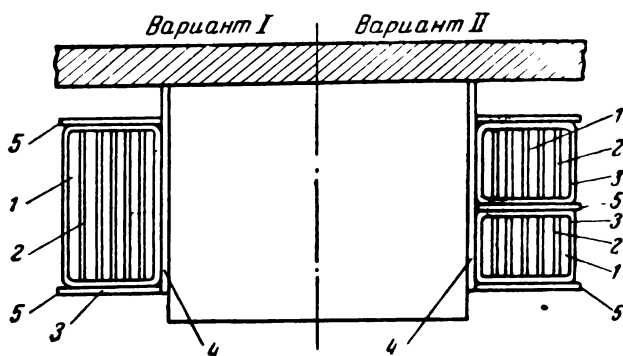
Фиг. 2, 113.



Фиг. 2, 114.



Фиг. 2,115.



Фиг. 2,116.

Таблица 2,53

Исполнение нормальное. Внутренний диаметр станины от 150 до 850 мм. Класс изоляции А. Провод изолированный. Конструкция изоляции фиг. 2,114.

Ссылка на фиг. 2,114	Наименование материала	Толщина изоляции при внутреннем диаметре станины, мм	
		от 150 до 350 мм	от 350 до 850 мм
1	Обмоточный провод с изоляцией класса А	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Лента хлопчатобумажная	0,20×2	0,20×2
3	Электрокартон лакированный вокруг сердечника полюса общей толщиной	1,0	1,20
4	Рамка из пропитанного электрокартона	1,5	—
4	Рамка из гетинакса	—	2,0

Таблица 2,54

Исполнение нормальное. Внутренний диаметр от 150 до 850 мм. Класс изоляции А. Провод изолированный и голый. Конструкция—фиг. 2,115.

Ссылка на фиг. 2,115	Наименование материала	Толщина изоляции при внут- реннем диаметре, мм	
		от 150 до 350 мм	от 350 до 850 мм
1	Обмоточный провод с изоляцией класса А или голый	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Лента хлопчатобумажная	0,20×2	0,20×2
3	Лента киперная	0,45×2	0,45×2
4	Электрокартон лакированный во- круг сердечника полюса	1,0	1,20
5	Рамка из пропитанного электрокар- тона	1,50	—
5	Рамка из гетинакса	—	2,00
6	Электрокартон пропитанный	0,20	0,20

Таблица 2,55

Исполнение нормальное. Внутренний диаметр станины от 150 до 850 мм. Класс изоляции А. Провод голый. Конструкция—фиг. 2,116.

Ссылка на фиг. 2,116	Наименование материала	Толщина изоляции при внут- реннем диаметре, мм	
		от 150 до 350	от 350 до 850
1	Шинная или ленточная медь	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Электрокартон пропитанный	0,20	0,20
3	Лента киперная	0,45×2	0,45×2
4	Электрокартон лакированный во- круг сердечника полюса	1,00	1,20
5	Рамка из пропитанного электрокар- тона	1,50	—
5	Рамка из гетинакса	—	2,00

Таблица 2,56

Исполнение нормальное, Внутренний диаметр станины от 150 до 850 мм. Классы изоляции В и ВС. Провод изолированный. Конструкция—фиг. 2,114.

Ссылка на фиг. 2,114	Наименование материала	Толщина изоляции при внут- реннем диаметре, мм	
		от 150 до 350	от 350 до 850
1	Обмоточный провод с изоляцией класса В	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Стеклолента 0,1 мм	0,1×2	0,1×2
3	Миканит вокруг полюса общей тол- щиной	0,80	1,00
4	Рамка из стеклотекстолита	1,50	2,00

Таблица 2,57

Исполнение нормальное. Внутренний диаметр станины от 150 до 850 мм. Классы изоляции В и ВС. Провод изолированный и голый. Конструкция изоляции фиг. 2,115.

Ссылка на фиг. 2,115	Наименование материала	Толщина изоляции при внут- реннем диаметре, мм	
		от 150 до 350	от 350 до 850
1	Обмоточный провод с изоляцией класса В или голый	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Стекланная лента	0,10×2	0,10×2
3	То же	0,20×2	0,20×2
4	Миканит вокруг полюса общей тол- щиной	0,80	1,00
5	Рамка из стеклотекстолита	1,5	2,00
6	Асбестовая бумага пропитанная . .	0,20	0,20

Таблица 2,58

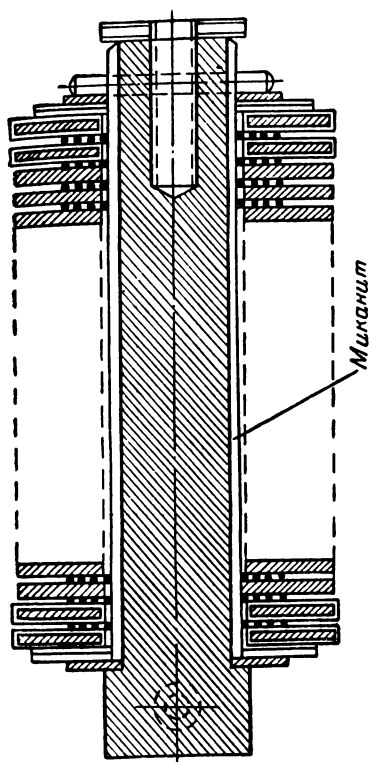
Исполнение нормальное. Внутренний диаметр статора от 150 до 850 мм. Классы изоляции В и ВС. Провод голый. Конструкция изоляции фиг. 2,116.

Ссылка на фиг. 2,116	Наименование материала	Толщина изоляции при внут- реннем диаметре, мм	
		от 150 до 350	от 350 до 850
1	Голая шина	По ГОСТ	По ГОСТ
2	Асбестовая бумага пропитанная . .	0,20	0,20
3	Лента стекланная 0,20 мм	0,20×2	0,20×2
4	Миканит вокруг полюса общей тол- щиной	0,80	1,0
5	Рамка из стеклотекстолита	1,50	2,0

При изоляции типа II, применяемой для шунтовых катушек крупных машин, металлический каркас, изготовленный из листовой стали толщиной 1—2 мм, изолируется тремя-пятью слоями электрокартона толщиной 0,3—0,5 мм и шайбами из электрокартона общей толщиной 2,0—2,5 мм. В местах стыка шайб из электрокартона с изоляцией стенок каркаса для увеличения электрической прочности прокладываются согнутые под прямым углом полоски лакоткани либо кладется виток шпагата. Выводные пластины изолируются лакотканью и хлопчатобумажной лентой. Для получения нагревостойкой изоляции каркас изолируется миканитом в сочетании с асбестовой бумагой или стекланной тканью.

При применении секционированных катушек между отдельными секциями прокладываются гетинаксовые, текстолит-

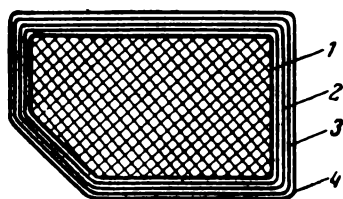
товые или же металлические распорки. В последнем случае между секциями прокладываются рамки из электрокартона, гетинакса, миканита или стеклотекстолита в зависимости от исполнения и класса изоляции. Для катушек добавочных полюсов крупных машин постоянного тока изоляция накладывается непосредственно на сердечник полюса. При этом полюс обертывается четырьмя-шестью слоями электрокартона толщиной 0,3—0,5 мм, а с торцов прокладываются металлические и изоляционные рамки (из электрокартона или гетинакса).



Фиг. 2,117.

В случае нагревостойкой изоляции сердечник полюса миканизируется (фиг. 2,117), а для рамок применяется миканит или стеклотекстолит.

Конструкция изоляции типа III и класса А для магнитных катушек из круглой или прямо-



Фиг. 2,118.

угольной меди машин постоянного тока напряжением до 3 000 в приведена на фиг. 2,118, а толщины — в табл. 2,59.

Для класса В в этом случае применяется изоляция, приведенная на фиг. 2,119 и в табл. 2,60.

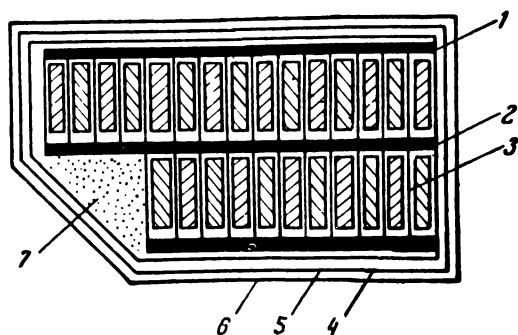
Известно, что между катушками и магнитным сердечником всегда имеется некоторый воздушный зазор. Ввиду малой теплопроводности воздуха этот воздушный зазор препятствует рассеянию тепла через магнитный сердечник. На фиг. 2,120 приведена кривая, показывающая зависимость допустимых для катушки тепловых потерь от величины воздушного зазора между катушкой и сердечником. На основании анализа этой кривой можно прийти к выводу, что для существенного увеличения теплоотдачи к сердечнику необходимо совершенно исключить воздушный зазор, так как даже при

Таблица 2,59

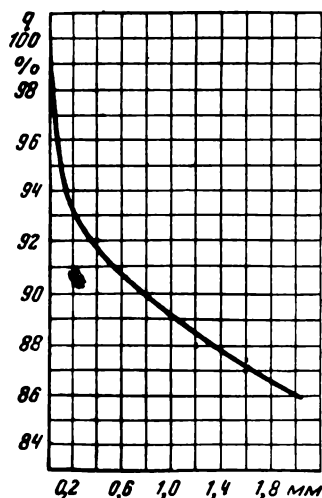
Ссылка на фиг. 2,118	Наименование мате- риала	Толщина ма- териала в мм	110—750 в		800—1 650 в		2 400—3 000 в	
			Число слоев	Толщина изоляции в мм	Число слоев	Толщина изоляции в мм	Число слоев	Толщина изоляции в мм
1	Лента хлопчато- бумажная	0,20	1 слой вполнах- леста	0,40	1 слой вполнах- леста	0,40	1 слой вполнах- леста	0,40
2	Микалента ЛЧМ или ЛЧФ	0,13	То же	0,26	То же	0,26	То же	0,26
3	Лента хлопчато- бумажная	0,20	2 слоя вполнах- леста	0,80	3 слоя вполнах- леста	1,80	5 слоев вполнах- леста	3,00
4	Лента киперная	0,40	1 слой вполнах- леста	0,80	1 слой вполнах- леста	0,80	1 слой впритык и 1 слой вполнах- леста	1,20
—	Лак и компаун- дировка	—	—	0,80	—	0,80	—	0,8
	Итого на сторону	—	—	3,06	—	4,06	—	5,66

небольших толщинах (0,2—0,5 мм) он сильно снижает допустимые потери в катушке.

Наилучшим способом, примененном на заводах «Электрик» и ХЭМЗ,



Фиг. 2,119.



Фиг. 2,120.

является заполнение воздушного зазора между катушкой и сердечником «кварцкомпаундом». Этот материал представляет собой обычный битум, смешанный с чистым

Таблица 2,60

Ссылка на фиг. 2,119	Наименование материала	Толщина материала в мм	110—750 в		800—1 650 в		2 400—3 000 в	
			Число слоев	Толщина изоляции по высоте в мм	Число слоев	Толщина изоляции по высоте в мм	Число слоев	Толщина изоляции по высоте в мм
1	Миканит (фланцы)	0,50	1	0,8	1	0,50	1	0,50
2	Асбомиканит	1,50	1	—	1	—	1	—
3	Миканит	0,20	1	—	1	—	1	—
7	Замазка	—	—	—	—	—	—	—
4	Асбестовая лента	0,40	1 слой впритык	0,40	1 слой впритык	0,40	1 слой впритык	0,40
5	Микалента	0,13	3 слоя вполнах- леста	0,78	5 слоев вполнах- леста	1,30	6 слоев вполнах- леста	1,56
6	Лента киперная	0,40	1 слой вполнах- леста	0,80	1 слой впритык и 1 слой вполнах- леста	1,20	1 слой впритык и 1 слой вполнах- леста	1,20
	Лак и компаундировка	—	—	0,80	—	0,80	—	0,80
	Итого на сторону для корпусной изоляции . .	—	—	3,58	—	4,2	—	4,46

кварцевым песком. Так как кристаллы кварца обладают значительно большей теплопроводностью, чем аморфные материалы, то наполнение битума зернами песка значительно улучшает его теплопроводность.

При изготовлении на ХЭМЗ опытных машин постоянного тока типа ПН17,5 все промежутки между катушкой и миканизованным сердечником заполнялись прокаленным песком, пропущенным последовательно через сита № 10 и № 32.

В процессе компаундирования промежутки между кварцевым песком заполняются битумом; при этом создается монолитная, хорошо теплопроводящая изоляция.

Тепловые испытания машин показали возможность для катушек с такой конструкцией изоляции повысить греющие потери при неподвижном якоре на 30—40%.

Значительное увеличение допускаемых греющих потерь шунтовых катушек машин постоянного тока при применении кварц-компаунда позволяет в ряде случаев снизить габариты

и веса машин, а также обеспечить высокую интенсивность работы электропривода в условиях кратковременноповторного режима.

2,26. Изоляция внутримашинных соединений и выводов машин постоянного тока

В тех случаях, когда для внутримашинных соединений необходим изолированный провод, следует применять провод с резиновой изоляцией марки ПРГ (или ПРГМ для машин морского исполнения).

Выводные щитки и коробки машин постоянного тока изготавливаются из гетинакса, текстолита или же пластмассы. В машинах с теплостойкой изоляцией для внутримашинных соединений следует применять гибкие провода, изолированные локотканью, стеклолокотканью, микалентой или стекломикалентой. Сверху накладывается хлопчатобушажная, асбестовая или стеклянная лента в зависимости от температуры внутри машины.

В машинах влагостойкого исполнения провода марки ПРГМ желательно покрывать специальным лаком и производить заделку концов изоляции лакошелком.

2,27. Изоляция магнитопроводов

Для уменьшения потерь от вихревых токов в магнитопроводах необходимо изолировать между собой отдельные листы электротехнической стали, из которой собираются магнитопроводы электрических машин.

В малых машинах изоляцией между листами обычно служит слой окислов железа, который всегда имеется на поверхности листов электротехнической стали. В машинах средних и крупных габаритов и особенно в турбогенераторах слой естественных окислов на поверхности листов оказывается недостаточным, и приходится применять специальную изоляцию листов, разделять магнитопроводы на пакеты и прокладывать между ними дополнительную изоляцию из листов электрокартона. Болты и шпильки, проходящие через магнитопроводы, также должны быть надежно изолированы по всей длине и под головками.

К изоляционному слою, находящемуся между отдельными листами электротехнической стали, предъявляются следующие основные требования:

1. Толщина изоляционного слоя должна быть минимальной, с тем чтобы иметь высокое заполнение магнитопроводов (сердечников).

2. Изоляционный слой должен обладать большой механической прочностью и твердостью, достаточной эластичностью

и не повреждаться при сборке магнитопроводов, а также при их прессовке.

3. Изоляционный слой должен обеспечивать необходимую величину сопротивления перпендикулярно листам пакета магнитопровода.

4. Изоляционный слой должен обладать достаточно высокой нагревостойкостью и влагостойкостью, а для машин, предназначенных для работы на химических производствах, также стойкостью против кислот и щелочей.

5. При длительной работе машины в условиях эксплуатации не должно происходить ухудшения основных свойств изоляционного слоя.

6. Материалы, применяемые для изоляции, должны быть дешевыми и доступными, а способ нанесения изоляционного слоя на листы или вырубки — простым и высокопроизводительным.

В настоящее время применяются следующие способы изолировки листов электротехнической стали в машинах.

О к с и д и р о в а н и е. Применение дополнительного отжига вырубок после штамповки позволяет получить дополнительный слой окислов, который имеет более высокое сопротивление по сравнению с металлом листа. Этот способ может быть применен для машин средних габаритов.

Покрывание листов неорганической изоляцией. При этом способе вырубки со снятыми заусенцами помощью пульверизатора покрываются суспензией, состоящей из каолина и жидкого стекла. Затем вырубки сушатся в печи, где изоляционный слой отвердевает и приобретает характер эмали.

Основным достоинством неорганической изоляции является высокая нагревостойкость. Вместе с тем этот способ имеет и ряд существенных недостатков, к которым относятся хрупкость и низкая влагостойкость. Следует предостеречь от применения для изоляции листов жидкого стекла без добавок из-за его высокой гигроскопичности, особенно для машин, которые будут находиться в атмосфере с повышенной влажностью.

Оклейка бумагой. Этот наиболее старый способ сохранился на некоторых заводах и до настоящего времени.

Для оклейки применяется специальная тонкая бумага по ГОСТ 1201-41, которая наклеивается на листы или вырубки с помощью клея (крахмального, рыбьего, жидкого стекла и др.). Оклейка листов электротехнической стали бумагой производится на специальных машинах. Скорость оклейки около 1,6—2,0 м/мин.

К недостаткам этого метода, ограничивающим его применение в настоящее время, относятся:

1. Относительно большая толщина изоляционного слоя, при

котором коэффициент заполнения магнитопроводов не превосходит 0,86—0,90 при толщине листов стали 0,5 мм.

2. Гигроскопичность изоляционного слоя. В сырых помещениях оклеенные бумагой листы покрываются ржавыми пятнами, и бумага легко отслаивается.

3. Бумажная изоляция легко повреждается при сборке и прессовке магнитопроводов.

Покрытие листов стали лаками или эмалями. Это наиболее совершенный способ изолировки, позволяющий получить тонкое, механически прочное и эластичное покрытие листов, обладающее влагостойкостью и высокими диэлектрическими свойствами. Он широко применяется на советских электромашиностроительных заводах как для машин средних габаритов, так и для крупных машин и турбогенераторов, где к изоляционному слою предъявляются особо высокие требования.

Покрытие лаками обычно производится после штамповки и снятия заусенцев, хотя для малых машин допустима лакировка листов и до штамповки.

Для лакировки вырубок обычно применяются специальные машины, обеспечивающие высокую производительность процесса лакировки и сушки.

2,28. Общие соображения по выбору изоляции в электрических машинах

Имеющийся в настоящее время опыт по применению в электрических машинах разных электроизолирующих материалов, а также различных конструктивных и технологических исполнений изоляции, позволяет высказать некоторые общие соображения по выбору изоляции для основных типов машины с учетом ее исполнения, конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

1. Низковольтные машины нормального исполнения с изоляцией класса А.

Витковая изоляция—эмалевая, хлопчатобумажная, шелковая или комбинированная.

Основная изоляция — лакоткань, лакошелк, синтопленки.

Механически защищающие и скрепляющие основную изоляцию материалы—электрокартон и хлопчатобумажные ленты.

Одно- или двухкратная пропитка в битумномасляных или им подобных лаках.

Лакировка лобовых частей пигментированной эмалью или битумномасляным лаком воздушной сушки.

2. Низковольтные машины влагостойкого исполнения, с изоляцией класса А.

Витковая изоляция—эмалевая, хлопчатобумажная, шелковая, микалентная.

Основная изоляция — миканиты, микафоллий, микаленты.

Механически защищающие и скрепляющие основную изоляцию материалы — пропитанные: электрокартон, бумаги, хлопчатобумажные ленты.

Трехкратная или пятикратная пропитка в битумномасляных, крезольномасляных или им подобных лаках.

Лобовые части покрываются пигментированными эмалями или битумномасляными лаками.

Для микалентной изоляции статорных обмоток следует применять пропитку в битумных компаундах.

3. Низковольтные машины нормального исполнения с изоляцией класса В.

Витковая изоляция — асбест, стекловолокно или микалента.

Основная изоляция — гибкие миканиты с подложками (микобумаги), микафоллий, микалента, стеклоткань, стеклолакотканевая лента.

Механически защищающие и скрепляющие основную изоляцию материалы: электрокартон, бумаги, асбестовые ленты, стеклотенты, хлопчатобумажные ленты.

Одно- или двухкратная пропитка в битумномасляных или им подобных лаках.

Лакировка лобовых частей пигментированной эмалью.

4. Низковольтные машины нормального исполнения с нагревостойкой изоляцией (классы изоляции ВС и СВ).

Витковая изоляция — асбестовая, стекловолокнистая, стеклослюдяная.

Основная изоляция — миканиты, стеклолакоткани, стекломиканиты, стекломикафоллий, стеклослюдяные ленты, асбестовые материалы на специальных нагревостойких лаках (глифталевых, кремнийорганических и им подобных).

Одно- или двухкратная пропитка в специальных нагревостойких лаках (глифталевых, кремнийорганических или им подобных).

Лакировка лобовых частей нагревостойкими пигментированными эмалями.

5. Низковольтные машины с химически стойкой изоляцией.

Витковая изоляция — стекловолокнистая или миканитовая.

Основная изоляция — миканиты, специальные стеклолакоткани, стекломиканиты, стекломикаленты, стекломикафоллий и т. п.

Механически защищающие и скрепляющие основную изоляцию материалы — стекловолокнистые.

Трех- или пятикратная пропитка обмоток в специальных химически стойких лаках или компаундах.

Лакировка лобовых частей обмоток специальными химически стойкими покровными эмалями.

6. Машины напряжением 3 000—3 300 в с изоляцией класса А.

Витковая изоляция — хлопчатобумажная или пленочная, прокладки из электрокартона.

Основная изоляция — синтофолій, синтолента, черная лакоткань.

Скрепляющие и механически защищающие материалы — хлопчатобумажные ленты.

Пропитка в компаундах или многократная пропитка в лаках.

Лакировка лобовых частей обмотки битумномасляными лаками или пигментированной эмалью.

7. Высоковольтные машины напряжением 3 000—16 000 в.

Витковая изоляция синтолента или двойная хлопчатобумажная обмотка с дополнительными прокладками из электрокартона или миканита (для 3 кв), микалента.

Основная изоляция — микафолій (до 6 000 в), микалента.

Механически скрепляющие и защищающие основную изоляцию материалы — хлопчатобумажные и асбестовые ленты, бумаги, электрокартон. При непрерывной микалентной изоляции — компаундировка.

Лакировка лобовых частей обмотки битумномасляным покровным лаком или же пигментированной эмалью.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗОЛИРОВКИ ОБМОТОК И ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Технологические процессы, применяемые при изолировке обмоток и токоведущих частей электрических машин, могут быть разбиты на ряд основных операций, которые и будут рассмотрены в данном разделе.

3.1. Заготовительные операции

Электроизоляционные материалы получают от поставщиков в виде листов, полос, рулонов, роликов и т. п. Перед применением они должны быть соответственно подготовлены: порезаны, отштампованы, склеены, отформованы и т. п. На крупных электромашиностроительных заводах заготовительные операции обычно выделяются из основных и производятся на отдельно отведенных участках.

Резка тонких листовых и рольных материалов производится рычажными, гильотинными или дисковыми ножницами.

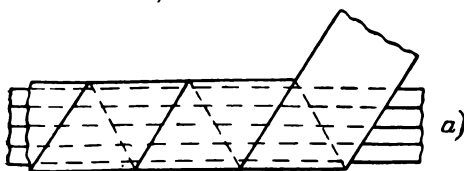
При массовой резке (пачками) миканитовых и асбестовых материалов (например, вырезка рамок) применяется ленточная пила. При этом с обеих сторон пачки кладется фанера или толстый картон и пачка скрепляется гвоздями, после чего производится резка на ленточной пиле.

Ленточные и циркульные пилы применяются для резки толстых листов гетинакса, текстолита, фибры, а также дерева, прутковых и трубчатых изоляционных материалов. Сверление гетинакса и текстолита необходимо производить специальными победитовыми сверлами.

При массовом производстве заготовка лазовых коробочек из электрокартона и наклейка манжет производятся на специальных высокопроизводительных станках.

3.2. Изолировка обмоток лентами

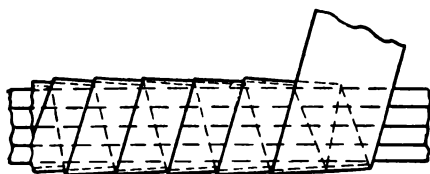
При изолировке обмоток лентами (хлопчатобумажными, шелковыми, стеклянными, асбестовыми, микалентами и др.) применяются следующие методы наложения лент.



а)



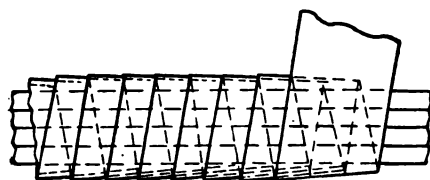
1) Вразбежку, когда между кромками ленты имеется значительный зазор. Этот метод применяется главным образом для совместного скрепления проводников.



б)



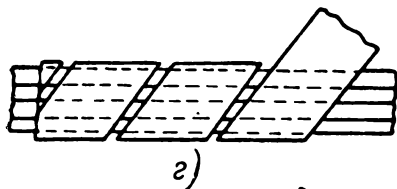
2) Впритык (встык), когда кромка ленты соприкасается по винтовой линии (фиг. 3,1,а). Наложение лент впритык производится главным образом при изолировке пазовых частей обмоток, т. е. там, где необходимо иметь малую толщину изоляции.



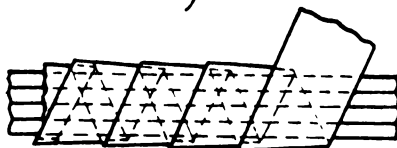
в)



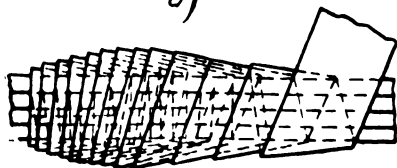
3) Вполнахлеста (вперекрышку на $1/2$), когда кромка верхнего слоя ленты находится по середине нижнего слоя ленты (фиг. 3,1,б). Это наиболее широко применяемый способ наложения изоляционных лент.



г)



д)



е)

4) В $2/3$ нахлеста (вперекрышку на $2/3$), когда верхний слой ленты перекрывает нижний на $2/3$ (фиг. 3,1,в).

Следует отметить, что при неправиль-

Фиг. 3,1.

ной намотке изоляционной ленты могут быть либо просветы изоляции (фиг. 3,1,г), либо попеременно 1 и 2 слоя (фиг. 3,1,д), т. е. потеря места на два слоя и электрическая прочность одного слоя; либо излишние утолщения изоляции, создающие затруднения при укладке обмоток в пазы машины (фиг. 3,1,е).

Наложение изоляционных лент на обмотку производится или ручным методом или же помощью специальных механизмов — лентоизолирующих станков.

При ручном наложении изоляционных лент изолирующая перемещает вручную ролик с лентой вокруг изолируемой детали по спиральной кривой, производя при этом необходимое натяжение ленты. Величина натяжения ленты играет существенную роль, так как при недостаточном натяжении ленты изолировка получается неплотной и поэтому более толстой, плохо теплопроводной и недостаточно электрически прочной. При чрезмерном натяжении лент возможны обрывы.

Ширина ленты выбирается в зависимости от формы и сечения изолируемой части обмотки; на прямых участках накладываются широкие ленты (25—35 мм), на кривых — узкие (10—20 мм). Если катушки, полукатушки или стержни изолируются лакотканевой лентой, то необходимо применять ленты, нарезанные под углом 45° к основе (по диагонали), так как они обладают большей растяжимостью, что обеспечивает плотное прилегание ленты, особенно на углах и в головках катушек.

При изолировке обмоток хлопчатобумажными и шелковыми лентами ленту следует предварительно пропитать в разбавленном битумномасляном лаке (10 ÷ 15%). При применении микалент с тканевыми подложками (например, микашелковых лент) необходимо изолировку производить таким образом, чтобы ткань была сверху, что обеспечивает более плотную и механически прочную изолировку. Если изолировка обмоток ведется широкими лентами (25—30 мм) по всей длине катушки, то на углах и головках необходимо срезать часть ленты по ширине таким образом, чтобы не иметь утолщений на внутренней части закругления. Концы хлопчатобумажных, шелковых, асбестовых и стеклянных лент, применяемых для окончательной изолировки, следует закреплять помощью ниток или же электроизоляционного клея (например, нитроглифталевого).

Иногда при изолировке обмоток лентами (например, лакотканевыми) производится промазка лаками или пигментированными эмалями для связывания отдельных слоев и заполнения зазоров и прослоек. В этом случае при наложении очередного слоя ленты нижний слой промазывается густым лаком или эмалью на длину 150—250 мм и затем производится наложение следующего слоя ленты. При изолировке обмо-

ток лентами, особенно если они имеют небольшую длину, необходимо, чтобы перехлесты концов лент в отдельных слоях не совпадали и не давали бы при этом утолщений (особенно в пазовой части обмоток). Вообще следует избегать стыков, а также концов лент в пазовой части обмоток.

При наложении витковой изоляции витки предварительно отделяются друг от друга и катушка размещается таким образом, чтобы удобнее и легче было изолировать каждый виток. Лучше всего для этого применять специальные станки или стойки.

Ширина микаленты, применяемой для изолировки прямых частей и изгибов катушек, может быть взята из табл. 3,1.

Таблица 3,1

Периметр сечения катушки в мм	Ширина микаленты в мм	
	для изолировки прямых частей	для изолировки лобовых частей
До 50	12—15	12
От 50 до 70	20—25	12—15
Свыше 70	35	20

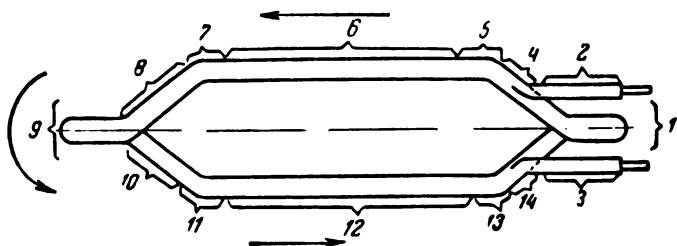
Углы катушек изолируются микалентой шириной 12, 15 или 20 мм. Для изолировки головок следует применять микаленту шириной 10, 12 или 15 мм. Применение более широких микалент ускоряет процесс изолировки; однако при наложении слишком широких лент, особенно на изгибах, углах и в головках, трудно добиться достаточно плотной изолировки.

После устранения дефектов в витковой изоляции катушка устанавливается на специальные подставки или стойки. Изолировка катушек микалентой (с ролика) производится в следующей последовательности:

1. Изолируются выводные концы 2 и 3 (фиг. 3,2).
2. Изолируется головка 1 со стороны выводных концов. Изолировка производится микалентой вполнахлеста, уступами в 10 мм. Сверху изоляция скрепляется хлопчатобумажной лентой.
3. Остальная часть катушки изолируется последовательно в следующем порядке (фиг. 3,2); лобовая часть со стороны выводов 4; переход с лобовой части в пазовую 5, пазовая часть 6, переход с пазовой части в лобовую 7, лобовая часть 8, задняя головка 9, лобовая часть 10, переход с лобовой части в пазовую 11, вторая пазовая часть 12, переход с пазовой части в лобовую 13, лобовая часть 14.

Изолировка микалентой должна производиться в одну сторону. При изолировке катушек микалентой необходимо, чтобы:

- 1) микалента была «сырой», т. е. содержала достаточное количество жидкого, не высохшего лака на поверхности ленты;
- 2) каждый слой микаленты накладывался строго вполнахлеста, так как только в этом случае можно добиться равномерной толщины изоляции;



Фиг. 3,2.

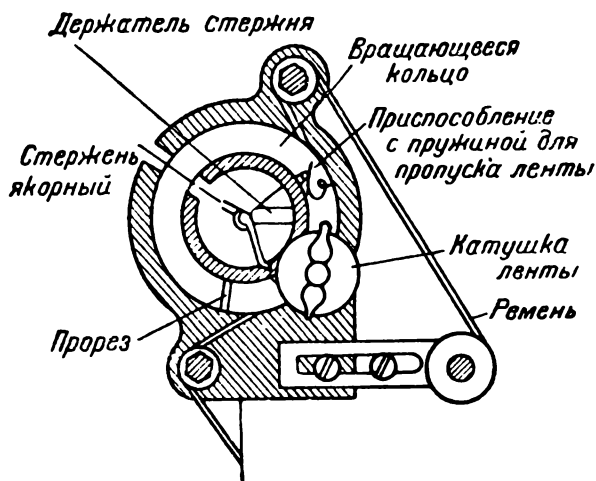
3) микалента накладывалась плотно, что достигается достаточно сильным натяжением каждого оборота микаленты (подтягивание микаленты после ее наложения производится рукой или же помощью вспомогательного куса хлопчатобумажной ленты);

4) при обрывах начало ленты подкладывалось под оборванный конец с нахлестом, не превышающим высоты изолируемой катушки. Нахлест концов следует производить только на широкой стороне катушки.

После намотки последнего слоя катушка передается контролеру, для проверки размеров и плотности намотки. Проверка размеров катушки в пазовой части (по ширине и высоте сечения) производится калибром или штангенциркулем. При обнаружении неплотной намотки катушки должны быть переизолированы. Если катушки изолированы достаточно плотно, но имеют размер, выходящий из допусков, то слой микаленты снимается. Катушки, имеющие малый размер, изолируются дополнительно до необходимых размеров. После приемки контролером катушек изолированных микалентой они изолируются по всей длине хлопчатобумажной лентой (в пазовой части впритык, в лобовой — вполнахлеста) и направляются для компаундирования.

Для статорных обмоток напряжением выше 6 600 в, когда число слоев больше 9—10, наложение микаленты ведется в два и даже три приема. Так, при числе слоев 11—16 вначале накладывается половинное число слоев микаленты, производится компаундирование катушек, затем накладывается остальное число слоев микаленты и снова компаундирование. При числе слоев микаленты от 17 до 21 процесс изолировки ведется в три приема.

Так как ручная изолировка обмоток лентами представляет собой весьма трудоемкий и утомительный процесс, то его стремятся механизировать там, где это только возможно. Для механизированной изолировки лентами стержней, полукатушек и разрезных якорных секций применяется специальный станок, показанный на фиг. 3,3.



Фиг. 3,3.

Наложение ленты на обмотку с помощью изолировочного станка производится следующим образом. Изолируемая часть обмотки помещается внутри вращающегося кольца, на котором укреплены одна или две обоймы с роликами ленты. При вращении кольца помощью ремня ролик с лентой вращается вокруг обмотки, наматывая на нее ленту. Передвигая (от руки) обмотку, в горизонтальном направлении, обеспечивают необходимое перекрытие ленты (вполнахлеста или впритык).

В последнее время на заводах электропромышленности (завод Электросила) применяется механизированное наложение микаленты на витки статорных катушек, а также общей изоляции катушек высоковольтных машин. Это мероприятие позволяет уменьшить ручной труд при изолировке и увеличить производительность при наложении микаленты.

3.3. Изготовление гильзовой изоляции

Для протяжных обмоток применяется целая (неразрезная) гильза, изготавливаемая из электрокартона или микафолия.

Процесс изготовления целой гильзы из электрокартона заключается в следующем. Полоска электрокартона, покрытая частично лаком, обертывается вокруг горячего разборного дор-

на и сверху туго закрепляется хлопчатобумажной лентой и затем прессуется в формах. Иногда на полоску электрокартона предварительно наклеивается один или два слоя слюды для повышения влагостойкости гильзы.

Микафолиевые целые гильзы, для протяжных обмоток овальной формы изготавливаются следующим образом. Горячий разборный дорн плотно оборачивается парафинированной или промасленной бумагой и затем заготовкой из микафолия. Сверху накладывается один — два оборота лакированной бумаги (или тонкого электрокартона) и изоляция туго стягивается слоем киперной ленты. Дорн с наложенной на него изоляцией помещаются в печь с температурой 150—180° С, выдерживаются в ней 30—40 мин., а затем прессуются в формах, с последующим охлаждением до полного остывания.

Более высококачественные микафолиевые гильзы получают при обкатке микафолиевой изоляции горячими утюгами на специальных станках.

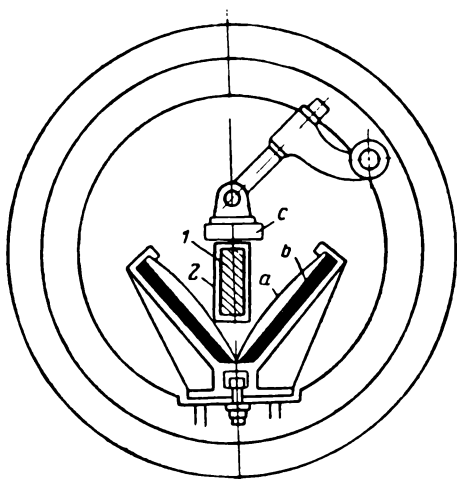
При горячей обкатке гильзы происходит уплотнение изоляции, выдавливание воздуха, плотное склеивание отдельных слоев микафолия, а также удаление растворителей из лака. Горячую гильзу вместе с дорном после обкатки закладывают в пресс и обжимают в охлаждаемой прессформе или между планками. Температура утюгов обычно достигает 180—250° С; время обкатки 10—20 мин. При наложении гильзовой изоляции на катушки, полукатушки или стержневые обмотки может применяться или ручная обутюжка гильзы или же более совершенная, механическая обкатка гильзы. Если производится ручная обутюжка, то катушка ставится широкой стороной на стол и затем накладывается заготовка микафолия на пазовую часть катушки так, чтобы края микафолия доходили до края изоляции уголка. Затем горячим электрическим утюгом микафолий приглаживается к широкой стороне катушки. Вслед за движением утюга микафолий разглаживается руками через тряпку с тем, чтобы он плотно приклеился к катушке. Затем катушка переворачивается на 90° и микафолий приглаживается к узкой стороне. После того как весь микафолий будет обернут и приглажен утюгом, сверху накладывают один — два оборота лакированной телефонной бумаги или тонкого электрокартона (0,1 мм) и затем еще несколько слоев нелакированной кабельной бумаги, которая служит для механической защиты микафолия и впоследствии снимается. После наложения микафолия и обутюжки катушка поступает на горячую опрессовку.

Применение ручной обутюжки не может обеспечить высокого качества микафолиевой гильзы. Более совершенным способом, обеспечивающим получение плотной и монолитной микафолиевой гильзы, является механическая обкатка микафолиевой гильзы (фиг. 3,4: а — стальная неподвижная планка;

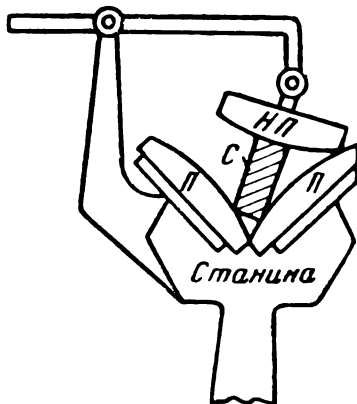
b — электронагреватель; c — верхний нажимной утюг; 1 — медь катушки; 2 — микафолиевая гильза).

Последовательность операций при применении механизированной обкатки:

1. Обертывание (вручную) прямой части обмотки заготовкой из микафолия и сверху двумя-тремя слоями кабельной бумаги.
2. Закрепление обмотки в обкаточном станке.
3. Горячее обутюживание на станке. Затем опрессовка гильзы в холодных прессах.



Фиг. 3,4



Фиг. 3,5.

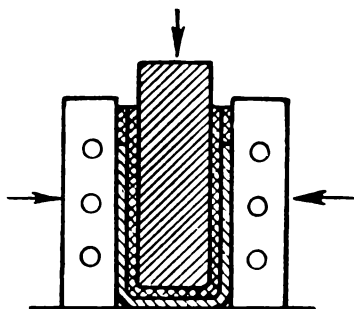
Время обкатки на станке зависит от толщины микафолиевой гильзы и в среднем составляет 30—40 мин. Температура на утюгах вначале устанавливается минимальной (80—100° С), а затем постепенно увеличивается (до 180—250° С).

При массовом производстве роторных стержней применяются весьма простые обкаточные станочки, где стержень во время обкатки приводится во вращение вручную или же механически (фиг. 3,5; Π — плита с электроподогревом; $НП$ — нажимная планка; C — роторный стержень).

Открытые миканитовые гильзы («пазовые коробочки») для роторов турбогенераторов изготавливаются следующим образом. Предварительно нагретые до 70—80° С полосы гибкого миканита толщиной 0,3—0,4 мм загибаются вокруг стального прямоугольного стержня и помещаются в пресс (фиг. 3,6). Для предохранения миканита от приклеивания к планкам пресса и внутреннему стержню прокладывается промасленная пергаментная бумага. Затем следует горячая опрессовка

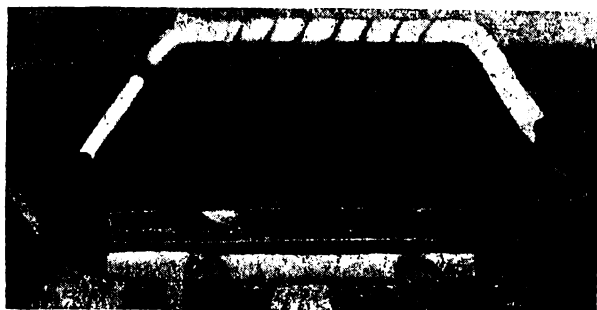
(обычно помощью гидропресса) с последующим охлаждением под давлением. Если гильзы имеют армировку из тонкой жести, то она вкладывается в прессформу вместе с миканитом, и затем производится прессовка.

Наложение мягкой гильзы на пазовую часть статорных катушек и якорных секций производится путем обертки соответствующих частей катушки, зажатой с одной стороны в деревянных тисках прямоугольным куском («простышкой») лакоткани или гибкого миканита (фиг. 3,7). При этом переклест изоляции производится на широкой стороне катушки



Фиг. 3,6.

(1½, 2½, 3½ нахлеста).



Фиг. 3,7.

3.4. Прессовка изоляции обмоток

Обмотки электрических машин (катушки, полукатушки, стержни) в процессе их изготовления и изолировки подвергаются прессовке. В задачи прессовки входит: уплотнение витковой и основной изоляции, выравнивание неровностей обмоток, выпрямление меди, более равномерное распределение и удаление излишков пропитывающих и склеивающих составов из изоляции, склеивание между собой отдельных слоев изоляции, а также витков обмоток и др. Прессовка обмоток может быть а) холодной, б) с охлаждением нагретых обмоток в холодном прессе и в) горячей.

Холодная опрессовка применяется редко и главным образом для выравнивания меди обмоток и неровностей в обмот-

ках низковольтных машин (например, статорных или якорных катушек, изолированных мягкой миканитовой гильзой). В этом случае пазовые части обмоток помещаются между прессовочными планками, где они сдавливаются.

Холодная опрессовка нагретых обмоток применяется главным образом для обмоток низковольтных машин, а также для прессовки витковой изоляции высоковольтных обмоток с гильзовой изоляцией, до наложения микафолия (первая опрессовка). Этот вид прессовки преследует следующие основные цели:

- 1) выпрямление меди для получения необходимых размеров;
- 2) скрепление между собой витков, а также отдельных слоев изоляции;
- 3) уплотнение витковой и основной изоляции;
- 4) обеспечение более равномерного распределения связующих и пропитывающих составов и удаление их излишков.

Прессовка нагретых обмоток в холодных прессформах производится следующим образом. Часть обмотки, которая подвергается прессовке, временно обматывается хлопчатобумажной лентой для защиты изоляции от механических повреждений и предотвращения прилипания обмотки к прессовочным планкам. Затем катушка нагревается до необходимой температуры (80—120° С). Нагревание производится электрическим током, пропускаемым через катушку, специальными нагревательными плитками, горячими утюгами (при обкатке) или другим подобным способом. Нагретые обмотки быстро переносятся в холодный пресс, где они зажимаются в прессформах или между планками, охлаждаемыми водой.

Удельное давление при прессовке в зависимости от рода изоляции обычно лежит в пределах 15—30 кг/см². После охлаждения обмотки до температуры 20—30° С давление снимается, обмотки вынимаются из пресса и с них снимается временная хлопчатобумажная лента. Холодная прессовка предварительно нагретых обмоток производится в ручных, гидравлических или пневматических прессах.

Применение предварительного подогрева прессуемых обмоток до их помещения в пресс позволяет значительно сократить загрузку пресса (до 10—15 мин.), что является существенным преимуществом этого способа.

При горячей прессовке обмоток они помещаются в пресс в холодном состоянии и нагрев обмоток производится в самом прессе. В этом случае после помещения обмотки между прессовочными плитами (снабженными внутренними каналами) вначале дается небольшое боковое давление и пускается пар в плиты. По мере нагревания обмотки боковое давление повышается и дается небольшое верхнее давление. После полного нагрева обмотки до 100—120° С, на что требуется около 15—

30 мин., дается полное давление ($15\text{--}30\text{ кг/см}^2$), которое выдерживается 5—10 мин. При этом проводники выпрямляются, размягчившийся пропитывающий и связующий состав более равномерно распределяется в толще изоляции и между витками, а его излишки выдавливаются, изоляция сильно уплотняется, в результате чего размеры катушки уменьшаются. Затем доступ пару закрывается и через каналы в плиту пропускается вода; после охлаждения обмоток до $20\text{--}30^\circ\text{C}$ они распрессовываются. В этом случае весь процесс прессовки обычно занимает от 30 до 60 мин. в зависимости от габаритов обмотки и толщины микафолиевой изоляции.

При прессовке гильзовой микафолиевой изоляции обмоток высоковольтных машин применяется дополнительная запечка изоляции в запрессованном состоянии, при которой происходит удаление остатков растворителя из лака и влаги из бумаги, а также полимеризация лака. В этом случае длительность нахождения обмотки в горячем прессе (при температуре $120\text{--}140^\circ\text{C}$) увеличивается до 20—30 мин. и более.

Для того, чтобы добиться наиболее полного удаления остатка спирта и влаги из микафолиевой изоляции и при этом не повредить изоляцию, прессовка должна производиться при постепенном повышении давления до $15\text{--}30\text{ кг/см}^2$. Конец опрессовки микафолиевой изоляции высоковольтных обмоток обычно определяется по тому моменту, когда лак больше не выдавливается из изоляции. Затем следует охлаждение обмотки и распрессовка.

Если опрессовка и запечка микафолиевой изоляции произведены хорошо, то изоляция получается плотной, монолитной и при постукивании издает звон.

Конструкция прессовочных планок должна быть такова, чтобы исключалась возможность разрушения изоляции при горячей прессовке (например, с упорами).

Следует отметить, что спрессовка приводит к понижению электрической прочности изоляции, и поэтому ее надо производить с достаточной осторожностью и не допускать чрезмерно высоких давлений.

3.5. Изолировка сердечников полюсов

Сердечники полюсов машин постоянного тока, а также полюсов синхронных машин, изолируются электрокартоном, микафолием или же формовочным миканитом в сочетании с асбестовой бумагой.

При изолировке сердечников электрокартоном следует применять следующий процесс. Сердечники полюсов тщательно очищаются от грязи, пыли, приставших частичек металла, и поверхность, подлежащая изолировке, промывается чистым бензином или спиртом. Затем изолируемая поверхность сер-

дечников покрывается слоем клеящего лака (шеллака, глицеро-базелитового или им подобного) и подсушивается на воздухе до полного удаления летучих. Электрокартон, предназначенный для изолировки сердечников, должен быть покрыт с одной стороны слоем клеящего лака и также подсушен на воздухе.

Надлежащее подсушивание лака, нанесенного на поверхность сердечника и электрокартона, имеет существенное значение, так как при наличии в клеящих лаках растворителей трудно добиться достаточно плотной склейки.

Покрытый лаком, электрокартон накладывается на поверхность сердечника (лакированной стороной к поверхности сердечника) и приглаживается горячим электроутюгом (140—250° С). При приглаживании изоляции нагретым электроутюгом клеящий лак размягчается и происходит плотное склеивание отдельных слоев электрокартона. Последовательное обрачивание сердечника полюса лакированным электрокартоном до требуемой толщины с одновременным приглаживанием электрокартона горячим утюгом позволяет получить достаточно монолитную изоляцию, обладающую необходимой механической и электрической прочностью.

При изолировании сердечников микафолием технологический процесс не отличается от описанного выше. Для повышения механической прочности микафолиевой изоляции сверху накладывается один или два слоя лакированной бумаги или тонкого электрокартона.

Если сердечники полюсов необходимо миканизировать, то обычно поступают следующим образом. На покрытую клеящим лаком и высохшую поверхность сердечника накладывается один — два слоя асбестовой бумаги толщиной 0,2—0,3 мм, покрытой с одной стороны лаком, бумага приглаживается горячим электрическим утюгом. Затем накладывается требуемое количество слоев формовочного миканита толщиной 0,2—0,3 мм, предварительно покрытого с одной стороны клеящим лаком и подсушенного на воздухе, и производится приутюживание изоляции. Иногда для механической защиты поверхности изоляции поверх миканита накладываются один-два слоя лакированной асбестовой бумаги.

Все эти материалы в процессе их наложения тщательно приглаживаются горячим утюгом, что обеспечивает необходимую монолитность изоляции.

В тех случаях, когда необходима особо плотная изоляция (например, для машин с влагостойкой и морской изоляцией), сердечники после наложения на них соответствующей изоляции (микафолиевой или же миканитовой) подвергаются горячей опрессовке в специальных прессформах, с последующей выпечкой при температуре 140—160° С.

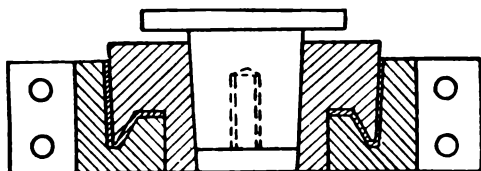
После запечки изоляции прессформа с находящимся в ней изделием охлаждается до нормальной температуры, и затем изолированный сердечник с опрессованной изоляцией извлекается из прессформы.

После изолировки сердечников наружная поверхность изоляции покрывается слоем покровного лака или пигментированной эмали.

Аналогичным способом производится изолировка электрокартоном, микафолием и миканитом каркасов внутренней части катушек возбуждения.

3.6. Изготовление миканитовых конусов (манжет) и миканизация стяжных колец

Миканитовые конусы, изолирующие коллекторные пластины от стяжных колец, изготавливаются из формовочного миканита. При диаметрах стяжных колец до 400—500 мм обычно применяются целые миканитовые конусы, при больших диаметрах — сегменты, собирающиеся в два-три слоя, с перекрытием стыков. Для коллекторов диаметром свыше 1 м иногда применяется миканизация стяжных колец.



Фиг. 3,8.

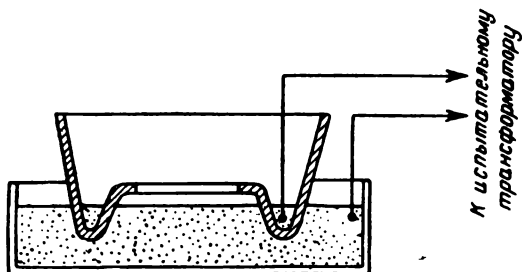
Процесс изготовления твердых миканитовых конусов состоит из следующих основных операций:

1. Заготовка сегментов из листов формовочного миканита. При этом из формовочного миканита (лучше всего применять подпрессованный и калиброванный формовочный миканит ФМ-1 по ГОСТ 2666-44 толщиной 0,2—0,4 мм) по специальным шаблонам вырезаются сегменты необходимой формы и размеров.

2. Горячая формовка и прессовка. Миканитовые заготовки, покрытые с одной стороны лаком, равномерно подогреваются на горячей плите (паровой или электрической) до полного размягчения и накладываются на холодный пуансон для придания им соответствующей формы. При этом заготовки располагаются в шахматном порядке до получения необходимой толщины (2—4 слоя). Предварительно отформованные конусы помещаются в нагретую до 200—220°С стальную матрицу (фиг. 3,8), смазанную тавотом или специальным

составом (тальк, парафин, машинное масло). После того, как миканитовый конус прогреется, вставляется пуансон и пресс-форма помещается под ручной или гидравлический пресс и запрессовывается при удельном давлении $200\text{--}250 \text{ кг/см}^2$. Пресс-форма в зажатом состоянии переносится в печь, где она выдерживается 1—2 часа при температуре $180\text{--}220^\circ\text{C}$ для запечки миканита. После запечки пресс-форма вынимается из печи и под давлением охлаждается (воздухом или водой) до нормальной температуры. По охлаждении пресс-формы производится срезка краев миканитового конуса. Затем пресс-форма разнимается и из нее извлекается готовый миканитовый конус.

3. Зачистка миканитового конуса стеклянной бумагой. Хорошо изготовленный миканитовый конус



Фиг. 3,9.

должен иметь правильную форму и размеры, не выходящие из допусков, а также ровную и гладкую поверхность. При ударе по конусу он должен издавать чистый звон, что указывает на его монолитность и хорошую выпечку. Каждый миканитовый конус должен подвергаться испытанию повышенным напряжением помощью мелких металлических шариков (фиг. 3,9).

Для мелких коллекторов применяется холодный способ формовки миканитовых конусов. При этом способе заготовка из формовочного миканита (обычно выштампованная из миканита марки ФМ-1 или ФФ-2 с содержанием связующего до 6—8%) нагревается и затем обжимается в холодной пресс-форме. Этот способ отличается высокой производительностью и применяется при массовом производстве миканитовых конусов.

Процесс миканизации стержней состоит из следующих основных операций:

1. Очистка миканизируемых поверхностей, промывание их бензином и покрытие лаком.
2. Нарезка заготовок из формовочного миканита.

3. Покрытие миканитовых заготовок лаком с одной стороны и подсушивание на воздухе.

4. Подогрев миканитовых полосок и их укладывание на кольцо (впритык), с последующим приглаживанием горячим утюгом. Таким образом накладывается 3—4 слоя.

5. Сборка стяжного кольца, с наложенной миканитовой изоляцией, со вспомогательным кольцом.

6. Выпечка при 150—180°С с одновременным подтягиванием колец.

7. Охлаждение и распрессовка.

8. Зачистка и обработка внутреннего конуса на карусельном станке.

3,7. Вопросы изоляции коллекторов при их изготовлении

Наиболее важными элементами технологического процесса изолировки коллекторов являются:

1. Порезка коллекторного миканита на пластины необходимых размеров или штамповка пластин.

2. Калибровка коллекторного миканита. Существуют два основных способа проверки размеров коллекторного миканита: толщины стопы под прессом и одной пластины микрометром. Первый способ является более совершенным и поэтому более распространен.

3. Сборка коллекторных пластин и миканитовых прокладок. Для предупреждения замыканий коллекторных пластин сборка производится на специальной сборочной плите с «выпуском» миканитовой изоляции.

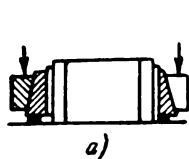
4. Прессовка в кольцах. Величина удельного давления при прессовке коллекторов имеет важное значение, особенно для арочной конструкции, так как в этом случае центробежные силы не должны превосходить сил трения, возникающих в результате арочного распора. С другой стороны, чрезмерное давление при запрессовке коллектора может вызвать повреждение элементов конструкций, крепящих коллектор и воспринимающих нагрузку после снятия кольца.

Работами завода «Динамо» установлено, что для получения механически прочного коллектора удельное давление при запрессовке должно достигать 300—400 кг/см².

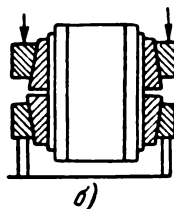
При прессовке собранного в кольцах коллектора обычно применяется два вида приспособлений: стальное коническое кольцо с чугунными или стальными плашками (фиг. 3,10: а — для короткого коллектора, б — для длинного коллектора) или кольцо с радиальными болтами (фиг. 3,11). Первое приспособление применяется для прессовки коллекторов диаметром до 300—400 мм. Для коллекторов большего диаметра удобнее и лучше второе прессующее приспособление.

5. Выпечка пластин коллекторного миканита. Для обеспечения монолитности конструкции и устранения возможности ослабления пластин при работе коллектора производится выпечка собранного и запрессованного коллектора при давлении и температуре, несколько превышающих рабочие.

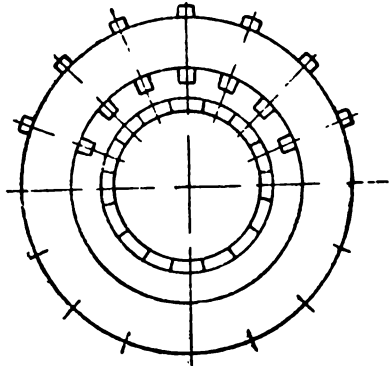
При нагреве коллекторного пакета в кольце происходит



а)



б)



Фиг. 3, 11.

Фиг. 3, 10.

дополнительная подпрессовка коллекторного миканита вследствие различных коэффициентов расширения меди и стали, а также частичная полимеризация склеивающего лака и, как следствие, повышение его температуры размягчения. Практически оказывается достаточным 2—4-часовой выдержки коллекторного миканита при температуре 160—180° С для приведения его в необходимое состояние. Для коллекторных миканитов, изготовленных на глифталевой смоле, выпечка должна производиться при температуре 200—220° С.

В больших коллекторах (диаметром выше 200 мм) применяется несколько отдельных выпечек. При этом выпечку миканитовых пластин ведут постепенно, начиная с низких и доводя до высоких температур и давлений.

Для выпечки малых и средних коллекторов применяются электрические печи. Применение печей с циркуляцией воздуха ускоряет процесс и обеспечивает равномерность нагрева. Для нагрева больших коллекторов иногда применяются переносные электропечи в виде колпака. Подпрессовка коллекторного пакета при его охлаждении даст хорошие результаты, так как при охлаждении стального кольца и меди происходит снижение давления между пластинами.

6. Общая сборка коллектора. Внутренняя поверхность коллектора и поверхность конуса весьма тщательно очищаются от заусенцев и замяток, промываются спиртом и покрываются лаком. При сборке коллектора миканитовые манжеты слегка подогреваются и насаживаются на нажимные кольца. При подтяжке болтов следует избегать перекосов, которые могут повредить миканитовые манжеты.

7. Нагрев и прессовка собранного коллектора. Предварительно стянутый коллектор нагревается до $150\text{--}160^\circ\text{C}$ и выдерживается при этой температуре в течение 2—8 час. в зависимости от размеров коллектора. При применении хорошо выпеченных миканитовых манжет это время может быть снижено. При запрессовке собранных и нагретых коллекторов удельное давление должно составлять $200\text{--}400\text{ кг/см}^2$.

В малых и средних коллекторах после первой выпечки и прессовки наружные вспомогательные прессовочные кольца снимаются, и дальнейшая выпечка и прессовка производятся в собственных конусах. В коллекторах больших размеров, а также быстроходных, производятся три выпечки, причем наружные обжимные кольца снимаются после второй выпечки.

8. Испытание изоляции коллектора между пластинами и относительно корпуса повышенным напряжением. Проверка изоляции между коллекторными пластинами производится путем присоединения двух соседних медных пластин к напряжению 220 в через последовательно включенную электролампочку. Электрическая прочность основной изоляции (относительно корпуса) проверяется повышенным напряжением (см. главу 5).

Полностью изготовленные и испытанные коллекторы средних и крупных машин, а также быстроходные, подвергаются разгону, который имеет задачей создать для коллектора более тяжелые условия, чем во время эксплуатации, с тем, чтобы обеспечить сохранение правильной формы коллектора при работе машины.

Разгон производится несколько раз в нагретом до 160°C состоянии. После каждого разгона коллектор подтягивается.

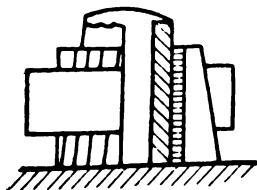
Таким образом, в процессе изготовления коллекторов их изоляция подвергается последовательной многократной прессовке и запечке с тем, чтобы обеспечить монолитность и стабильность формы коллектора при его работе в условиях эксплуатации.

3,8. Миканизация втулок (ступиц) контактных колец

Для получения плотного и механически прочного миканитового слоя на поверхности втулок применяется следующий процесс. Поверхность стальных втулок тщательно промывается бензином или спиртом и затем покрывается клеящим лаком (глифталево-бакелитовым, глифталевым, шеллачным). После подсыхания лака на воздухе втулка обертывается несколькими слоями формовочного миканита, смазанного с одной стороны клеящим лаком, и помещается в прессформу с конусными сегментами (фиг. 3,12). Втулка, заложенная в прессформе, поме-

щается в электрическую печь, нагревается до $160-180^{\circ}\text{C}$ и опрессовывается в горячем состоянии.

После охлаждения прессформа снимается, и миканитовая изоляция подрезается и зачищается, а ее поверхность обрабатывается обточкой или шлифовкой.



Фиг. 3, 12.

В индивидуальных машинах для опрессовки миканитовой изоляции втулок могут применяться тонкие стальные листы, бандажируемые стальной проволокой.

Более детальные данные по технологии изолировки электрических машин можно найти в книгах М. И. Московского «Технология электромашиностроения» (Госэнергоиздат, 1947 г.) и Н. В. Виноградова «Технология производства электрических машин» (Госэнергоиздат, 1948 г.).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СУШКА, ПРОПИТКА И ЛАКИРОВКА ОБМОТОК

4.1. Назначение сушки, пропитки и лакировки обмоток

Волокнистые органические материалы (хлопчатобумажные и шелковые пряжи, ткани и ленты, изоляционные бумаги и картоны и др.) в непропитанном виде обладают большой гигроскопичностью, малой нагревостойкостью, низкой теплопроводностью, а также относительно плохими диэлектрическими свойствами при воздействии на них влаги. Поэтому применение этих материалов для изоляции обмоток электрических машин без предварительной или последующей пропитки недопустимо. Пропитка изолированных обмоток электрических машин преследует следующие основные цели.

а) **Повышение нагревостойкости.** Многочисленными исследованиями установлено, что при длительном нагреве непропитанных целлюлозных материалов на воздухе при температурах выше 80—85°C происходит их ускоренное термическое разрушение, связанное с процессами необратимого ссыхания и образования оксигеллюлозы. При этом наблюдается снижение гибкости и механической прочности волокнистых органических материалов, а при значительном тепловом старении ухудшаются и диэлектрические свойства.

Пропитка волокнистых органических материалов электроизолирующими лаками или компаундами замедляет окислительные процессы и таким образом повышает их нагревостойкость.

б) **Повышение влагостойкости.** Применяемые для изоляции обмоток электрических машин волокнистые органические материалы обладают способностью поглощать влагу из окружающего пространства. Эта влага, распределяясь в макроскопических, микроскопических и субмикроскопических порах, ухудшает диэлектрические свойства изоляции обмоток. Заполнение макро- и микропор волокнистых материалов пропитывающими составами (лаками, компаундами, битумами и т. п.) затрудняет проникание влаги внутрь вещества.

Следует помнить, что пропитка волокнистых целлюлозных материалов не полностью предохраняет материал от поглоще-

ния влаги, а лишь замедляет этот процесс. Однако, многократная пропитка обмоток во влагостойких лаках позволяет значительно увеличить сопротивляемость изоляции воздействию влаги. Эксплуатационный опыт показывает, что электрические машины, обмотки которых были подвергнуты многократной пропитке во влагостойких лаках, могут вполне надежно работать в атмосфере с повышенной влажностью.

в) Улучшение теплопроводности. Волокнистые материалы имеют плохую теплопроводность из-за наличия в них большого количества пор и капилляров, заполненных воздухом. Наличие воздушных зазоров между отдельными проводниками, слоями изоляции, а также между изоляцией и магнитопроводом, еще более ухудшает отвод тепла, выделяющегося в обмотке при работе машины. Заполнение пор, капилляров и зазоров пропитывающим составом, теплопроводность которого больше теплопроводности воздуха, улучшает теплоотдачу обмоток.

Испытания на нагревание статорных обмоток электродвигателей мощностью 0,52 кВт показали, что в результате первой пропитки обмотки в лаке превышение температуры уменьшилось примерно на 10—15%. Для электродвигателей типа АД снижение после однократной пропитки составляет 15—18%; вторая пропитка снизила превышение температуры обмоток еще на 5%, а третья — еще на 2,4%.

г) Повышение электрической прочности. Электрическая прочность таких волокнистых материалов, как хлопчатобумажные, шелковые и стеклянные пряжи, ткани и ленты, изоляционные бумаги и т. п., невысока, так как она определяется в основном электрической прочностью воздуха, находящегося между отдельными волокнами. Заполнение пор и капилляров волокнистых материалов высококачественным пропитывающим электроизолирующим составом (лаком, компаундом) увеличивает их электрическую прочность.

д) Повышение механической прочности. Пропитка улучшает не только электрическую прочность тканей, но их механическую прочность.

Пропитка изоляции обмоточных проводов, выполненной из хлопчатобумажной или шелковой пряжи, также повышает ее механическую прочность. Поэтому в тех случаях, когда в процессе изготовления секций или при обмотке машин изоляция проводов подвергается значительным механическим воздействиям, провода предварительно пропитываются в электроизолирующих лаках (разбавленных). У пропитанных обмоток электрических машин лак или компаунд скрепляет между собой отдельные витки, а также отдельные слои изолирующих материалов; при этом устраняется возможность механического

разрушения (перетирання) междувитковой и основной изоляции обмоток, вызванного относительным перемещением, а также вибрацией отдельных витков и слоев изоляции.

е) **Повышение химической стойкости.** У электрических машин, которые в условиях эксплуатации подвергаются воздействию таких химических активных веществ, как кислоты, щелочи, хлор, аммиак и т. п., наблюдается быстрое разрушение органической части изоляции, особенно если она плохо пропитана соответствующими лаками или компаундами.

Надежная пропитка обмоток химически стойкими пропитывающими составами (лаками, компаундами) увеличивает срок службы изоляции электрических машин, работающих в гальванических и травильных цехах, на химических заводах, и в других случаях, когда изоляция подвергается воздействию химически активных реагентов.

ж) **Повышение стойкости при высоких напряжениях.** При наличии в изоляции высоковольтных обмоток воздушных включений возникают дополнительные потери электрической энергии из-за ионизации воздуха в этих включениях.

Внутренняя ионизация вызывает ускоренное разрушение (старение) волокнистых целлюлозных материалов и может привести к преждевременному пробое изоляции обмотки.

Заполнение соответствующим лаком или компаундом воздушных включений в изоляции высоковольтной обмотки устраняет возможность внутренней ионизации и повышает срок службы изоляции. Обычно для пропитки изоляции статорных высоковольтных обмоток применяются битумные компаунды.

Для получения высококачественной изоляции обмоток электрических машин необходимо, кроме пропитки, применять последующее покрытие обмоток специальными электроизолирующими лаками или покровными лаковыми эмалями.

Задачами лакировки являются:

1) Создание на поверхности обмотки механически прочного изоляционного слоя, защищающего основную изоляцию от повреждений при сборке, а также при работе машины в условиях эксплуатации.

2) Получение гладкой и блестящей пленки на поверхности обмотки, что затрудняет возможность оседания и накопления на обмотках пыли и грязи, а также способствует сдуванию осевшей пыли.

3) Создание влагонепроницаемой пленки, препятствующей прониканию в изоляцию обмотки влаги из окружающей среды.

4) Создание маслостойкого покрытия, предохраняющего основную изоляцию обмотки от воздействия смазочных масел.

5) Защита изоляции обмоток от воздействия эмульсий, паров бензина, а также разрушающих электроизоляционные материалы химических веществ (кислоты, щелочи, хлор, аммиак и др.).

В тех случаях, когда изоляция обмоток электрических машин в эксплуатации подвергается воздействию химически активных веществ (кислот, щелочей, солей), а также если в охлаждающем воздухе имеется проводящая пыль (угольная, чугунная, цементная и т. п.), то применение покровных лаков оказывается недостаточным. Лучшими защитными свойствами обладают специальные обмазочные компаунды (пасты), которые наносятся тонким слоем на лобовые части обмоток низковольтных машин.

Применение этих компаундов для обмазки лобовых частей обмоток позволяет создать надежную защиту изоляции от проводящей пыли, влаги, эмульсий, химически активных веществ и тому подобных внешних воздействий.

Иногда для защиты якорных обмоток мелких машин применяется опрессовка лобовых частей пластмассами.

4.2. Технологическое и вспомогательное оборудование для сушки, пропитки и лакировки обмоток

а) Сушильные печи

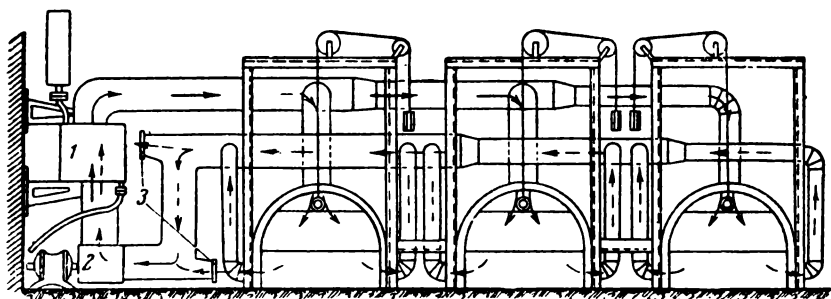
Для сушки обмоток электрических машин до и после пропитки применяются специальные сушильные печи различных конструкций. Нами будут рассмотрены только основные конструкции сушильных печей, представляющие наибольший практический интерес.

Сушильные печи с естественной циркуляцией воздуха. Это довольно часто применяемые и вместе с тем наименее совершенные сушильные печи. Они обычно имеют паровой или электрический обогрев, хотя возможно применение и других видов обогрева (нагретая жидкость, газ и др.). Сушильные печи этого типа представляют собой металлический (или из другого нагревостойкого материала, например асбоцемента) шкаф, имеющий сбоку или сверху плотно закрывающиеся дверцы, через которые производится загрузка и выгрузка деталей. Для уменьшения тепловых потерь сушильная печь имеет обычно снаружи тепловую изоляцию. При паровом обогреве внутри печи располагаются змеевики из труб, через которые пропускается насыщенный или перегретый пар. Змеевики располагаются у дна печи, а также вдоль стенок.

Крупными недостатками подобных сушильных печей являются: неравномерность температуры внутри печи, малая скорость движения воздуха и малый обмен воздуха в печи. Кроме

того, для получения достаточно высоких температур внутри печи (120—140° С) необходимо применять технологический пар с давлением 7—10 ат и выше, что не всегда доступно. При электрическом обогреве из-за соприкосновения паров растворителей с нагревательными элементами возможен взрыв смеси паров растворителей и воздуха внутри печи. Предотвратить это можно применением специальных герметических нагревательных элементов или расположением их на внешней поверхности металлической камеры шкафа, под теплоизоляцией, что, однако, ведет к снижению к. п. д.

Несмотря на простоту и дешевизну сушильных печей с естественной циркуляцией, их не следует применять для сушки обмоток электрических машин в силу указанных выше недостатков.



Фиг. 4,1.

Сушильные печи с принудительным продувом, циркуляцией и освежением воздуха. Печи этого типа могут иметь паровой, жидкостный, электрический и газовый нагрев.

При паровом нагреве нагревательные трубы, по которым пропускается пар, могут располагаться как внутри, так и вне рабочей камеры сушильной печи.

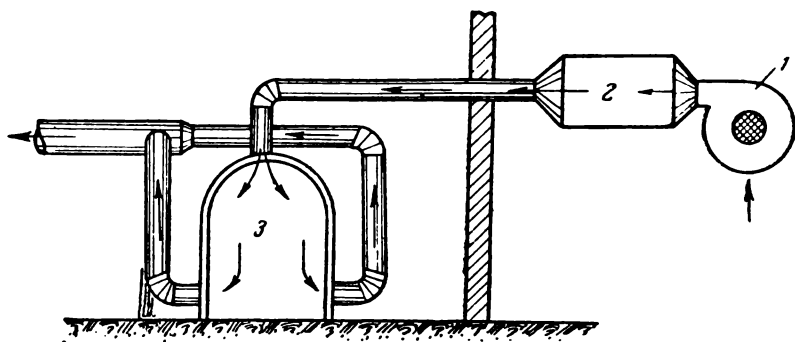
На фиг. 4,1 показаны сушильные печи с принудительной циркуляцией воздуха и паровым калорифером, расположенным вне печи. Этот калорифер может обслуживать одновременно и несколько печей. Воздух, засасываемый вентилятором 2 из нижней части печей, прогоняется через калорифер с паровым обогревом 1. Нагретый при прохождении через калорифер воздух нагнетается в верхнюю часть сушильных печей. Освежение воздуха происходит через специальные заслонки 3, а также частично через неплотности.

Сушильные печи этого типа обычно имеют две дверцы (с передней и задней стороны), которые могут подниматься вверх. Для облегчения подъема дверец имеются противовесы.

Отдельные катушки или обмотанные статоры, роторы и якоря, подлежащие сушке, помещаются на специальную тележку, которая вкатывается по рельсам в печь через переднюю дверцу. После окончания сушки поднимается задняя дверца и тележка выкатывается на другую сторону печи. Такое устройство печи дает возможность осуществить поточность движения изделий.

Длительный опыт эксплуатации этих сушильных печей на советских электромашиностроительных заводах показал их преимущества перед печами с естественной циркуляцией воздуха. Температура воздуха внутри печи при давлении пара 5 ат достигает 110—120° С.

Подогрев воздуха может также производиться и в электрическом калорифере. В этом случае для избежания взрыва необходимо применять специальные герметизированные нагреватели или же отказаться от многократной циркуляции горячего воздуха.

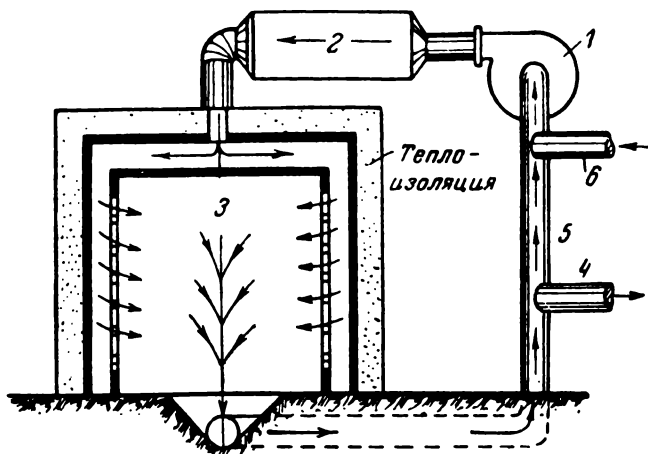


Фиг. 4,2.

Сушильная печь с электрокалорифером, но без циркуляции (с продувом) воздуха изображена на фиг. 4,2 (1—вентилятор; 2—электрокалорифер; 3—сушильная зона печи). Рабочая температура в такой печи может быть доведена до 150—160° С и выше.

На фиг. 4,3 показана сушильная печь с паровым калорифером и принудительной циркуляцией воздуха другого типа. У этой печи вентилятор 1 и калорифер 2 расположены сверху печи. Засос воздуха производится снизу, а нагнетание в сушильную зону 3 — через боковые карманы. Наличие заслонок на боковых стенках дает возможность регулировать распределение горячего воздуха, поступающего в рабочую часть камеры. Наличие регулировочных заслонок на всасывающей 6 и нагнетающей 5 и выпускающей 4 трубах позволяет производить требуемое освежение воздуха внутри печи.

При давлении пара в калорифере около 5 ат температура в рабочей части достигает 115—120° С. Применение более вы-



Фиг. 4,3.

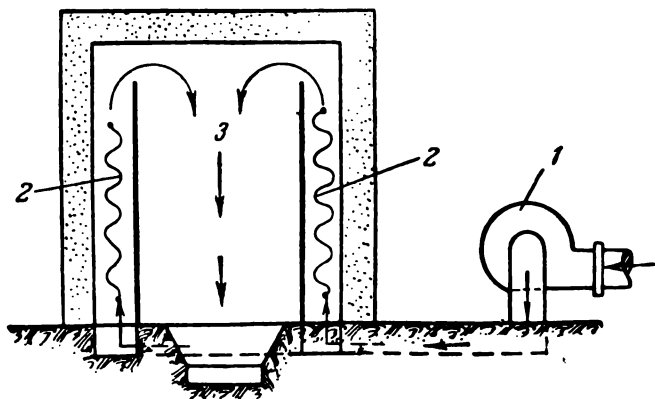
сокого давления пара, а также электрокалорифера дает возможность и в этом случае повысить температуру в печи до $130\text{—}150^{\circ}\text{C}$ и выше.

На фиг. 4,4 показана сушильная печь с принудительной циркуляцией воздуха, у которой герметизированные нагревательные элементы 2 расположены внутри печи (1—вентилятор; 3—сушильная зона печи).

К преимуществам сушильных печей с принудительной циркуляцией следует отнести:

1. Большую скорость воздуха внутри печи, что позволяет ускорить процессы удаления влаги и растворителей, а также окислительные процессы в лаковых основах.

2. Равномерность температуры в рабочей зоне печи.



Фиг. 4,4.

3. Возможность быстрого освежения воздуха внутри печи.

Недостатком этих печей является их большая сложность и высокая стоимость по сравнению с печами без принудительной циркуляции воздуха. Однако это не должно являться препятствием для самого широкого применения этого типа печей.

Конвейерные сушильные печи. Для поточной сушки отдельных обмоток или обмотанных статоров, роторов и якорей применяются специальные конвейерные сушильные печи, в которых изделия непрерывно движутся в рабочей зоне печи. В качестве примера приводим описание конвейерной сушильной печи одного из электромашиностроительных заводов. В этом «сушильно-пропиточном комбайне» производится механизированная сушка и пропитка обмотанных статоров и роторов весом до 100 кг.

Сушильная конвейерная печь (фиг. 4,5 и 4,6) имеет длину 32 м, ширину 4,4 м и высоту 6 м. Площадь печи (без туннеля) около 160 м², объем 700 м³. Обогрев печи производится паром, который проходит через 16 батарей, установленных внутри печи.

Движение деталей осуществляется при помощи замкнутой цепи длиной 373,5 м, которая проходит через 26 блокколес, одно из которых приводится во вращение электродвигателем. К цепи прикреплено 422 крючка для подвески деталей. Скорость движения конвейера около 0,354 м/мин. Удаление воздуха, насыщенного влагой и парами растворителей, производится через специальные отводы. Подлежащие пропитке статоры и роторы по рольгангу подаются к цепи конвейера. При нажиме педали статор или ротор поднимается и подвешивается на крючок конвейерной цепи. Подвешенные детали поступают в зону предварительной сушки. Период нахождения деталей до выхода к пропиточному баку равен 4 час. Затем детали опускаются и проходят через бак с лаком. После стекания лака изделия поступают в печь для сушки, где они находятся 7 час. 40 мин. при температуре 100—110° С.

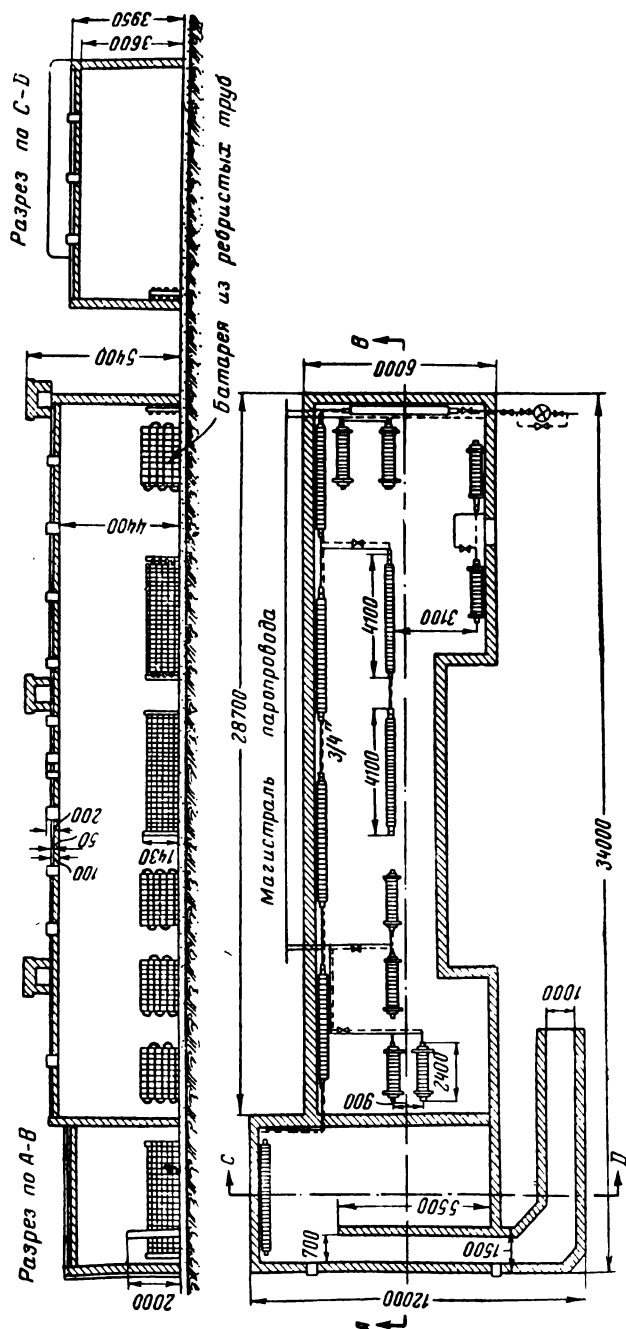
По выходе деталей из сушильной печи производится покрытие лобовых частей обмотки лаком, а затем изделие переходит во вторую часть печи с температурой 50—60° С, где находится в течение 3 час. Общая длительность цикла составляет 17 час. 35 мин.

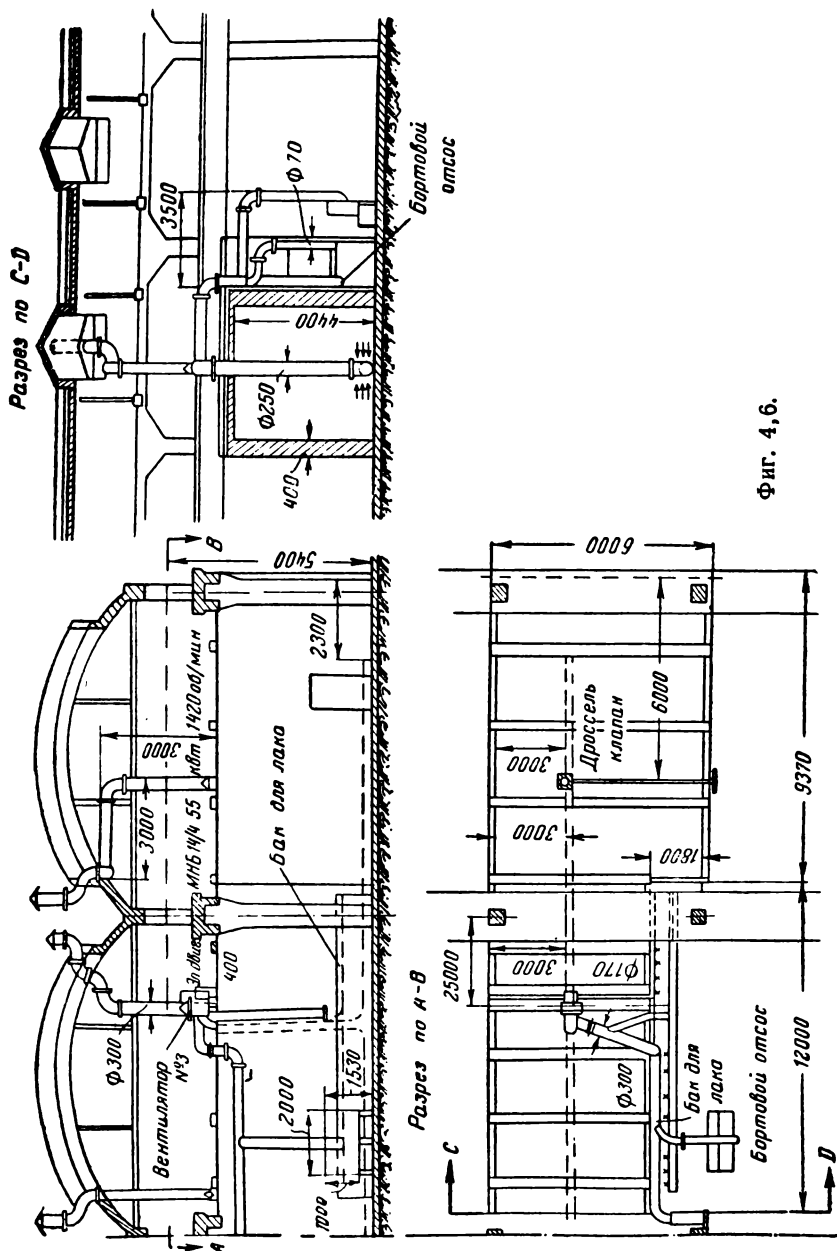
За одну смену с конвейера при тех обслуживающих рабочих может быть снято до 200 изделий.

К преимуществам конвейерной сушки следует отнести:

1. Автоматическое выдерживание технологических режимов, которым подвергаются обмотки при пропитке, сушке и лакировке.

2. Высокую производительность.





3. Облегчение труда рабочих из-за механизации процессов загрузки и выгрузки деталей из печи и пропиточной ванны.

4. Возможность использования малоквалифицированной рабочей силы.

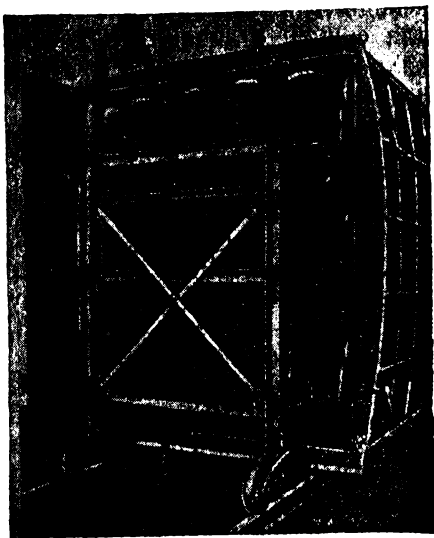
Применение принудительной циркуляции воздуха внутри сушильных камер, а также повышение температуры в печи, позволит сократить длительность цикла, а значит, еще более повысить производительность.

Подобные конвейерные сушильные печи следует рекомендовать для электромашиностроительных заводов, выпускающих большое число электрических машин небольших и средних габаритов.

Вакуумные сушильные печи. Вакуумные сушильные печи представляют собой герметически закрывающиеся металлические баки круглой или прямоугольной формы, внутри которых расположены нагреватели, чаще всего паровые (фиг. 4,7). Так как при создании внутри печи вакуума стенки и крышка бака испытывают давление атмосферного воздуха, то толщина стенок бака должна быть значительной. При прямоугольной форме печи для увеличения жесткости стенок бака применяются механически усиливающие ребра. Для уменьшения тепловых потерь наружная поверхность печи покрывается толстым слоем теплоизоляции.

При хорошей герметичности вакуумной печи и достаточно мощном вакуумном насосе величина остаточного давления достигает 10—20 мм рт. ст. и ниже. Температура внутри вакуумной печи при паровом нагреве обычно составляет 110—120° С.

К преимуществам вакуумных сушильных печей относится возможность полного и интенсивного удаления влаги и растворителей из обмоток при относительно невысоких температурах. Однако высокая стоимость вакуумных сушильных печей, а также специального оборудования к ним (вакуумные насосы, конденсационные колонки и др.), ограничивает их широкое применение.



Фиг. 4,7.

Применение вакуумных сушильных печей следует рекомендовать для сушки обмоток высоковольтных машин перед пропиткой или компаундированием, а также машин с влаготстойкой изоляцией, подвергаемых многократной пропитке.

Устройства для сушки обмоток инфракрасными лучами. В последние годы в СССР и за границей все более широкое применение находит новый способ сушки инфракрасными лучами. Сущность этого метода заключается в непосредственной передаче тепла к объектам в виде лучистой энергии. Инфракрасные лампы, применяемые для сушки, отличаются от обычных осветительных ламп накаливания пониженной светоотдачей и несколько большим инфракрасным излучением.

В настоящее время изготавливаются два типа сушильных инфракрасных ламп; с внутренним рефлектором и без рефлектора. В последнем случае для концентрации инфракрасных лучей на поверхности высушиваемой детали применяются наружные рефлекторы.

У инфракрасных ламп, разработанных в СССР, отражательный слой нанесен на внутреннюю поверхность колбы. Эти лампы отличаются высокой отдачей и равномерным распределением инфракрасного потока.

Если сушильные лампы не имеют внутреннего рефлектора, то для более полного использования инфракрасного потока и обеспечения равномерного распределения лучистой энергии на объекты они помещаются в специальные рефлекторы, отражательная поверхность которых покрыта металлом с высоким коэффициентом отражения (золото, родий и др.).

Вначале для концентрации инфракрасных лучей применялись индивидуальные рефлекторы со сферическими поверхностями. В последнее время все более широкое применение находят групповые корытообразные рефлекторы, имеющие ряд преимуществ перед индивидуальными.

На одном советском электромашиностроительном заводе инфракрасные лампы с большим успехом были применены для сушки якостей. При этом время сушки удалось сократить с 5 час. до 45 мин. Для производственных целей на этом заводе была изготовлена печь, предназначенная для одновременной сушки инфракрасными лучами 20 якостей. Эта печь представляет собой каркас из угловой стали, обшитый стальными листами. В боковых листах проделаны отверстия, сквозь которые входит куполообразная часть ламп. Всего с каждой стороны расположено по 10 ламп. Якоря устанавливаются вертикально на тележке в один ряд и вкатываются в печь между двумя рядами ламп.

Примером весьма успешного применения инфракрасных ламп для сушки обмоток электрических машин может служить другой завод электромашин. Производственная су-

сушильная камера, работающая на заводе (фиг. 4,8), представляет собой цилиндр из белой жести длиной 2 м и диаметром 0,61 м. Передняя и задняя стенки камеры сделаны в виде дверок. Вверху имеется отверстие для вытяжной трубы. Вдоль камеры расположены симметрично в шахматном порядке 30 сушильных ламп мощностью по 500 вт. Лампы укреплены на отдельных штативах, находящихся рядом с сушильной камерой. Якоря для сушки укладываются на под-



Фиг. 4,8.

весную тележку, передвигающуюся внутри камеры на роликах. Температура в камере регулируется переключением ламп. Следует отметить простоту, малогабаритность этой сушильной установки, не требующей к тому же специального фундамента. Благодаря применению инфракрасных ламп длительность сушки якорей и катушек сократилась в 6,6 раза, а удельный расход электроэнергии — в 2 раза, при полном устранении брака. Время разогрева обмоток до рабочей температуры при нагреве инфракрасными лампами не превышает 1—1,5 час.

Преимуществами сушки обмоток инфракрасными лучами являются:

1. Сокращение продолжительности сушки.
2. Возможность быстрого нагрева объекта до температуры 140—160° С и выше.
3. Простота конструкции сушильной печи и невысокая стоимость.
4. Легкость регулировки режима сушки.
5. Простота обслуживания.
6. Возможность поточной конвейерной сушки.

Особый интерес представляет использование инфракрасных ламп для сушки изоляции обмоток электрических машин при их ремонте и восстановлении.

б) Пропиточные устройства

Пропиточные ванны. Для пропитки лаками обмоток электрических машин погружением в пропиточный состав обычно применяются прямоугольные металлические ванны. Размеры ванны зависят от габаритов пропитываемых деталей и количества одновременно загружаемых в нее деталей. Для предотвращения испарения растворителей ванны снабжаются крышками. Подача лака и разбавителей в ванну может осуществляться вручную или по трубам из специальных хранилищ (централизованная подача). Внизу пропиточной ванны имеется спускной кран для полного удаления лака при чистке ванны. Удаление паров растворителей, выделяющихся из лака, производится вентиляционными устройствами (лучше бортовой отсос). Для загрузки мелких деталей в ванну применяются специальные рамки, обтянутые крупной сеткой.

Пропиточные котлы. В тех случаях, когда пропитка обмоток производится с применением вакуума и давления, употребляются специальные пропиточные котлы (автоклавы). Для лаковой пропитки обмоток обычно применяются автоклавы без обогрева. Они представляют собой вертикальные котлы со съемной крышкой, рассчитанные на рабочее давление 5—10 ат, а также вакуум. В тех случаях, когда производится сушка обмоток в этих автоклавах, применяют паровой обогрев.

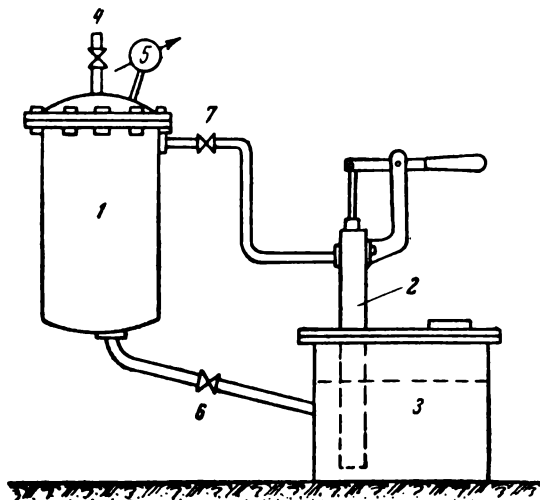
В нижней части автоклава расположен патрубок, через который пропиточный лак засасывается в автоклав вследствие разности давлений или подается специальным насосом из плотно закрываемого смесительного бака.

В этот бак добавляются свежие порции лака, а также разбавитель. Перемешивание лака в смесителе производится мешалкой, приводимой в движение электродвигателем через редуктор. Иногда в смесительных баках помещаются змеевики, обогреваемые паром, при помощи которого лак подогревается до температуры 50—60° С и выше.

Для создания в автоклавах вакуума служат поршневые или ротационные вакуумные насосы. Рабочее давление в пропиточных автоклавах обычно создается сжатым воздухом или, лучше, сжатым инертным газом (азот), подаваемым компрессором. В некоторых установках повышенное давление внутри автоклава достигается путем подачи насосом новых порций лака в заполненный лаком автоклав.

На фиг. 4,9 приведена схема простой установки для пропитки лаком катушек электрических машин. Эта установка

состоит из автоклава 1, рассчитанного на рабочее давление 5—7 ат. Съемная крышка с контрольным краном 4 при помощи откидных болтов плотно закрывает автоклав. Рядом с автоклавом установлен прямоугольный бак 3 с ручным насосом 2. Этим насосом лак из бака подается в автоклав для заполнения, а также для создания необходимого давления, которое контролируется манометром 5 и регулируется вентилями 6 и 7. Подобная пропиточная установка может быть легко изготовлена на любом заводе.



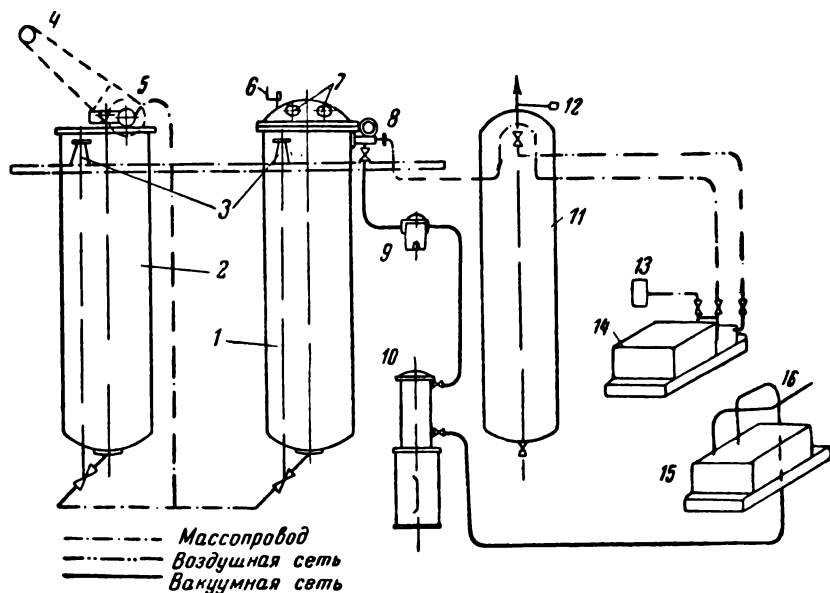
Фиг. 4,9.

Для пропитки обмоток электрических машин компаундами применяются специальные компаундировочные установки, состоящие из пропиточных и смесительных котлов, в которых компаунд нагревается до рабочей температуры и смешивается со свежими порциями основного компаунда или компаунда-разбавителя, а также устройств, служащих для создания в пропиточных автоклавах вакуума и давления (вакуумные насосы, компрессоры и др.).

Пропиточные и смесительные котлы снабжаются обогревательными рубашками, через которые пропускается пар давлением 8—10 ат или нагретая до соответствующей температуры жидкость (минеральное масло, совол, дифенил и т. п.). Это дает возможность поддерживать внутри автоклава температуру 160—180° С. Возможно применение и электрического обогрева пропиточного и смесительного котлов.

Пропиточные котлы имеют съемную сферическую крышку, плотно закрывающуюся при помощи откидных болтов. В крышке автоклава имеются смотровые окна. Жидкий компаунд подается в смесительный котел и выпускается из него

через нижний патрубок, закрепленный в днище автоклава. Отсос воздуха и подача давления производятся через специальную трубку, расположенную вверху автоклава. Пропиточные котлы снабжаются соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой (манометры, вакуумметры, термометры и др.).

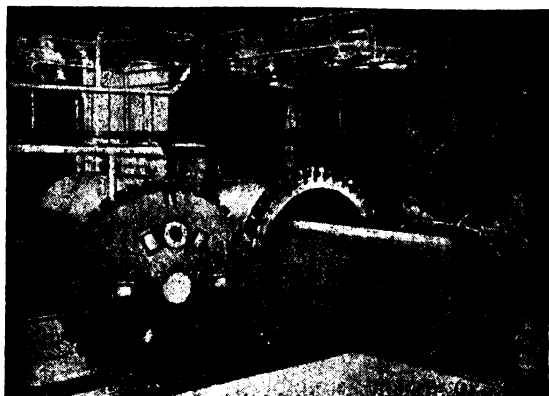


Фиг. 4, 10.

В пропиточных котлах обычно производится и предварительная сушка обмоток перед пропиткой (вакуумная).

Смесительные котлы имеют мешалку, приводимую во вращение электродвигателем через редуктор. В крышке смесительного котла имеется закрывающийся люк, через который загружается компаунд. Смесительный котел соединяется с пропиточным автоклавом при помощи трубы. Схема типичной компаундировочной установки приведена на фиг. 4, 10, где 1 — компаундировочный котел; 2 — смесительный котел; 3 — штурвалы для впуска и выпуска компаунда; 4 — электродвигатель; 5 — червячная передача к мешалке; 6 — вентиль для выпуска воздуха; 7 — смотровое стекло; 8 — моновакуумметр; 9 — массоуловитель; 10 — конденсатор; 11 — воздушный резервуар; 12 — предохранительный клапан; 13 — фильтр; 14 — компрессор; 15 — вакуумный насос; 16 — выхлопная труба. Размеры пропиточных автоклавов зависят от размеров пропитываемых деталей.

На одном крупном электромашиностроительном заводе компаундировочная установка состоит из вертикального пропиточного котла диаметром 1,3 м и глубиной 3,7 м, котла для предварительного подогрева и смешения компаундировочной массы диаметром 1,9 м и глубиной 5,0 м, компрессора, вакуумнасоса, контрольных приборов и подъемного механизма. Нагрев котлов — паровой, посредством паровых рубашек, в которые подается перегретый пар давлением 7—10 ат. Для



Фиг. 4,11.

загрузки обмоток в пропиточный котел применяются либо вертикальные рамы, к которым прикрепляются секции, либо «клетки», на которые укладываются секции небольших размеров. Рамы и клетки с обмотками загружаются и выгружаются при помощи подъемного крана.

Известны также компаундировочные установки, у которых пропиточные котлы расположены горизонтально. На одном из электромашиностроительных заводов такая установка предназначена для пропитки статорных обмоток самых мощных турбогенераторов. Эта установка состоит из двух горизонтальных пропиточных котлов длиной 10 и 6 м и двух смесительных котлов такой же длины и диаметром около 2,4 м (фиг. 4,11). Пропиточные и смесительные котлы имеют паровые рубашки для обогрева.

Устройства для хранения, транспортировки и очистки лаков. В крупных пропиточных отделениях, где расходуеться большое количество лаков, растворителей и компаундов, должно быть организовано их хранение и механизирована подача в пропиточные ванны и котлы.

Для хранения лаков и растворителей применяются специальные закрытые баки, обычно устанавливаемые в специальных изолированных помещениях. Из этих баков само-

теком или же помощью насосов лаки и растворители подаются к рабочим местам. При чистке ванн лаки можно перекачать в хранилища. Для очистки электроизолирующих лаков, которые загрязняются в процессе пропитки обмоток, применяются фильтрпрессы или центрифуги.

Разное вспомогательное оборудование. Для создания вакуума в сушильных и пропиточных котлах в настоящее время обычно применяются ротационные высокопроизводительные насосы. Перед насосами устанавливаются специальные уловители и трубчатые конденсаторы, в которых конденсируются вследствие охлаждения пары воды и растворителей. По мере скопления конденсат удаляется через нижний кран.

Необходимое давление в пропиточных котлах (7—10 ат) обеспечивается компрессорами (поршневыми или ротационными). На всасывающей трубе компрессора обычно устанавливается водопоглотитель.

Контрольно-измерительная аппаратура. Точное выполнение технологических процессов сушки и пропитки возможно только при наличии соответствующих контрольно-измерительных приборов.

Приводим перечень основной контрольно-измерительной аппаратуры, которая применяется в хорошо оборудованных пропиточных отделениях:

а) манометры для измерения давления пара в паропроводах (указывающие и самопишущие);

б) манометры для измерения давления пара (указывающие и самопишущие);

в) термометры дистанционные (указывающие и самопишущие) для контроля и регистрации температуры воздуха в различных зонах сушильных печей, температуры компаунда и лака в пропиточных котлах;

г) автоматические регуляторы температуры в сушильных печах и пропиточных установках;

д) вакуумметры для контроля и регистрации вакуума в сушильных печах и автоклавах (указывающие и самопишущие);

е) мерники и весы для лаков и компаундов;

ж) аппаратура для контроля сопротивления изоляции, вязкости лаков и др.

4.3. Технологические процессы сушки, пропитки и лакировки

а) Предварительная сушка

Назначение сушки. Материалы, применяемые для изоляции обмоток электрических машин, обычно поглощают влагу из окружающего воздуха во время хранения на скла-

дах и в кладовых, при транспортировке, а также в цехах, где относительная влажность воздуха может достигать 60—80%. Количество поглощенной волокнистыми материалами влаги зависит от химической природы и физической структуры этих материалов, а также от влажности окружающего воздуха.

Поглощаемая из воздуха влага, распределяясь в порах и капиллярах материала, ухудшает его диэлектрические свойства. Пропитка содержащей влагу изоляции может привести к частичному закупориванию этой влаги в порах и капиллярах, и ее удаление в дальнейшем будет затруднено. Таким образом, мы приходим к необходимости предварительной сушки изоляции обмоток перед их пропиткой. При выборе режимов предварительной сушки обмоток перед их пропиткой очень важно установить, до какого содержания остаточной влаги должна быть высушена изоляция, так как это определяет, с одной стороны, метод, температуру и длительность сушки, а с другой — качество пропитанной изоляции.

Для того, чтобы в дальнейшем можно было правильно обосновать режимы предварительной сушки изоляции обмоток, рассмотрим влияние, которое оказывает влага на диэлектрические свойства волокнистой изоляции. Как показывают исследования диэлектрических свойств волокнистых целлюлозных материалов, подвергаемых длительному воздействию атмосферы с различной влажностью, пробивное напряжение этих материалов сравнительно мало изменяется при повышении относительной влажности воздуха до 60—70%.

Несколько большее влияние оказывает влага на удельное объемное сопротивление целлюлозных волокнистых материалов. Но даже при длительном нахождении таких материалов, как электрокартон, в атмосфере 60—70%-ной относительной влажности их удельное объемное сопротивление не падает ниже 10^9 — 10^{10} ом·см.

Весьма большое влияние оказывает влага на диэлектрические потери целлюлозных волокнистых материалов; при поглощении материалом влаги $\tan \delta$ сильно увеличивается.

Установив влияние влаги на электрические свойства целлюлозной волокнистой изоляции, не трудно определить и требуемую степень подсушки перед пропиткой обмоток электрических машин различных типов и исполнений.

Обмотки высоковольтных машин. Для обеспечения высоких диэлектрических свойств изоляции высоковольтных обмоток электрических машин необходимо производить тщательную сушку изоляции этих обмоток перед пропиткой, добиваясь возможно полного удаления влаги.

Применение вакуумной сушки в этом случае также следует считать весьма желательным, а при пропитке обмоток компаундом — обязательным, так как эти обмотки после

пропитки компаундом не сушатся, а поэтому даже небольшое содержание остаточной влаги в изоляции перед пропиткой будет снижать ее качество.

Обмотки низковольтных машин, подвергаемые многократной пропитке или компаундированию. Изоляция обмоток машин, подвергаемых многократной пропитке или компаундированию, также должна быть хорошо высушена перед пропиткой. В этом случае следует рекомендовать тщательную сушку при атмосферном давлении или под вакуумом. Однако вакуумная сушка в данном случае не обязательна.

Изоляция низковольтных машин нормального исполнения. При сушке низковольтных обмоток электрических машин нормального исполнения, которые обычно подвергаются однократной пропитке лаком, нет необходимости стремиться к полному удалению влаги из изоляции до пропитки обмоток. Поскольку сокращение предварительной сушки обмоток представляет большой практический интерес для заводов и ремонтных мастерских, приводим некоторые данные, полученные главным образом на основе работ, проведенных на ХЭМЗ, и указывающие на возможность значительного сокращения предварительной сушки обмоток низковольтных машин нормального исполнения перед их пропиткой.

Электрическая прочность волокнистых целлюлозных материалов относительно мало изменяется при повышении содержания влаги до 7%. Поэтому, если подвергнуть пропитке в лаке волокнистую целлюлозную изоляцию, содержащую 7% влаги, ее электрическая прочность будет мало отличаться от прочности этой же изоляции, но высушенной перед пропиткой.

При пропитке волокнистой изоляции, содержащей влагу, может возникнуть опасение, что количество пропитывающего вещества будет меньше, чем при пропитке высушенной изоляции, так как часть пор и капилляров в пропитываемых материалах будет занята водой. Однако такое опасение справедливо только при пропитке изоляции, содержащей свободную влагу в капельножидком состоянии.

При содержании в целлюлозных материалах влаги до 6—8% основная ее часть находится в субмикроскопических порах. Так как при пропитке изоляции лак или компаунд не может проникнуть в эти поры, то эта часть влаги не оказывает существенного влияния на количество проникающего в материал пропитывающего состава.

Приведенные в табл. 4,1 данные характеризуют проникание лака в предварительно высушенные и в невысушенные образцы хлопчатобумажных тканей.

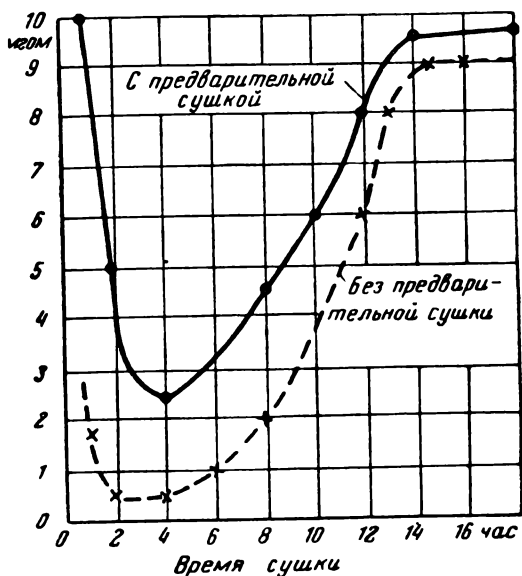
Проведенное автором исследование процессов сушки пропитанных обмоток статоров асинхронных электродвигателей с применением предварительной сушки и без нее показало, что

Таблица 4,1

Состояние образцов	Вес образцов в %	
	предварительно высушенных	не высушенных перед пропиткой
До пропитки в пересчете на сухой вес	100,0	100,0
После пропитки в лаке	220,0	220,0
После пропитки в лаке и последующей сушки	167,0	168,0

время сушки в одном и другом случае практически одинаково.

На фиг. 4,12 приведены кривые, характеризующие изменение сопротивления изоляции пропитанных обмоток статоров

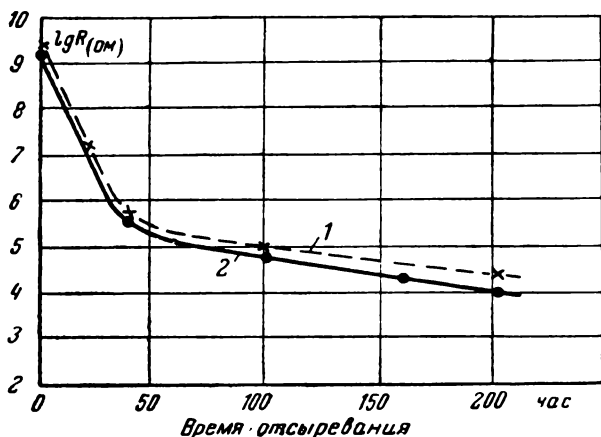


Фиг. 4,12.

низковольтных асинхронных двигателей при их сушке. Верхняя кривая относится к статорам, которые перед пропиткой были высушены в течение 7—8 час. при температуре 110—115° С. Время сушки этих двигателей после пропитки до установившегося сопротивления — около 14 час. При этом сопротивление изоляции обмотки в конце сушки достигает 9 мгом. Нижняя кривая получена при сушке статоров, которые перед пропиткой в лаке были только подогреты до 60—70° С, на что потребовалось всего 1,0—1,5 часа. Опти-

мальное время сушки этих двигателей после пропитки—также около 14—15 час. Сопротивление изоляции обмотки в конце сушки достигает 8 мгом. Аналогичные результаты нами получены и для других типов машин.

Против сокращения предварительной сушки обмоток перед их пропиткой может быть приведено и следующее возражение: если в изоляции перед пропиткой оставить влагу, то удаление ее при сушке пропитанной изоляции может вызвать образование пор в лаковых пленках. Это приведет к ухудшению качества изоляции и в частности к снижению влагостойкости. Однако, как показали наши исследования, это возражение также не обосновано. На фиг. 4,13 приведены кривые,



Фиг. 4,13.

характеризующие отсыревание изоляции асинхронных двигателей, часть которых сушилась перед пропиткой в течение 12 час. при 110—115° С (кривая 1), а часть была только нагрета до температуры 60—70° С в течение 1 часа и в таком состоянии пропитана (кривая 2). Сравнение этих кривых показывает, что пропитка в лаке невысушенных обмоток практически не снижает влагостойкости их изоляции.

В ы б о р т е м п е р а т у р ы п р е д в а р и т е л ь н о й с у ш к и. Скорость, с которой происходит испарение влаги из материала, зависит от температуры; с повышением температуры ускоряется процесс удаления влаги. Опытами установлено, что для наиболее полного удаления влаги из волокнистых электроизолирующих материалов, с целью достижения максимальной величины электрического сопротивления и минимального значения диэлектрических потерь, температура сушки при атмосферном давлении должна быть не ниже:

для органических материалов . . . 120 — 130°С;
 для асбеста 250 — 300°С.

При наличии вакуума эти температуры соответственно снижаются.

Если при сушке обмоток нет необходимости в полном удалении влаги из изоляции (низковольтные машины нормального исполнения), то сушку можно производить при температуре 100—105°С и нормальном атмосферном давлении.

Для органических электроизолирующих материалов повышение температуры выше 105°С позволяет значительно ускорить процесс удаления влаги и тем самым сократить время сушки. Однако слишком высокая температура сушки приводит к ускоренному термическому разрушению материала. Поэтому, при установлении верхних пределов температуры сушки изоляции обмоток перед пропиткой необходимо учитывать возможность интенсивного термического разрушения органической части изоляции (особенно непропитанных целлюлозных материалов) при нагреве выше 120—130°С.

В настоящее время можно считать установленным, что при повышении температуры нагрева органической волокнистой изоляции на 8—10°С степень теплового износа увеличивается примерно в 2 раза. Но при повышении температуры сушки увеличивается и скорость удаления влаги из изоляции, а значит, сокращается общая продолжительность сушки. Поэтому степень теплового разрушения при применении повышенных температур до 120—140°С и соответственно сокращенном времени сушки не вызывает опасений.

Поясним это примером. Для того, чтобы высушить обмотку якоря машины постоянного тока типа ПН550 до сопротивления 55 мгом при температуре в печи 115°С требуется около 7 час. До такого же состояния изоляция якоря может быть высушена при температуре печи 140° в течение 2,5—3 час. Учитывая время разогрева изоляции якоря до рабочей температуры печи, мы во втором случае будем иметь сокращение продолжительности воздействия повышенных температур на изоляцию более чем в 3 раза. Таким образом, и во втором случае нет оснований опасаться теплового разрушения изоляции, хотя температура сушки достигает 140°С.

При вакуумной сушке обмоток, имеющих изоляцию класса А, температура обычно составляет 80—110°С, но нет никаких препятствий для повышения температуры до 120°С и выше при соответствующем сокращении длительности сушки, так как скорость теплового старения органической изоляции, помещенной в вакуум, уменьшается.

Для обмоток с изоляцией класса В температура сушки без опасения за состояние изоляции может быть повышена до 130—150°С, так как по существующим нормам этот тип изоляции должен выдерживать длительно (15—20 лет) нагрев до 125°С (по сопротивлению). Обмотки, изоляция которых отно-

сится к классу ВС и для которых по нормам длительно допускается температура 140°C , можно сушить без опасения за их состояние при температурах до $150\text{—}180^{\circ}\text{C}$.

В табл. 4,2 приведены значения оптимальных и максимально допустимых температур, которыми следует руководствоваться при сушке изоляции обмоток электрических машин перед их пропиткой.

Таблица 4,2

Тип изоляции	Оптимальные температуры сушки в $^{\circ}\text{C}$		Максимально допустимая температура сушки в $^{\circ}\text{C}$ (при сокращенном времени сушки)
	при нормальном давлении	в вакууме	
Хлопчатобумажная и шелковая непропитанная изоляция	110—120	80—110	130—140
Эмалевая изоляция проводов:			
а) Провода ПЭЛ	110—120	80—110	130—140
б) Провода ПЭТ и винифлекс	120—130	80—110	150
Изоляция класса В	130—150	120—130	160—170
Изоляция класса ВС и СВ	140—160	—	170—180 и выше

Технологические режимы сушки обмоток перед пропиткой. Длительность сушки обмоток электрических машин зависит от ряда факторов, главнейшими из которых являются:

1. Содержание влаги в изоляции обмоток и форма ее связи с материалом.

2. Химический состав и структура изоляции.

3. Геометрические размеры и формы изоляции, в частности отношение поверхности соприкосновения обмотки с горячим воздухом к объему изоляции.

4. Температура сушильной печи.

5. Скорость циркуляции воздуха в сушильной печи.

6. Кратность обмена (освежение) воздуха в сушильной печи, особенно в первый период сушки.

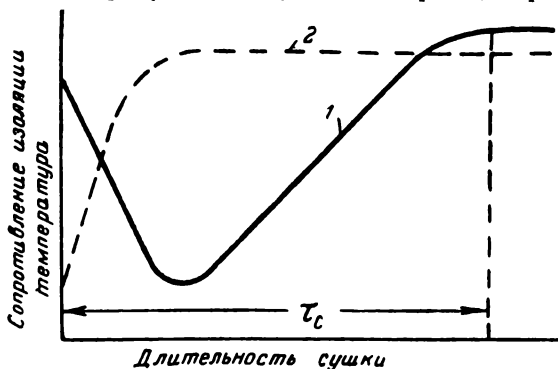
7. Масса и теплоемкость обмоток, одновременно загружаемых в сушильную печь, на разогрев которых затрачивается определенное количество тепла.

8. Тепловая мощность сушильной печи.

Кроме того, длительность сушки зависит от количества остаточной влаги, которое может быть допущено в изоляции обмоток перед пропиткой.

В практике заводов и ремонтных мастерских необходимо в каждом отдельном случае экспериментально уточнить оптимальное время сушки обмоток, исходя из имеющегося оборудования (сушильных печей), температуры сушильной печи, размеров одновременно загружаемых обмоток, типа изоляции и руководствуясь состоянием изоляции в процессе сушки (контроль изменения сопротивления изоляции или емкости).

На фиг. 4,14 изображены типичные кривые изменения температуры 2 и сопротивления изоляции 1 обмоток в процессе сушки. Из этого рисунка следует, что время, через которое



Фиг. 4,14.

устанавливается постоянное сопротивление изоляции, составляет τ_c . Время τ_c , увеличенное на 10—20%, и может быть принято как оптимальное время сушки изоляции обмоток машин.

Имеющийся опыт по сушке обмоток различных типов и исполнений и дает возможность установить ориентировочные режимы предварительной сушки, которые приведены в табл. 4,3.

Технологический процесс сушки обмоток перед пропиткой состоит из следующих основных этапов:

1. Подготовка — продувка сжатым воздухом для очистки изоляции от загрязнений и пыли и опаливание ворса газовым пламенем.

2. Загрузка обмоток в печь. При сушке секций и катушек их лучше всего подвешивать в печи или класть на металлические решетки или сетки. Обмотанные якоря и роторы следует помещать в печь на специальных стойках. Для облегчения загрузки больших обмоток, а также обмотанных статоров, якорей и роторов, следует применять специальные тележки, которые после укладки на них обмоток вкатываются в сушильную печь. Возможна также загрузка обмоток в сушильные печи через верхнюю открывающуюся дверцу или крышку при помощи крана, тельфера, блока или другого подъемного

Таблица 4,3

Тип обмотки	Способ сушки	Температура сушки в °С	Длительность сушки в час. (общая)
Малые катушки низковольтных машин с изоляцией класса А	а) В печи с циркуляцией воздуха б) В вакуумной печи	110—120 80—100	2—3 1—2
Средние катушки и секции низковольтных машин с изоляцией класса А	а) В печи с циркуляцией воздуха б) В вакуумной печи	110—120 80—100	3—4 2—3
Крупные катушки и секции низковольтных машин с изоляцией класса А	а) В печи с циркуляцией воздуха б) В вакуумной печи	110—120 80—100	4—8 3—6
Средние катушки и секции низковольтных машин с изоляцией класса В и ВС	В печи с циркуляцией воздуха	130—140	4—6 и более
Крупные катушки и секции низковольтных машин с изоляцией класса В и ВС	В печи с циркуляцией воздуха	130—140	6—8 и более
Секции и стержни статорных обмоток высоковольтных машин с непрерывной изоляцией из микаленты до компандировки	В вакуумном котле	140—150	6—10 и более
Статоры, роторы, якоря (обмотанные) машин напряжением до 500 в, нормального исполнения, с изоляцией класса А	В печи с циркуляцией воздуха	110—120	
а) Мелкие б) Средние в) Крупные		— —	3—5 5—8 8—14 и более
Статоры, роторы и якоря (обмотанные) напряжением до 500 в, с изоляцией класса В и ВС, нормального исполнения:	В печи с циркуляцией воздуха	130—160	
а) Средние б) Крупные			4—6 6—8 и более
Статоры, роторы и якоря (обмотанные) машин напряжением до 500 в, влагостойкого исполнения:	В печи с циркуляцией воздуха	120—130	
а) Мелкие б) Средние в) Крупные			4—6 6—10 10—16 и более
Статоры, роторы и якоря (обмотанные) машин напряжением выше 500 в (до 6 000 в)	а) В печи с циркуляцией воздуха б) В вакуумной печи	120—130 100—110	12—18 и более 8—12 и более

устройства. Загружаемые в сушильную печь детали необходимо располагать таким образом, чтобы обеспечить интенсивное прохождение горячего воздуха около всех поверхностей деталей и избежать мертвых зон, создающих неравномерное распределение потоков воздуха и температур внутри печи.

3. Сушка. Если сушка ведется без вакуума, то после загрузки печи дверцы или крышка плотно закрываются и включается вентилятор, подающий горячий воздух в сушильную печь. При электрическом калорифере включение нагревательных элементов необходимо производить после пуска вентилятора. В первый период сушки необходимо обеспечить максимальные циркуляцию и освежение воздуха для ускорения процесса испарения влаги из изоляции обмоток. После удаления основной части влаги из изоляции степень освежения следует уменьшить до минимальной величины и работать в основном на режиме циркуляции с тем, чтобы обеспечить более высокий к. п. д. сушильной печи. Оптимальные температуры сушки были приведены выше.

Если сушка вакуумная, то для ускорения нагрева обмоток, загруженных в сушильную вакуумную печь, первоначальный прогрев следует производить при закрытой крышке, но при атмосферном давлении (без вакуума). После того как обмотки, загруженные в вакуумную печь, прогреются до рабочей температуры, в автоклаве создается вакуум и ведется сушка. Во время сушки величина вакуума должна быть максимальной (700—750 мм рт. ст.). Так как в процессе интенсивного испарения влаги из изоляции температура обмоток понижается, то полезно в первый период сушки время от времени производить прогрев обмоток при атмосферном давлении (1—2 часа).

4. Выгрузка высушенных обмоток из печи. После окончания сушки вентилятор печи выключается, затем дверцы открываются и сушильная печь разгружается.

Для предварительной сушки обмоток могут применяться инфракрасные лампы и переносные воздухоподувки с подогревом воздуха. Предварительная сушка крупных машин может производиться за счет тепловых потерь от токов в обмотке и вихревых токов.

б) Пропитка

Однократная пропитка обмоток в лаках, содержащих растворители, не может обеспечить полного заполнения пор и капилляров, имеющихся в изоляции обмоток, а также зазоров между витками.

Применение двух- и трехкратной пропитки обмоток в лаках позволяет повысить коэффициент заполнения пор и капилляров лаковой основой. Однако добиться полного заполнения пор и капилляров при пропитке обмоток лаками, содержащими

растворители, практически невозможно. Хорошие результаты могут быть получены только при применении лаков без растворителей или же компаундов. Лаки, не содержащие растворителей, даже при однократной пропитке дают практически полное заполнение пропитывающим веществом пор и капилляров. Полное заполнение пор и капилляров может быть достигнуто при пропитке в компаундах.

Технологические процессы пропитки обмоток в лаках.

В настоящее время применяются следующие основные способы пропитки: горячее погружение, пропитка предварительно вакуумированных обмоток, пропитка с применением давления, «тренировочный» режим и комбинированный процесс.

При пропитке обмоток в лаках методом погружения высушенные обмотки еще в горячем состоянии (при температуре 60—80°С) погружаются в пропиточный лак, находящийся в ванне. Загрузка обмоток в ванну может производиться вручную, если обмотки имеют небольшие размеры, или с помощью специального подъемного механизма (кран, ручная или электрическая таль и т. п.).

Пропитываемые детали необходимо располагать во время пропитки в лаке таким образом, чтобы облегчить удаление воздуха из пор и капилляров и тем самым ускорить заполнение последних пропитывающим составом.

Обмотанные якоря, роторы и статоры необходимо располагать так, чтобы пазы были расположены вертикально. Это облегчает вытеснение воздуха из обмоток в пазовой части и их скорейшую пропитку. Хорошие результаты могут быть получены при расположении якорей и роторов в лаке под углом 45° к горизонту.

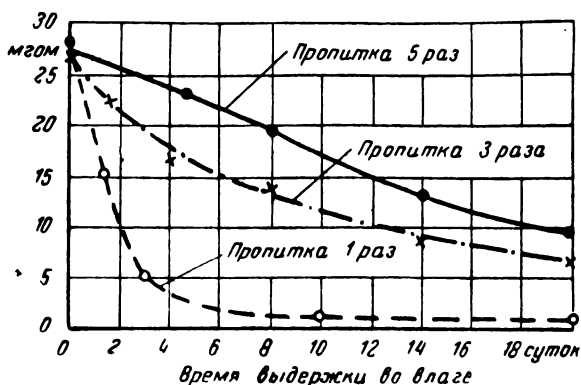
Время выдержки обмоток в лаке при их пропитке зависит главным образом от вязкости лака, размеров пор и капилляров и их расположения. Чем более вязок лак и чем меньше сечение и больше длина пор и капилляров, тем медленнее происходит их заполнение жидким лаком.

После окончания пропитки обмотки извлекаются из лака и располагаются над ванной для стекания излишков лака. Далее следует выдержка пропитанных обмоток на воздухе в течение 20—40 мин., после чего необходимо удалить лак с поверхностей, которые не должны быть покрыты лаком (выводные концы, валы якорей и роторов, замки статоров и т. п.). Затем следует печная сушка.

Как уже было указано, повышение влагостойкости изоляции обмоток электрических машин и аппаратов может быть достигнуто их многократной пропиткой в электроизолирующих лаках.

На фиг. 4,15 приведены кривые, характеризующие отсыревание изоляции обмоток асинхронных двигателей, пропитанных

1, 3 и 5 раз в битумномасляном лаке. При применении трехкратной и особенно пятикратной пропитки обмоток наблюдается более медленное снижение сопротивления изоляции обмоток при их длительной выдержке в атмосфере с относительной влажностью 95—98%, чем при однократной пропитке.



Фиг. 4,15.

Анализируя результаты работ, проведенных автором, а также другими исследователями, можно сделать следующие выводы:

1. Заполнение микроскопических и макроскопических пор и капилляров в изоляции, а также частичное заполнение зазоров между проводниками происходит в основном при первой и в меньшей степени при второй пропитке.

2. Вторая пропитка частично, а третья, четвертая и последующие пропитки полностью образуют только покровные пленки на поверхности обмоток.

3. Влагостойкость, химическая стойкость, а также устойчивость лаковых пленок по отношению к истирающему действию пыли и мелких частиц повышаются с числом пропиток и с вязкостью лаков.

Исходя из этих выводов, первую пропитку обмоток следует, как правило, производить в маловязких разбавленных лаках (с вязкостью 2—3° Э при 20° С и содержанием нелетучих 15—20%). При этом обеспечивается более быстрое и глубокое проникание пропиточного лака в поры и капилляры изоляции.

Вторую и последующие пропитки желательно производить в более вязких лаках (5—8° Э при 50° С, содержание нелетучих 40—45%), с тем чтобы обеспечить получение надежного лакового покрытия и повысить стойкость изоляции обмотки к внешним воздействиям.

Исходя из результатов проведенных нами исследований, а также учитывая имеющийся практически опыт, можно рекомен-

довать следующие значения кратности пропитки обмоток электрических машин в электроизоляционных лаках:

1. Машины нормального исполнения, предназначенные для работы в помещениях с нормальной влажностью (до 60—70% относительной влажности)	1 — 2-кратная пропитка
2. Машины влагостойкого исполнения, предназначенные для работы в помещениях с повышенной влажностью (до 80—95% относительной влажности)	3-кратная пропитка
3. Машины, предназначенные для длительной работы в очень влажных помещениях, на открытом воздухе и на кораблях, а также в условиях, когда изоляция обмоток может подвергаться воздействию активных химических реагентов	3 — 5-кратная пропитка

Время выдержки обмоток в лаке при каждой последующей пропитке следует снижать, так как при длительной выдержке уже пропитанных обмоток в лаке возникает опасность разрушения лаковых пленок растворителями; кроме того, после второй и особенно третьей пропитки поры и капилляры закрываются, и длительная выдержка в лаке нецелесообразна.

При вакуумной пропитке обмоток следует рекомендовать следующий технологический процесс:

1. В пропиточный котел с находящимися в нем обмотками под полным вакуумом засасывается электроизоляционный лак, который должен полностью покрыть все обмотки.

2. В пропиточный котел выпускается воздух и в котле создается атмосферное давление.

3. Лак сливается или отсасывается из пропиточного котла.

4. Обмотки выдерживаются в течение 20—30 мин. в пропиточном котле для стекания излишков лака, а затем их выгружают и оставляют на воздухе.

5. Тряпкой, смоченной в бензине, удаляют лак с поверхностей, где не должно быть лаковой пленки (вал, коллектор, замки и т. п.).

Технологический процесс пропитки обмоток в лаках «тренировочным» режимом состоит из следующих основных операций:

1. Высушенные (еще горячие) обмотки загружаются в пропиточный котел.

2. Закрывается крышка пропиточного котла.

3. Пропиточный котел заполняется лаком.

4. Создается избыточное давление (7—8 ат) внутри пропиточного котла; давление поддерживается в течение 3—5 мин.

5. Давление снимается на 3—5 мин.

6. Создается избыточное давление в течение 3—5 мин. и т. д. (обычно дается последовательно 3—5 циклов).

7. Давление снижается до атмосферного, лак удаляется из котла и снимается крышка.

8. Обмотки выдерживаются в котле в течение 20—30 мин. для стекания лака.

9. Обмотки выгружают из котла, оставляют на воздухе и с поверхности вала, замков и т. п. удаляют пленку лака тряпкой, смоченной в бензине.

Комбинированный процесс пропитки обмоток в лаке состоит из следующих основных операций:

1. Пропиточный котел с находящимися в нем высушенными обмотками заполняется лаком под полным вакуумом.

2. Снимается вакуум.

3. Создается в пропиточном котле избыточное давление (7—8 ат) длительно (до 2—3 час.) или циклически («тренировочный» режим).

4. Удаляют лак из котла.

5. Обмотка выдерживается в котле (без лака) для стекания избытков лака.

6. Обмотки выгружают из котла.

7. Удаляют пленки лака с вала, замков и т. п.

Следует остановиться на особенностях пропитки обмоток, намотанных из проводов с эмалевой изоляцией (марка ПЭЛ). Установлено, что при длительном соприкосновении имеющих эмалевую изоляцию проводов с электроизолирующими лаками, содержащими растворители, происходит размягчение эмалевого слоя, а иногда и его разрушение. Особенно сильное действие на эмалевую изоляцию проводов оказывают такие растворители, как бензол, толуол, ацетон и др. Но даже такие растворители, как бензин, уайт-спирит, скипидар, при длительном соприкосновении с эмалевым слоем размягчают его. Поэтому при пропитке обмоток с эмальпроводом необходимо максимально сократить время выдержки обмоток в лаках. Это может быть достигнуто при применении пропитки под вакуумом и давлением.

Винифлексовая изоляция обладает значительно более высокой стойкостью против действия растворителей по сравнению с изоляцией проводов марки ПЭЛ. Все же обмотки из провода винифлекс не следует выдерживать более 5—10 мин. в лаках, содержащих бензол, толуол и тому подобные растворители (крезольномасляный лак, лаки типа 458, 447 и др.).

При пропитке обмоток из эмальпровода не следует применять фенольноформальдегидные и крезольноформальдегидные, а также крезольномасляные лаки, содержащие хотя бы незначительные количества свободного фенола и крезола, так как свободные фенол и крезол сильно разрушают эмалевую изоляцию проводов.

Применяемые в настоящее время режимы пропитки обмоток в лаках весьма разнообразны, так как они зависят от многих факторов (тип изоляции, размеры обмоток, плотность об-

моток и изоляции, вязкость лака и его пропитывающая способность и др.). Рассмотреть все применяемые режимы не представляется возможным, можно лишь наметить наиболее рациональные из них.

В табл. 4,4 приведены ориентировочные режимы пропитки для различных типов обмоток электрических машин.

Технологические процессы пропитки обмоток в компаундах. Технологический процесс пропитки обмоток в битумных компаундах состоит из следующих основных операций:

1. Предварительная (обычно вакуумная) сушка обмоток, которая проводится в компаундировочном котле. Очень важно, чтобы температура обмоток к концу вакуумной сушки приближалась к температуре впускаемого в котел компаунда ($150\text{--}180^\circ\text{C}$).

Перед сушкой обмотки по всей поверхности обматываются одним слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста. Эта лента после компаундирования обмоток снимается, и вместе с ней снимаются излишки компаунда.

Для того, чтобы в процессе компаундирования катушки секции и стержни не деформировались, они должны быть соответствующим образом закреплены.

Следует рекомендовать предварительный разогрев обмоток в котле при атмосферном давлении (до вакуумирования).

2. В пропиточный котел при полном вакууме (остаточное давление не более $10\text{--}12$ мм рт. ст.) засасывается (из смесительного котла) нагретый до $150\text{--}180^\circ\text{C}$ компаунд. Для обеспечения компаундирования хорошего качества необходимо следить за тем, чтобы вакуум не снижался до полного покрытия всех обмоток компаундом. Если же по каким-либо причинам вакуум был нарушен до того, как обмотки полностью покрылись компаундом, то процесс пропитки необходимо начать сначала.

3. После того, как компаунд полностью покрыл все обмотки и перестал вспениваться, вакуумный насос отключается и пропиточный котел сообщается с атмосферой. Затем в котле создается избыточное давление ($7\text{--}8$ ат) длительно (до $6\text{--}8$ час.) при кратковременно, с чередованием давления и вакуума («тренировочный» процесс).

4. Избыточным давлением компаунд перегоняется из компаундного котла в смесительный.

5. Избыточное давление в котле снимается.

6. Крышка пропиточного котла освобождается от болтов и снимается.

7. Пропитанные компаундом обмотки вынимают из котла и оставляют на воздухе для охлаждения.

Таблица 4,4

Тип обмоток	Тип лака	Режим пропитки
Катушки низковольтных машин нормального исполнения:		
а) Серийные катушки с небольшим числом витков из провода с волокнистой или комбинированной изоляцией (марки ПЭЛБО, ПЭЛШО и др.)	458, 447	Горячее погружение, выдержка в лаке 3 — 5 мин.
б) Шунтовые катушки из провода с волокнистой или комбинированной изоляцией (ПЭБО, ПЭШО, ПБД, ПБО и др.)	458, 447	Пропитка под вакуумом или давлением
в) Шунтовые катушки из провода с эмалевой изоляцией (марки ПЭЛ)	458 на скипидаре, 62	Пропитка под вакуумом или давлением, тренировочный режим
г) Катушки из провода винифлекс	458, 447, кре- зольномас- ляный, 1 154	То же
д) Катушки из провода со стеклянной изоляцией (ПСД)	1 154, лак А	То же
Катушки из провода ПБД, перед изолировкой (первая пропитка)	458, 447	Горячее погружение, выдержка в лаке 3 — 5 мин.
Катушки из провода ПСД, перед изолировкой (первая пропитка)	1 154	То же
Изолированные катушки с изоляцией классов А и В	447, 460	Горячее погружение, выдержка в лаке 5 — 10 мин.
*Изолированные катушки с изоляцией классов ВС	1 154, лак А	То же
Обмотанные статоры, роторы, якоря со всыпной или протяжной обмоткой, провод ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПБД, нормальное исполнение	458, 447	Горячее погружение, выдержка в лаке 10 — 30 мин.
Обмотанные статоры, роторы, якоря со всыпной обмоткой, провод винифлекс, нормальное исполнение	447, 458, 1 154, кре- зольномас- ляный	Горячее погружение или пропитка с применением вакуума или давления
Обмотанные статоры, роторы, якоря со всыпной или протяжной обмоткой, провод ПСД, изоляция класса ВС.	1 154, лак А	Горячее погружение, выдержка в лаке 10 — 30 мин.
Обмотанные статоры, роторы, якоря с секционной или стержневой обмоткой, изоляция классов А и В	458, 447	Горячее погружение, выдержка в лаке 10 — 15 мин.

Продолжение табл. 4,4

Тип обмоток	Тип лака	Режим пропитки
Обмотанные статоры, роторы, якоря с секционной или стержневой обмоткой, изоляция класса ВС	1 154, лак А	То же
Обмотанные статоры, роторы, якоря со в. выпной или протяжной обмоткой, влагостойкое исполнение	447, 460 крезольномасляный	Горячее погружение или пропитка с применением вакуума или давления
Обмотанные статоры, роторы, якоря, химически стойкое исполнение.	447, 1 154 крезольномасляный	То же
Обмотанные статоры, роторы, якоря с секционной или стержневой обмоткой, влагостойкое исполнения	447, 460	Горячее погружение или пропитка под вакуумом или давлением

8. После полного остывания обмоток их снимают с полок или рам, а затем очищают от временной хлопчатобумажной ленты.

Следует отметить, что при компаундировании изолированных обмоток происходит не только пропитка, но и гидростатическая опрессовка обмоток компаундом.

Для высоковольтных обмоток, имеющих непрерывную изоляцию микалентой с числом слоев более 10, применяется многократное компаундирование. При большом числе слоев микаленты для более интенсивного прогрева обмоток производится предварительное заполнение пропиточного котла нагретым до 150—180° С компаундом.

В табл. 4,5 приведены примерные режимы сушки и пропитки компаундом обмоток электрических машин.

Хорошие результаты в отношении повышения влагостойкости изоляции обмоток статоров со в. выпной или протяжной обмоткой дает их пропитка в компаунде. В этом случае излишки компаунда удаляются с еще теплого статора при помощи тряпок, смоченных в сольвентнафте.

Как уже отмечалось, недопустимо компаундирование вращающихся обмоток, так как при этом неизбежно разбрызгивание компаунда при работе машин.

Для пропитки крупных машин в условиях ремонта можно погружение обмоток в лак заменить «обливанием» обмотки лаком. Однако этот метод не может обеспечить хорошей пропитки и поэтому может применяться в исключительных случаях.

в) Сушка обмоток после пропитки в лаках. Одним из основных моментов, определяющих режим сушки

Таблица 4,5

Тип обмоток	Режим сушки и пропитки	Общая продолжительность процесса в час.
Катушки из провода ПЭЛ	$2H + 0,5B + BK + ПД + (3 \div 5) + \left(\frac{1}{12} PB + \frac{1}{12} ПД\right)$	3,5
Катушки и секции из провода ПБО и ПБД без изоляции относительно корпуса	$H + 0,5BC + BK + ПД + 5\left(\frac{1}{12} PB + \frac{1}{12} ПД\right)$	4—5
Статорные секции обмоток низковольтных машин, изолированных двумя слоями микаленты	$4BC + BK + 4ПД$	8
Статорные секции, изолированные 3—6 слоями микаленты	$H + 6BC + BK + 4ПД$	11
Статорные обмотки, изолированные 7—10 слоями микаленты	$2H + 5BC + H + 6BC + BK + 5ПД$	19
Статорные обмотки, изолированные 11—16 слоями микаленты	а) Промежуточная пропитка (после первой изолировки) $2H + 5BC + H + 6BC + BK + 5ПД$ б) Окончательная пропитка (после второй изолировки) $BK + 3K + 5BC + H + 6BC + BK + 5ПД$	19—20
Статорная обмотка, изолированная 17—21 слоями микаленты	3 пропитки (после каждой изолировки) $BK + 3K + 5BC + H + 6BC + BK + 5ПД$	3×20

Обозначения, принятые в таблице

H — подогрев обмоток в котле, нагревом до 150—180° С.

BC — вакуумная сушка обмоток в пропиточном котле, нагревом до 150—180° С.

BK — запорные пропиточного котла компаундом под вакуумом.

PB — вакуумная пропитка обмоток в компаунде.

K — выдерживание обмоток в горячем компаунде (без вакуума и давления).

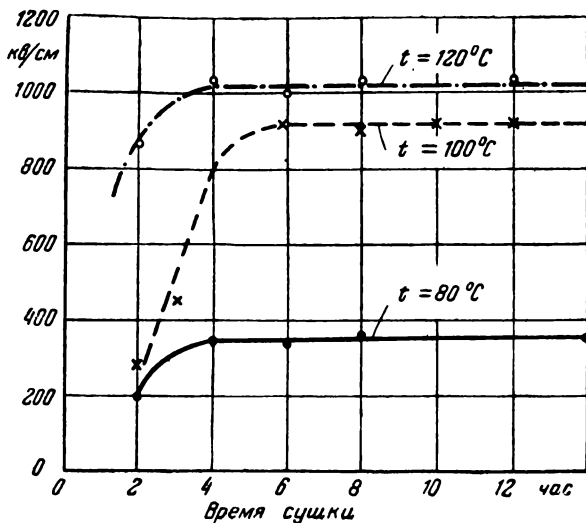
ПД — пропитка обмоток в компаунде под давлением.

Цифры перед буквенными обозначениями означают длительность процесса в часах.

пропитанных обмоток, является температура сушки. Для удаления из лака таких легколетучих растворителей, как бензол (температура кипения 78,5° С), легкий бензин (начало кипения 52—75° С), вполне достаточна температура 70—80° С. Сравнительно легко удаляются и такие растворители, как толуол, ксилол, уайт-спирит, скипидар и т. п. Поэтому устанавливать температуру обмоток в первый период сушки выше 60—70° С нецелесообразно, тем более что при очень высоких нагревах обмоток происходит весьма энергичное испа-

рение растворителей, приводящее к частичному вытеснению лака из пор и капилляров, а также отверждение лака на наружных поверхностях, что затрудняет удаление остатков растворителей из глубины обмоток.

Более высокие температуры необходимы только во втором периоде сушки. Нами было показано, что повышение температуры сушки позволяет не только ускорить химико-физические процессы, приводящие к отверждению лака, но и повысить качество лаковой основы.



Фиг. 4,16.

На фиг. 4,16 показана полученная нами зависимость электрической прочности пленок асфальтомаляного лака № 447 от времени сушки при разных температурах. Из этих кривых видно, что даже при длительной сушке лаковых пленок при температуре 80°C нельзя получить высоких значений электрической прочности, которые легко могут быть получены при температуре сушки 120°C. Однако при сушке изоляции обмоток, содержащих органические волокнистые материалы, чрезмерное повышение температуры может привести к недопустимому тепловому разрушению органической части изоляции.

Тепловой износ, характеризуемый ухудшением механических и диэлектрических свойств волокнистой целлюлозной изоляции, выражается формулой

$$\xi = -\frac{e^{\alpha\theta}}{\mu} \cdot \tau, \quad (4,1)$$

где ξ — тепловой износ изоляции за время τ , в течение которого изоляция подвергается нагреву;

ϑ — температура нагрева;

μ и α — коэффициенты, зависящие от природы материала и условий, в которых находится нагреваемый материал.

Время, необходимое для полного высыхания лака, определится из формулы

$$\ln \tau_1 = \frac{A}{\vartheta_1 + 273} - B. \quad (4,2)$$

При этом тепловой износ изоляции будет равен

$$\xi_1 = \frac{e^{\alpha \vartheta_1}}{\mu} \cdot \tau_1. \quad (4,3)$$

Если температуру сушки обмоток увеличить на 10°C , то время сушки при этом примерно сократится вдвое.

Легко показать, что при повышении температуры ϑ_1 на 10°C и сокращении времени сушки τ_1 в 2 раза тепловой износ изоляции практически не изменится.

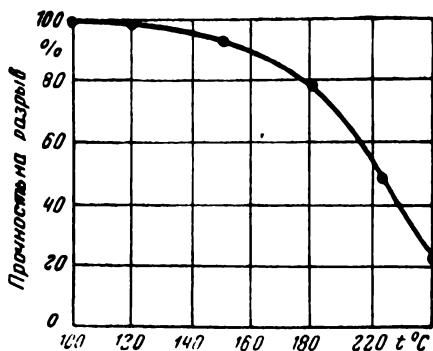
Для того, чтобы не увеличивать тепловой износ изоляции при повышенной температуре, необходимо

$$\tau_2 \leq \tau_1 e^{-\alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)}, \quad (4,4)$$

где τ_1 — время сушки изоляции обмоток при температуре ϑ_1 ;
 τ_2 — время сушки обмоток при температуре ϑ_2 .

Следует отметить, что при повышении температуры сушки пропитанных обмоток увеличивается неравномерность нагрева обмоток, что может привести при очень высоких температурах к недопустимому тепловому износу наружных слоев изоляции.

Для установления предельно допустимых температур сушки пропитанной волокнистой изоляции нами было проведено исследование механической прочности образцов хлопчатобумажной ткани, пропитанной в битумномасляном лаке № 447. Сушка производилась в течение 6 час. при различных температурах — от 100 до 220°C .

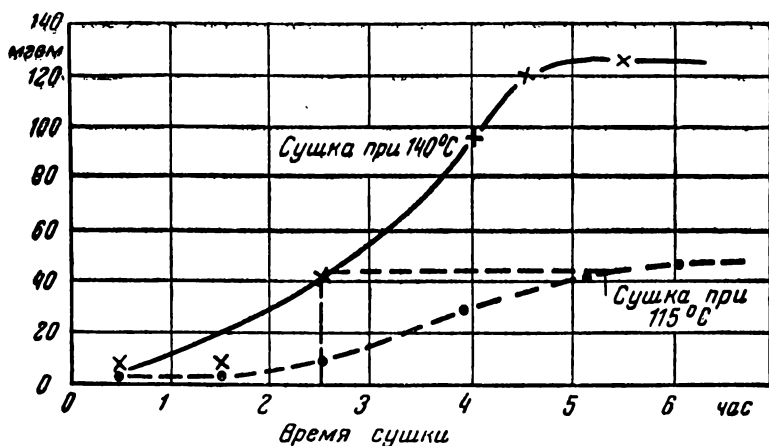


Фиг. 4,17.

Полученные результаты представлены на фиг. 4,17 в виде кривой, из которой следует, что резкое понижение механиче-

ской прочности пропитанной ткани наблюдается при температурах выше 180°C .

Учитывая реальные условия сушки обмоток электрических машин и аппаратов, не следует при сушке пропитанных обмоток с изоляцией класса А превышать температуру $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$ в течение более 6 час. Для пропитанных обмоток с изоляцией классов В и ВС температура сушки может быть повышена до $160\text{--}180^{\circ}\text{C}$.



Фиг. 4,18.

На ХЭМЗ были проведены исследования сушки пропитанных якорей типа ПН550 и ПР100 при температурах 115°C и $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$. Сушка якорей производилась в печи с принудительной циркуляцией воздуха. Обогрев калорифера электрический. Температура входящего в печь воздуха во втором случае достигала $160\text{--}170^{\circ}\text{C}$. На фиг. 4,18 приведены кривые, характеризующие изменение приведенного к 100°C сопротивления изоляции обмоток в процессе сушки пропитанных якорей при температуре $115\text{--}120^{\circ}\text{C}$, а также при температуре $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$. Из кривых видно, что сопротивление изоляции пропитанных якорей при температуре сушки 115°C достигает установившегося значения 44 мегом через 6 час. Это же сопротивление имеют якоря, которые сушились 2,5 час. при температуре $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$. Учитывая время разогрева якорей до рабочей температуры, мы будем иметь продолжительность воздействия температуры $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$ на изоляцию меньше 2 час., что вполне допустимо с точки зрения теплового износа органической части изоляции обмоток.

При сушке пропитанных обмоток, нагретых до $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$ помощью инфракрасных ламп, также не наблюдалось заметного теплового старения органической части изоляции, так как

время сушки при нагреве инфракрасными лампами значительно сокращалось по сравнению с обычной сушкой. Разница температур в различных местах обмоток при этом не превышала 10°C , а длительность разогрева обмоток до рабочей температуры составляла 1—1,5 час.

В настоящее время применяются различные режимы сушки пропитанных обмоток, определяемые типом и размером обмоток, характеристиками пропиточного лака, температурой сушки, а также методом сушки.

Ниже приводятся основные режимы сушки пропитанных обмоток.

Сушка пропитанных обмоток в печи с принудительной циркуляцией воздуха. 1. Пропитанные в лаке катушки, секции или якоря, статоры, роторы после выдержки их на воздухе загружаются в печь. При сушке катушек или секций они подвешиваются на специальных стойках. Статоры, якоря или роторы обычно размещаются на специальной тележке, которая вкатывается в сушильную печь.

2. После загрузки сушильной печи дверцы закрываются, приводится во вращение вентилятор, нагнетающий горячий воздух в печь, и включается обогрев (паровой или электрический). Вначале сушка пропитанных обмоток производится при максимальном освежении воздуха в печи и температуре $60\text{—}70^{\circ}\text{C}$; затем температура повышается до $120\text{—}140^{\circ}\text{C}$. Длительность сушки главным образом зависит от температуры, размеров обмотки, типа изоляции, а также от скорости циркулирующего воздуха и степени его освежения. Кроме того, длительность сушки для вращающихся обмоток должна быть больше, чем для невращающихся тех же габаритов.

Состояние изоляции пропитанных обмоток при сушке может контролироваться изменением сопротивления изоляции или емкости, а также по состоянию лака в местах натеков. Быстро вращающиеся обмотки необходимо проверять после сушки на разбрызгивание лака при рабочей температуре и нормальной или повышенной (на 20%) скорости вращения.

3. После окончания сушки обмотки выгружают из печи и оставляют на воздухе для охлаждения. Если обмотки подвергаются повторной пропитке, то они охлаждаются на воздухе до температуры $60\text{—}70^{\circ}\text{C}$ и затем снова погружаются в лак.

Вакуумная сушка пропитанных обмоток. Применение вакуумной сушки дает возможность удалять растворитель при низких температурах. При этом можно добиться более совершенного удаления растворителей из глубины обмоток без опасности отверждения лака на поверхности.

При вакуумной сушке пропитанные обмотки нагревают до $60\text{—}70^{\circ}\text{C}$ и выделяющиеся из лака растворители откачивают вакуумным насосом. После предварительной вакуумной сушки

пропитанные в маслосодержащих лаках обмотки следует сушить в печи с циркуляцией воздуха, так как при отсутствии воздуха сильно замедляются оксидационные процессы в лаковых основах, особенно внутри обмоток.

Кроме режимов, описанных выше, сушка пропитанных обмоток может производиться:

а) инфракрасными лучами, на воздухе или в специальных печах;

б) при помощи специальных воздуходувок, с подогревом воздуха (при сушке крупных машин и при ремонтах);

в) при нагреве обмоток током (при сушке крупных машин).

В табл. 4,6 приведены ориентировочные режимы сушки пропитанных обмоток для различных размеров типов и исполнений обмоток.

г) Лакировка обмоток

Лакировка представляет собой процесс нанесения на поверхность обмотки тонкого слоя покровного электроизолирующего лака или эмали.

При лакировке обмоток необходимо обеспечить покрытие всей поверхности непрерывной и равномерной пленкой лака или эмали. При этом пленка лака или эмали не должна быть слишком тонкой, так как защитное действие очень тонкого покрытия может оказаться недостаточным. С другой стороны, толстый слой лака или эмали, нанесенный на поверхность обмотки, требует длительной сушки и образует недостаточно гибкую и недостаточно плотную пленку.

Толщина лаковой пленки при однократном покрытии должна быть в пределах 0,05—0,10 мм. Если необходимо более толстое лаковое покрытие, то его следует получать многократным нанесением лака. Лаковая пленка, состоящая из нескольких тонких слоев лака, обладает более высокими характеристиками, чем пленка, полученная при однократном нанесении. Проведенные автором исследования показали, что при однократном нанесении лака или эмали на поверхность обмотки практически невозможно получить достаточно плотное влагонепроницаемое покрытие. Поэтому во всех тех случаях, когда к лаковому покрытию предъявляются повышенные требования (машины с влагостойкой и химически стойкой изоляцией), необходимо применять многократное нанесение лака или эмали.

В настоящее время применяются следующие основные методы лакировки обмоток электрических машин:

а) Нанесение лака или эмали с помощью пульверизатора. При этом способе жидкий лак или эмаль распыляется струей сжатого воздуха и наносится на поверхность обмотки. Пульверизация лака или эмали является

Таблица 4,6

Тип обмоток	Способ сушки после про- питки	Температу- ра сушки в °C	Длительность сушки в час.
Малые катушки низковольтных машин с изоляцией класса А	В печи с циркуляцией воздуха	120—130	2—3
Средние катушки низковольтных машин с изоляцией класса А	То же	120—130	3—4
Крупные катушки низковольтных машин и аппаратов с изоляцией класса А	То же	120—130	5—8 и более
Средние катушки низковольтных машин с изоляцией класса В и ВС	То же	140—160	4—6 и более
Крупные катушки низковольтных машин с изоляцией класса В и ВС	То же	140—160	6—12 и более
Статоры, роторы, якоря (обмотанные) низковольтных машин нормального исполнения с изоляцией класса А:	То же		
а) Мелкие	}	120—130	3—6
б) Средние			6—8
в) Крупные			10—18 и более
Статоры, роторы, якоря (обмотанные) низковольтных машин нормального исполнения с изоляцией класса В и ВС	То же		
а) Средние	}	140—160	6—12
б) Крупные			12—18 и более
Статоры, роторы, якоря (обмотанные) машин влагостойкого исполнения:	То же		
а) Мелкие	}	120—130	4—6
б) Средние			6—12
в) Крупные			12—24 и более

наиболее удобным и совершенным методом нанесения окончательного (отделочного) слоя лака или эмали на собранные обмотки.

Однако при пульверизации невозможно обеспечить надежное покрытие трудно доступных поверхностей обмоток. Поэтому в тех случаях, когда необходимо получить непрерывное по-

крытие обмоток по всей поверхности, следует применять метод окунания.

б) Нанесение лака или эмали окунанием (погружением). При этом методе обмотки, подлежащие лакировке (отдельные детали обмотки или в собранном виде), погружаются на несколько минут в покровный лак. После извлечения обмоток из лака на всей поверхности образуется непрерывная пленка лака или эмали.

Метод окунания следует рекомендовать для лакировки отдельных элементов обмоток (катушек, секций и т. п.), а также для собранных обмоток в тех случаях, когда необходимо обеспечить нанесение непрерывного лакового слоя по всей поверхности обмоток (машины с влагостойкой и химически стойкой изоляцией).

Этот метод трудно осуществим для лакировки собранных обмоток крупных машин, так как при этом необходимо наличие больших ванн с лаком и соответствующих транспортных устройств.

в) Нанесение лака или эмали с помощью кисти. Это наиболее простой и вместе с тем наименее совершенный метод нанесения лака или эмали на поверхность обмоток. При этом способе лак или эмаль наносится на поверхность обмоток вручную с помощью кисти. При нанесении лака для эмали кистью на обмотки сложной формы (лобовые части обмоток электрических машин) трудно добиться равномерного покрытия. Кроме того, покрытие кистью является весьма трудоемким процессом. Поэтому этот метод следует применять только в тех случаях, когда другие более совершенные методы нанесения лака недоступны (при ремонтных работах).

Обмотки после нанесения на них лака или эмали одним из описанных выше методов подвергаются сушке на воздухе или в печи в зависимости от типа примененного лака или эмали. Для окончательной отделки собранных обмоток электрических машин обычно применяются покровные лаки или эмали воздушной сушки.

Для быстровращающихся и сильно нагреваемых обмоток следует применять лаки и эмали печной сушки (эмаль СПД). При покровных пропитках обмоток с влагостойкой изоляцией следует применять специальные лаки, например, асфальто-масляные типа № 460 (печной сушки).

Для повышения химической стойкости изоляции обмоток следует рекомендовать применение покровных пропиток (окунанием) в химически стойких лаках.

Обмотки машин и аппаратов с нагревостойкой изоляцией (классы В, ВС и СВ) должны покрываться высоконагревостойкими лаками или эмалями печной сушки, изготовленными на основе модифицированных глифталевых или кремний-органических смол.

Технологические процессы лакировки обмоток. Лакировка обычно следует непосредственно за сушкой пропитанных обмоток. При этом полностью пропитанные и хорошо высушенные обмотки еще в теплом виде ($50-60^{\circ}\text{C}$) покрываются лаком или эмалью одним из описанных выше методов.

При покрытии обмоток лаком или эмалью воздушной сушки при помощи пульверизатора в резервуар «пистолета» заливается лак или эмаль, разбавленные до вязкости 8—10 сек. по воронке НИИЛК. Обмотка по всей поверхности равномерно покрывается лаком или эмалью. Затем лаку или эмали дают подсохнуть на воздухе в течение 10—15 мин., после чего «задувку» лаком или эмалью повторяют.

Сушку обмоток, покрытых лаком или эмалью воздушной сушки, производят на воздухе до исчезновения липкости (обычно 12—18 час.). Для сокращения времени сушки лакового покрытия до 3—4 час. можно применять сушку в печи при температуре $70-80^{\circ}\text{C}$. Покровные лаки и эмали печной сушки сушатся при температуре $100-120^{\circ}\text{C}$. При этом нагрев обмоток (отдельных деталей или в собранном виде) производится в печи или же при помощи инфракрасных ламп. Возможно также применение специальных воздуходувок с электрическим или паровым калорифером.

При отсутствии этих возможностей допустима сушка лакированных обмоток теплом электрических потерь. Лакировка обмоток окунанием отличается от пропитки в основном временем выдержки обмоток в лаке. Время выдержки обычно составляет от 10—15 сек. до 2—3 мин. в зависимости от конфигурации и размеров обмоток. Для больших роторов и якорей вместо полного погружения в лак можно применять частичное (до вала), с последующим проворачиванием ротора или якоря.

Покрытые лаком или эмалью обмотки подвергаются воздушной или печной сушке. У лакированных обмоток пленка лака или эмали должна быть гладкой, блестящей и равномерной по всей поверхности, без подтеков и не должна давать отлипа.

В табл. 4,7 приведены ориентировочные данные по лакировке обмоток электрических машин различных исполнений.

д) Обмазка лобовых частей обмоток пастами (компаундами)

Для обеспечения более надежной защиты изоляции лобовых частей мелких электрических машин от воздействия пыли, влаги и химических реагентов применяется обмазка специальными пастами. Обмазка лобовых частей машин производится после их окончательной пропитки и сушки. Для обмазки лобовых частей статоров мелких асинхронных двигателей можно

Таблица 4,7

Тип обмоток	Способ лакировки	Тип покровного лака или эмали	Температура сушки в °С	Время сушки в час.
Обмотанные статоры машин переменного тока нормального исполнения	Пulьверизация	462, СВД, КВД	20	6—24
Якорь и роторы (обмотанные) нормального исполнения	То же	462, СПД	80—110	4—8 и более
Обмотанные статоры машин переменного тока с влагостойкой изоляцией	Погружение, пульверизация	462, СВД, СПД	20 110—120	6—24 3—10
Якорь и роторы (обмотанные) с влагостойкой изоляцией	Погружение, пульверизация	460 462, СВД, СПД	120—130 20 110—120	8—12 и более 6—24 4—12

рекомендовать применение пасты ЭЛСИ, компаунда Л4402 ХЭМЗ или компаунда на оксифенильной смоле.

Обычно пасты наносятся на лобовые части обмоток двухкратным покрытием. Паста наносится деревянной лопаточкой или рукой поверх лобовых частей обмотки статора. Паста должна полностью заполнить неплотности и покрытые места; особенно тщательно необходимо втирать пасту в места выхода катушек из пазов. Втирание пасты следует производить с нажимом, так как простое накладывание ее приводит к неплотному прилеганию пасты к обмотке и образованию воздушных мешков, которые вспухают во время сушки; в дальнейшем это ведет к обсыпанию пасты и обнажению обмотки. Толстый слой пасты класть не следует, во избежание вспухания ее во время сушки, а также перегрева обмотки из-за ухудшения теплоотдачи. Толщина слоя пасты при двухкратном покрытии должна быть от 3 мм (на торце обмотки) до 8—10 мм (в месте выхода обмотки из паза со стороны корпуса). Для того, чтобы поверхность нанесенной пасты была гладкой, необходимо ее растереть рукой, слегка смачивая поверхность пасты ксилолом или толуолом. После нанесения первого слоя пасты следует сушка на воздухе, а затем печная сушка при температуре 80—120° С.

Длительность сушки после первого покрытия лобовых частей пастой зависит от состава пасты, температуры сушки, а также размеров статоров. Для небольших двигателей (второй и третий габариты) длительность сушки после обмазки лобо-

вых частей пастой ЭЛСИ составляет 8—10 час. при температуре 80—90° С и 4—5 час. при температуре 120° С.

Второе, отделочное, покрытие пастой имеет целью устранить бугорки, углубления, выступающие проводники и т. п., оставшиеся при первой обмазке, и создать гладкую поверхность. После второй обмазки не должно быть заметно контуров отдельных катушек (секций), находящихся под слоем пасты.

Технологический процесс нанесения второго слоя пасты и последующей сушки аналогичен процессу при первом (основном) покрытии. После сушки второго покрытия удаляются скребком все излишки пасты, которые могут выступать в воздушном зазоре расточки статора, и вся поверхность пасты покрывается покровным лаком или эмалью.

При применении обмазочного компаунда (замазки) на основе оксидифенильной смолы он наносится на лобовые части пропитанного статора в горячем состоянии (150—180° С). Затем следует запечка при 120° С в течение 12—14 час. После запечки поверхность, обмазанная компаундом, покрывается покровным лаком или эмалью. Пасты могут наноситься на лобовые части машин, находившихся в эксплуатации. В этих случаях обмотки перед нанесением пасты должны быть самым тщательным образом очищены от пыли, грязи, смазки и т. п.

4.4. Контроль сушки, пропитки и лакировки

Для того, чтобы обеспечить высококачественную сушку, пропитку и лакировку обмоток электрических машин, необходимо иметь хорошо налаженный контроль лаков, эмалей и компаунда, применяемых для пропитки и покрытия обмоток, а также технологические режимы и готовой продукции.

Все поступающие в пропиточное отделение лаки, эмали, компаунды, а также разбавители, должны быть предварительно испытаны в лаборатории и должны иметь протокол испытания и разрешение ОТК на их применение. Контроль лаков должен производиться в соответствии с техническими условиями и методами, установленными в ГОСТ 2256-43 и ОСТ 10086-39.

Лаки в процессе применения изменяют свои характеристики вследствие частичного испарения растворителей, а также попадания в них влаги и загрязнения. Поэтому необходимо периодически контролировать лаки, находящиеся в пропиточных ваннах.

Как указывалось выше, вязкость лака оказывает большое влияние на скорость пропитки обмоток электрических машин, а концентрация лака — на остаточное заполнение пор и капилляров основой лака. Поэтому определение одной только вязкости лаков недостаточно, так как при частичной коагуляции

лаковой основы или при нарушении соотношения растворителей в смеси вязкость лака будет высокой даже при низком содержании основы.

Количество разбавителя, которое необходимо добавлять в лак при его загустевании ниже установленных пределов, может быть определено по формуле

$$x = \frac{h a g_1}{g_2} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right). \quad (4,5)$$

Количество свежего лака, необходимого для пополнения пропиточной ванны до нормального уровня, может быть определено по формуле

$$y = \frac{h a g_1 (b_2 - b_1)}{g_3 (b_3 - b_2)}, \quad (4,6)$$

где x — количество требуемого разбавителя в кг;

y — количество свежего лака в кг;

h — рабочая высота пропиточного бака в см;

a — количество лака, приходящееся на 1 см высоты пропиточной ванны в кг;

g_1 — удельный вес лака в ванне;

g_2 — удельный вес разбавителя;

g_3 — удельный вес свежего лака;

b_1 — содержание нелетучих в лаке, находящемся в ванне, в процентах по весу;

b_2 — желаемое содержание нелетучих после разбавления в процентах по весу;

b_3 — содержание нелетучих в свежем лаке в процентах по весу.

После каждого разбавления лака необходимо проверять его вязкость и концентрацию. Кроме того, эти характеристики лака должны определяться перед каждой пропиткой. В тех случаях, когда для пропитки обмоток применяется лак с одним растворителем (бензин или спирт и др.), контроль состояния лака может быть осуществлен и по удельному весу, который в этом случае определяет вязкость лака и содержание нелетучих.

Периодически, но не реже одного раза в месяц, из пропиточных ванн должны отбираться пробы лаков и направляться в лабораторию для типовых испытаний.

Пропиточные компаунды также изменяют свои характеристики в процессе работы, а поэтому их необходимо восстанавливать. Чтобы понизить температуру размягчения основного компаунда, которая повышается при длительном нагреве благодаря испарению летучих частей компаунда, а также окислительным и полимеризационным процессам, необходимо к компаунду периодически добавлять компаунд-разбавитель, который имеет более низкую температуру размягчения.

Необходимое количество компаунда-разбавителя, который должен быть добавлен в котел для восстановления основного компаунда, можно определять по формуле

$$b = a \cdot \frac{t_1 - t_3}{t_3 - t_2}, \quad (4,12)$$

где a — количество пропиточного компаунда в пропиточном котле;

b — количество компаунда-разбавителя, которое необходимо добавить для восстановления основного компаунда (a и b — в одинаковых единицах);

t_1 — температура размягчения основного компаунда, находящегося в котле;

t_2 — температура размягчения компаунда-разбавителя;

t_3 — требуемая температура размягчения смеси.

Для того, чтобы обеспечить нормальное качество компаунда в котлах, необходим периодический контроль. Температура размягчения должна контролироваться ежедневно, а также после каждого добавления компаунда-разбавителя и новых порций основного компаунда. Пропитывающая способность компаунда должна контролироваться один раз в неделю. Если в котле производится компаундирование высоковольтных обмоток, то необходимо не реже одного раза в месяц отбирать пробу компаунда из котла и направлять в лабораторию для типовых испытаний.

В процессе предварительной сушки обмоток электрических машин должны контролироваться: температура в рабочих зонах сушильной печи и время, а также степень освежения воздуха в первый период сушки (по положению заслонок).

Для контроля температуры лучше всего применять самопишущие дистанционные термометры. Контроль состояния изоляции обмоток высоковольтных и ответственных машин и аппаратов при сушке может быть с большим успехом осуществлен по изменению сопротивления или емкости в процессе сушки или же по абсорбционным кривым.

Сопротивление изоляции электрических машин и аппаратов обычно измеряется меггомметром с напряжением 500—1 000 в.

При измерении сопротивления изоляции следует учитывать температуру обмотки.

Для изоляции обмоток электрических машин зависимость сопротивления от температуры может быть выражена формулой

$$R_2 = R_1 e^{-\alpha(t_2 - t_1)}, \quad (4,13)$$

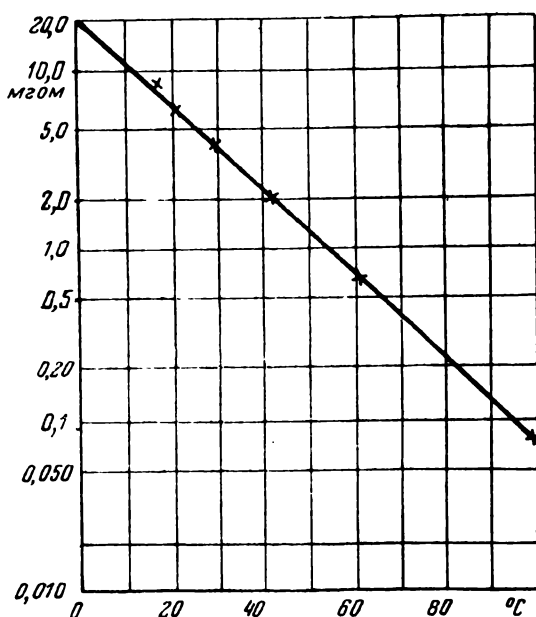
где R_1 — сопротивление изоляции в омах (или мегсмах) при температуре t_1 ;

R_2 — сопротивление изоляции в омах (или мегомах) при температуре t_2 ;

α — температурный коэффициент сопротивления изоляции, зависящий от примененных для изоляции машины материалов.

Для сухой обмотки электрической машины с изоляцией класса А можно принять $\alpha \approx \frac{1}{40}$.

Зависимость сопротивления изоляции статорной обмотки от температуры для электродвигателя с высушенной изоляцией класса А приведена на фиг. 4,19.



Фиг. 4,19.

Как следует из фиг. 4,19, при нагреве обмотки этого двигателя с 15° до 100° С сопротивление изоляции падает в 100 раз.

При вакуумной сушке обмоток контроль процесса сушки ведется также по количеству отсасываемой влаги, которая скапливается в сборнике конденсационной колонки.

Один из наиболее простых и часто применяемых способов определения длительности выдержки обмоток в лаке при их пропитке — это наблюдение за выделением пузырьков воздуха из лака, в который погружены обмотки; прекращение выделения пузырьков указывает, что основная часть пор и капилля-

ров уже заполнена лаком. Несмотря на всю простоту и доступность этого метода, он не может служить надежным критерием при установлении длительности выдержки обмоток в лаке. Представляет интерес предложенный и опробованный автором метод контроля процесса проникания лака в поры и капилляры по изменению емкости изоляции обмотки в процессе пропитки.

Самым надежным методом проверки качества пропитки обмоток является разрезание контрольных образцов последних, снятие изоляции или расчленение после их выдержки в лаке.

При пропитке обмоток с применением вакуума и давления должны контролироваться: время, вакуум, давление и температура пропитывающего состава. Для этого лучше всего применять самопишущие приборы. Иногда для контроля пропитки ответственных обмоток (катушки возбуждения электрических машин морского исполнения), производится (периодически) разрезание одной-двух катушек и осмотр их внутренних частей. Контроль качества пазовой изоляции высоковольтных обмоток после их компаундирования осуществляется путем измерения тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от напряжения при нормальной температуре ($20 \pm 5^\circ \text{C}$).

Контроль сушки обмоток после пропитки в лаках производится по времени и температуре в рабочей зоне сушильной печи.

Для ответственных и высоковольтных машин состояние изоляции при сушке пропитанных обмоток контролируется по сопротивлению, которое замеряется мегомметром при напряжении 1 000—500 в или емкости. Контроль состояния лака при сушке пропитанных обмоток может быть произведен также прощупыванием мест скопления лака; если в этих местах лак «схватился», то это служит признаком окончания процесса сушки.

Контроль сушки пропитанных обмоток быстровращающихся якорей и роторов может быть установлен после их проворачивания при нагреве. Разбрызгивание лака при этом испытании служит признаком недостаточной сушки.

Контроль лакировки обмоток после сушки производится также внешним осмотром (непрерывность пленки по всей поверхности, гладкость, блеск и т. п.) и пробой ногтем (твердость пленки).

4,5. Правила обращения с электроизоляционными лаками, эмалями и компаундами

В зависимости от условий хранения, транспортировки и длительности использования консистенция лаков и эмалей подвергается значительным изменениям. Указанные изменения не

только затрудняют, но и могут сделать невозможным использование лака или эмали для пропитки или покрытия обмоток. Из сказанного следует, что при хранении и использовании лаков необходимо соблюдать ряд правил.

1. Лаки и эмали следует хранить при температуре не ниже $1-2^{\circ}\text{C}$, а лаки и эмали, содержащие бензол,— при температуре не ниже $8-10^{\circ}\text{C}$. Не следует также допускать хранения лаков при повышенных температурах (выше $20-25^{\circ}\text{C}$).

2. Тара, в которой хранится лак или эмаль, должна быть очень плотно (лучше всего герметически) закрыта. Бочки или баки, в которых содержится лак или эмаль, должны быть чистыми, потому что загрязнения не только портят внешний вид пленки, но и ухудшают физико-химические и диэлектрические свойства лаков и эмалей.

3. Пропиточный лак, находящийся в эксплуатации, следует периодически подвергать очистке (центрифугированию, фильтрации через ткань или металлическую сетку).

4. При использовании и после очистки лак или эмаль изменяет свою консистенцию из-за улетучивания растворителей; для разжижения необходимо добавлять обязательно тот разбавитель, который рекомендуется заводом-изготовителем. Каждый лак имеет определенные разбавители. От применения других разбавителей лак или эмаль может свернуться.

При разбавлении лаков и эмалей разбавитель должен вливаться медленно, небольшими порциями, при постоянном перемешивании; он должен иметь, во избежание свертывания (коагуляции), ту же температуру, что и разбавляемый лак или эмаль. После каждого разбавления лака или эмали до нужной консистенции необходимо проверить качество получающейся лаковой пленки. Это легко сделать путем погружения в лак тонкой и гладкой бумаги (например, конденсаторной). Если при этом пленка получается ровной, без крупинки и следов расслоения, можно быть уверенным, что лак разбавлен правильно; в противном случае лак для пропитки или лакировки не пригоден.

Пары многих растворителей (бензол, ацетон и др.) вредно действуют на органы дыхания и слизистые оболочки глаз, носа, на кожу рук и лица. Значительное количество паров растворителя, смешиваясь с воздухом, образует взрывчатые смеси. Поэтому сугубое внимание должно быть уделено вопросам охраны здоровья работающих с лаками и эмалями, а также пожарной безопасности помещений, в которых хранятся или используются лаки или эмали.

Пропиточные (битумные) компаунды должны храниться в специальных закрытых складах, где они не могут подвергаться загрязнению, а также воздействию повышенных температур.

При хранении обмазочных компаундов (например, пасты ЭЛСИ) также следует принимать специальные меры для устранения преждевременного затвердения (герметизация, хранение в прохладном, но не холодном месте и др.).

4.6. Мероприятия по технике безопасности при пропитке, сушке и лакировке обмоток

При проведении пропитки, а также сушки пропитанных и лакированных обмоток необходимо учитывать возможность вспышек и самовоспламенения паров растворителей. В табл. 4,8 приведены температуры вспышек и самовоспламенения технических растворителей и разбавителей, наиболее часто применяемых в пропиточных лаках.

Таблица 4,8

Наименование растворителей и разбавителей	Температура вспышки в °С	Температура самовоспламенения в °С
Бензин	от 10 до 55	415—580
Бензол	+ 12	Около 580
Толуол	От 5 до 6	253—553
Ксилол	От 23 до 25	Около 553
Сольвентнафта	21—22	. 553
Скипидар	30—45	. 252
Уайт-спирит	Не ниже 33	. 580

Как следует из табл. 4,8, в помещениях, где проводится работа с лаками, совершенно недопустимо наличие открытого огня, раскаленных проводников, электрических искр и т. п.

При проектировании и организации участков, где будет производиться пропитка, лакировка и сушка пропитанных и лакированных обмоток, необходимо предусмотреть следующие мероприятия:

- а) применение только негорючих строительных материалов;
- б) выделение пропиточных участков в отдельные помещения, изолированные огнестойкими перегородками от соседних участков;
- в) применение только специальной взрывобезопасной электрической проводки и аппаратуры (установочной и осветительной) и закрытых взрывобезопасных двигателей;
- г) хорошая приточно-вытяжная вентиляция (общая и местная), предотвращающая возможность образования взрывоопасных концентраций растворителей;

д) запрещение пользования твердыми ударными и рубящими инструментами (стальными молотками, зубилами и т. п.) из-за опасности появления искр при ударах;

е) категорическое запрещение курения;

ж) большие световые проемы и легкие перекрытия, легко разрушающиеся при взрыве, и др.

Кроме этих мероприятий профилактического характера, следует также предусматривать специальные мероприятия, направленные на ликвидацию возникших пожаров (ящики с песком, пенотушители и др.). Недопустимо применение воды для тушения загоревшегося жидкого лака и растворителей.

Кроме того, следует предусмотреть ряд мер, облегчающих труд рабочих на пропиточных участках, как то: надежная вентиляция рабочих мест у пропиточных ванн, максимальная герметизация жидких лаков и легколетучих растворителей, устройство душевых и др.

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

5.1. Общие положения

Для обеспечения необходимого качества изоляции вновь изготавливаемых, а также ремонтируемых электрических машин, производится контроль и испытание как исходных электроизоляционных материалов, поступающих на заводы, так и изоляции отдельных элементов машин в процессе их производства, а также изоляции готовых машин при их выпуске с завода или из ремонтной мастерской. В настоящее время на электромашиностроительных заводах проводятся следующие виды контроля и испытаний изоляции: 1) контроль электроизоляционных материалов; 2) контроль изоляции обмоточных проводов; 3) контроль изоляции отдельных элементов электромашин в процессе их изолировки и сборки; 4) испытание изоляции готовых машин.

Испытания изоляции машин могут быть нормальными, вытекающими из требований ГОСТ, а также специальными, когда машина или ее часть подвергается каким-либо специальным исследованиям (определение водостойкости, химической стойкости, нагревостойкости и т. п.). В данной главе будут рассмотрены главным образом нормальные, наиболее часто применяемые способы контроля электрической изоляции, применяемые в настоящее время на электромашиностроительных заводах.

5.2. Контроль изоляционных материалов

Все поступающие на завод материалы должны подвергаться приемочному контролю, при котором устанавливается соответствие полученного на завод материала требованиям ГОСТ или же технических условий. При этом приемочным аппаратом ОТК производится внешний осмотр поступившей на завод

партии материала для установления отсутствия внешних дефектов, ухудшающих его качество, а также проверка размеров. Затем производится отбор образцов материала в соответствии с предписаниями ГОСТ или ТУ. Отобранные образцы направляются для их испытаний в соответствующую лабораторию.

При приемочных контрольных испытаниях электроизоляционных материалов обычно проводится проверка размеров, а также физических (плотность, гигроскопичность, нагревостойкость), механических (прочность на разрыв, изгиб и сжатие, удельная вязкость, твердость, число двойных перегибов и др.), электрических (объемное и поверхностное удельные сопротивления, электрическая прочность, диэлектрические потери), а также химических (кислотность, наличие солей и др.) характеристик. Так как характеристики электроизоляционных материалов зависят от их состояния и особенно влажности и температуры, то для получения сравнимых результатов их испытания следует производить после приведения образцов к вполне определенному состоянию, что достигается выдерживанием испытуемых образцов в атмосфере с определенной влажностью и температурой, как это предписывается соответствующими ГОСТ или ТУ.

Так как вопросы испытания электроизоляционных материалов подробно освещены в специальной литературе (например, в книге «Испытание электроизолирующих материалов» под ред. проф. М. М. Михайлова), то этот вопрос нами не рассматривается.

5.3. Контроль изоляции обмоточных проводов

Для установления соответствия изоляции обмоточных проводов, поступающих на электромашиностроительный завод, требованиям ГОСТ или ТУ производится приемочный контроль. При этом выявляются как внешние дефекты изоляции, так и качество самой изоляции обмоточных проводов.

У проводов с волокнистой изоляцией наиболее часто встречаются следующие основные дефекты изоляционного слоя:

1. Оголенные места из-за неправильного наложения пряжи (просветы повива), а также из-за механического разрушения изоляционного слоя при транспортировке.

2. Неровная узловатая изоляция.

3. Разреженная изоляция из-за неправильной работы обмоточной машины на кабельном заводе.

4. Свободные нитки поверх нормального повива из-за неправильной работы обмоточной машины на кабельном заводе.

Все эти дефекты являются неустраняемыми, и провод с такими дефектами подлежит браковке,

В проводах с эмалевой изоляцией чаще всего встречаются следующие дефекты:

1. Наличие оголенных мест, видимых невооруженным глазом.

2. Хрупкость эмалевого слоя, легко отскакивающего при изгибе провода или же соскабливании ногтем.

3. Сырая эмаль, дающая заметный отлив.

Эти внешние дефекты изоляционного слоя указывают на низкое качество провода, и такой провод подлежит браковке. Кроме приведенных выше внешних дефектов, провод может иметь и другие дефекты, которые могут быть обнаружены при его обмере и испытаниях по ГОСТ и ТУ.

Так как толщина изоляционного слоя обмоточных проводов имеет весьма существенное значение в производстве обмоток электрических машин, то при приемке проводов необходимо производить замер толщины изоляции и отбраковывать все провода, имеющие толщину изоляции, выходящую из допусков ГОСТ или ТУ. Вопросы испытаний обмоточных проводов подробно изложены в соответствующих руководствах и поэтому нами не рассматриваются.

5.4. Контроль изоляции обмоток в процессе их производства

Для того, чтобы своевременно обнаружить дефекты в изоляции обмоток в процессе их производства и предупредить возможный брак, необходимо производить пооперационный контроль на основных стадиях производственного процесса. В настоящее время применяются следующие основные методы пооперационного контроля изоляции обмоток:

1. Внешний осмотр. Несмотря на субъективность, этот метод весьма широко применяется при пооперационном контроле изоляции в обмоточно-изолировочных цехах и мастерских, так как он позволяет своевременно заметить такие дефекты, как механические повреждения изоляции (трещины, морщины, просветы и т. п.), неправильности в наложении отдельных слоев изоляции (например, неправильный перехлест изоляционных лент), припухлости, плохая склейка, плохая пропитка и лакировка и др. Поэтому изоляция обмоток в процессе их изготовления должна подвергаться после проведения отдельных операций (изолировки, прессовки, пропитки, лакировки и др.) внешнему осмотру. Обнаруженные при внешнем осмотре дефекты или устраняются, если это возможно и целесообразно, или же производится окончательная браковка.

2. Контроль геометрических размеров изоляции. Обмотки электрических машин должны иметь строго определенные размеры, особенно в тех частях, где они сопрягаются с другими элементами машины. Особенно высокие тре-

бования в отношении точности размеров предъявляются к пазовой части обмоток. Если толщина изоляции обмотки больше указанной в чертеже, то катушка или же стержень не смогут быть уложены в паз статора, якоря или ротора и подлежат переизолировке. Наличие более тонкой изоляции, выходящей из допусков, также не допустимо, так как при этом в пазу машины образуются излишние воздушные зазоры, ухудшающие теплоотдачу обмотки и способствующие прониканию влаги в паз машины, а также способствующие возникновению коронирования в высоковольтных машинах. Кроме того, при очень свободной укладке обмоток в машину трудно добиться их прочного закрепления в пазу.

Контроль размеров изоляции производится с помощью микрометров, штангенциркуля или же специальных калибров (при массовом производстве). Кроме описанных выше методов контроля изоляция электрических машин подвергается электрическим испытаниям, которые рассмотрены ниже.

5.5. Испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса

Для обеспечения необходимого запаса электрической прочности изоляции электрических машин производится ее испытание повышенным против нормального напряжением.

При изолировке обмоток, их укладке в машину, а также при общей сборке машины, может произойти повреждение изоляции, приводящее к снижению пробивного напряжения изоляции обмотки ниже допустимых пределов. Поэтому все вновь изготовленные заводом машины, а также машины, вышедшие из ремонта, подвергаются после окончательной сборки испытанию повышенным напряжением по ГОСТ 183-41. Однако выявленный при этом испытании дефект, вызвавший пробой изоляции испытательным или более низким напряжением, заставляет производить разборку машины и замену пробитых частей обмоток новыми, что связано с значительными расходами и срывом сроков выпуска машины.

Это вызывает необходимость производить испытания изоляции катушек, полукатушек и стержней до их укладки в машину, а также непосредственно после укладки. Выявляя дефекты в изоляции обмоток в процессе их изготовления и монтажа, можно свести до минимума случаи пробоя изоляции у окончательно собранных машин.

Установки для испытания электрической прочности основной изоляции обмоток. Для испытания электрической прочности основной изоляции обмоток применяются специальные установки, позволяющие получать высокое напряжение технической частоты. Эти установки

могут быть стационарными или же передвижными. Стационарные установки обычно применяются для испытаний изоляции отдельных катушек, полукатушек и секций до их укладки, а также изоляции собранных машин.

Для испытаний изоляции обмоток крупных машин в процессе их укладки часто применяются передвижные установки, которые легко перемещаются по участку, где производится укладка обмотки в машину. Применение передвижных высоковольтных установок позволяет производить испытание электрической прочности на месте сборки машины без ее транспортировки на испытательную станцию.

Установки для испытания электрической прочности изоляции обмоток состоят из следующих основных элементов:

- 1) испытательный трансформатор высокого напряжения;
- 2) регулирующее устройство;
- 3) устройство для измерения высокого напряжения.

Высокое напряжение, необходимое для испытания изоляции обмоток, подается от специального испытательного трансформатора. Мощность испытательного трансформатора не должна быть слишком малой; для машин, испытываемых напряжением 5—10 кВ, мощность трансформатора должна быть не менее 3—5 кВ, а при испытательных напряжениях 20—50 кВ мощность трансформатора должна быть не менее 10 кВА. Для высоковольтных мощных турбогенераторов мощность испытательного трансформатора достигает 25—50 кВА. Испытательные трансформаторы должны давать напряжение практически синусоидальной формы.

Для испытания изоляции следует применять наиболее простой и дешевый тип испытательного трансформатора — с принудительным заземлением одного из концов высоковольтной обмотки.

Изменение вторичного напряжения испытательного трансформатора производится путем регулировки напряжения, подаваемого на первичную обмотку.

Из регулировочных устройств наиболее употребительными являются следующие: реостаты, потенциалрегуляторы и автотрансформаторы.

Хорошие результаты для регулировки напряжения дает применение потенциалрегуляторов и автотрансформаторов. Для регулировки мощных трансформаторов (50—100 кВА и выше), применяются специальные двигатели-генераторы.

Измерение напряжения на высокой стороне испытательного трансформатора чаще всего производится по первичному напряжению.

Однако указанный метод определения величины напряжения на вторичной обмотке трансформатора может привести к грубым ошибкам, если трансформатор при испытании перегру-

жается. В этом случае рекомендуется измерять высокое напряжение статическим вольтметром или же посредством измерительного трансформатора напряжения.

Измерение испытательного напряжения при испытании крупных высоковольтных машин и турбогенераторов лучше всего производить специальным измерительным трансформатором напряжения.

Для того, чтобы исключить возможность подачи на испытываемую обмотку напряжений более высоких, чем испытательные, можно рекомендовать приключение параллельно испытываемому объекту шаровых разрядников, установленных на напряжении, несколько превышающее испытательное.

Так как высокое напряжение, применяемое при испытании электрической прочности обмоток, представляет опасность для жизни, то необходимо применять меры, предотвращающие возможность несчастных случаев из-за прикосновения к частям установки, находящимся под высоким напряжением.

Испытательные стенды должны быть надежно защищены загородкой или сеткой, а также соответствующими плакатами. Кроме того, для предупреждения обслуживающего персонала о наличии высокого напряжения на испытательной установке следует применять световые (яркокрасные электролампы) или звуковые (звонок, сирена) сигналы. Дверцы для входа на испытательное поле должны быть надежно блокированы.

Испытание электрической прочности основной изоляции обмоток до их укладки. Это испытание производится у отдельных элементов обмоток (катушек, полукатушек, стержней и т. п.), полностью изолированных, до их укладки в машину.

Для испытания основной изоляции катушек, полукатушек, стержней и т. п. повышенным напряжением на часть обмотки, подлежащую испытанию, накладывается электрод из металлической фольги.

Этот электрод обычно заземляется. Медь обмотки присоединяется к незаземленной стороне вторичной обмотки испытательного трансформатора.

При массовых испытаниях единообразных катушек, полукатушек и стержней для ускорения испытания применяются макеты пазов (металлические или деревянные, обтянутые тонкой латунной сеткой), в которые укладываются испытываемые части обмоток.

Испытание изоляции катушек, полукатушек и секций до укладки начинается с напряжения, не превышающего одной трети испытательного напряжения. Полное испытательное напряжение выдерживается в течение 1 мин., после чего снижается до одной трети своего значения и отключается. Если изоляция испытываемой обмотки выдерживает испытательное на-

пряжение, то стрелка вольтметра остается на месте. При пробое изоляции напряжение на высокой стороне падает, а ток в первичной обмотке трансформатора резко возрастает. Место пробоя изоляции обмотки обнаруживается по дыму и искрению.

Испытательные напряжения, применяемые советскими электромашиностроительными заводами при испытании электрической прочности полностью изолированных обмоток до их укладки в машину, приведены в табл. 5,1.

Испытание электрической прочности основной изоляции обмоток после их укладки. Для выявления дефектов в изоляции, которые возникли при укладке обмоток в машину, производится последующее испытание повышенным напряжением. Обычно испытание изоляции обмоток, уложенных в машину, производится 3 раза: 1) после укладки обмотки в машину; 2) после соединения, запайки и закрепления (бандажировки) обмотки; 3) у готовых машин в соответствии с ГОСТ 183-41.

При этих испытаниях к испытываемой части обмотки подводится высокое напряжение от испытательной установки и выдерживается 1 мин. или 15 сек.

Величины испытательных напряжений, применяемых советскими заводами при испытании электрической прочности обмоток, уложенных в машину, приведены в табл. 5,2 (после укладки, до соединения), в табл. 5,3 (после соединения, пайки и бандажировки) и в табл. 5,4 (для готовых машин после их полной сборки).

У готовых машин производится испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины, а также относительно друг друга.

Испытание изоляции относительно корпуса является обязательным для каждой выпускаемой заводом совершенно готовой машины и производится при неподвижном состоянии машины испытательным напряжением, указанным в табл. 5,4.

Если машина подвергается на заводе испытанию на нагревание, то испытание изоляции относительно корпуса делается тотчас же после этого испытания, т. е. при температуре, близкой к рабочей температуре машины; в противном случае испытание изоляции относительно корпуса производится на машине, находящейся в практически холодном состоянии. Исключения составляют машины постоянного тока на номинальное напряжение до 24 в включительно; у них испытание изоляции относительно корпуса может предшествовать испытаниям на нагревание.

Испытанию изоляции относительно корпуса подвергается поочередно каждая электрически независимая цепь, при этом один полюс источника испытательного напряжения прикладывается к выводу испытываемой обмотки, а другой — к заземлен-

Таблица 5,1

Объект испытания	Мощность машины в <i>квт</i> или <i>кка</i>	Номинальное напряжение машины в <i>в</i>	Действующее значение испы- тательного на- пряжения в <i>в</i>	Длитель- ность ис- пытания в сек.
Статорные катушки, по- лукатушки и стержни после изготовления (до укладки в машину)	До 10 000	До 11 000	$2,75U + 4\,500$	60
То же	Св. 10 000	6 000 и выше	$2,75U + 6\,500$	60
Роторные стержни асин- хронных двигателей после изготовления (до укладки в машину):				
а) Нереверсивного дви- гателя	—	—	$2U_{\kappa} + 3\,000$	60
б) Реверсивного двига- теля	—	—	$4U_{\kappa} + 3\,000$	60
Роторные катушки воз- буждения синхронных яв- нополюсных машин:				
а) Двигатели	—	До 750	$10U_{\theta} + 1\,500$ min 3 000	60
б) Генераторы	—	До 750	$10U_{\theta} + 1\,500$ min 3 000 max 5 000	60
Гильзы пазовой изоля- ции ротора турбогенера- тора	—	До 250	$15U_{\theta} + 6\,000$	60
Секции (катушки) якор- ной обмотки после изго- товления (до укладки) . .	—	Свыше 24	$2,5U + 2\,500$	60
Катушки полюсов машин постоянного тока после намотки на каркас или по- люс	—	Свыше 24	$2,5U_{\theta} + 2\,400$	60

Обозначения, принятые в табл. 5,1, 5,2 и 5,3:

 U — номинальное напряжение машины. U_{κ} — напряжение на кольцах при разомкнутом и неподвижном роторе. U_{θ} — номинальное напряжение возбуждения.

Таблица 5,2

Объект испытания	Мощность машин в квт или ква	Номинальное напряжение в в	Действующее испытательное напряжение в в	Длительность испытания, в сек.
Статорные „всыпные“ обмотки после укладки катушек в пазы машины (до соединения)	До 1	До 550	$2U + 1\,000$	60
То же	От 1 до 3	До 550	$2U + 2\,000$	60
То же	Свыше 3	До 550	$2U + 2\,500$	60
Статорные формованные обмотки после укладки в пазы в машину (до соединения)	Свыше 3	До 11 000	$2,5U + 2\,500$	60
То же	Свыше 10 000	6 000 и выше	$2,5U + 4\,500$	60
Роторные стержни асинхронных двигателей после закладки в пазы (до соединения):				
а) Нереверсивные	—	—	$2U_{\kappa} + 2\,000$	60
б) Реверсивные	—	—	$4U_{\kappa} + 2\,000$	60
Роторные катушки синхронных явнополюсных машин переменного тока после установки на ротор (до соединения):				
а) Двигатели	—	До 750	$10U_{\phi} + 1\,000$ min 2 500	60
б) Генераторы	—	До 750	$10U_{\phi} + 1\,000$ min 2 000 max 4 000	60
Роторная обмотка после укладки в пазы (до прогрева и прессовки) . . .	—	До 250	$15U_{\phi} + 3\,400$	15
То же после прогрева и прессовки	—	До 250	$14U_{\phi} + 3\,100$	15
Якорная обмотка после укладки в пазы и соединения с коллектором	До 1	Свыше 24	$2U + 850$	15
То же	От 1 до 3	Свыше 24	$2U + 1\,750$	15
То же	Свыше 3	Свыше 24	$2,5U + 1\,900$	15
Якорная обмотка после укладки в пазы и соединения с коллектором	—	Ниже 24	750	60

Таблица 5,3

Объект испытания	Мощность машины в квт или ква	Номинальное напряжение в в	Действующее испытательное напряжение в в	Длительность испытания в сек.
Статорные „вспынные“ обмотки после соединения и запайки	до 1	До 550	$2U + 750$	60
То же	От 1 до 3	До 550	$2U + 1500$	60
То же	Свыше 3	До 550	$2U + 2000$	60
Статорные формованные обмотки после соединения и запайки	Свыше 3	До 11 000	$2,25U + 2000$	60
То же	Свыше 10 000	6 000 и выше	$2,25U + 4000$	60
Роторная обмотка асинхронных двигателей после соединения и запайки: . .				
а) Нереверсивные	—	—	$2U_k + 1500$	60
б) Реверсивные	—	—	$4U_k + 1500$	60
Катушки возбуждения явнополюсных машин переменного тока после соединения между собой и с контактными кольцами:				
а) Двигатели	—	До 750	$10U_g + 500$ min 2 000	60
б) Генераторы	—	До 750	$10U_g + 500$ min 1 500 max 4 000	60
Роторные обмотки турбогенераторов после заклинивания и соединения (до насадки капп)	—	До 250	$12U_g + 2200$	15
То же после насадки капп	—	До 250	$10U_g + 1750$	60
Якорные обмотки после пайки, бандажировки, пропитки и проточки коллектора	До 1	Свыше 24	$2U + 750$	60
То же	От 1 до 3	Свыше 24	$2U + 1500$	60
То же	Свыше 3	Свыше 24	$2,5U + 1500$	60
То же	—	Ниже 24	650	60
Катушки главных и дополнительных полюсов машин постоянного тока после укрепления на станине и соединения	Свыше 3	Свыше 24	$2,5U_g + 1500$	60
То же	—	Ниже 24	800	60

Таблица 5,4

№ по пор.	Машина или ее часть	Действующее значение испытательного напряжения в в
1	Машины мощностью меньшей 1 <i>квт</i> или 1 <i>ква</i> , а также все машины на номинальное напряжение, меньшее или равное 24 в	500 + двойное номинальное напряжение
2	Машины мощностью от 1 <i>квт</i> или 1 <i>ква</i> до 3 <i>квт</i> или 3 <i>ква</i> включительно при номинальном напряжении свыше 24 в	1 000 + двойное номинальное напряжение
3	а) Машины мощностью большей 3 <i>квт</i> или 3 <i>ква</i> при напряжении свыше 24 в	1 000 + двойное номинальное напряжение при минимуме в 1 500 в
	б) Машины мощностью от 10 000 <i>квт</i> или <i>ква</i> и выше на номинальное напряжение: До 3 000 в	1 000 + двойное номинальное напряжение
	Свыше 3 000 в до 6 000 в	2 1/2-кратное номинальное напряжение
	Свыше 6 000 в	3 000 + двойное номинальное напряжение
4	Обмотки возбуждения синхронных генераторов, у которых номинальное напряжение возбуждения не превышает 750 в	10-кратное номинальное напряжение возбуждения. Минимум 1 500, максимум 3 500
5	Обмотки возбуждения синхронных двигателей и одноякорных преобразователей:	
	1) Если машина предназначена для непосредственного пуска со стороны многофазного тока	
	а) Если машина предназначена для пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на сопротивление или на источник своего питания	10-кратное номинальное напряжение возбуждения Минимум 1 500
	б) Если машина предназначена для пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения, подразделенной на секции	1 000 + 10-кратное номинальное напряжение возбуждения Минимум 1 500
	в) Если машина предназначена для пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения, не секционированной	1 000 + 20-кратное номинальное напряжение возбуждения Минимум 1 500 Максимум 8 000
	2) Если машина предназначена для пуска иным способом, чем со стороны многофазного тока:	
	а) Синхронные двигатели, пускаемые пусковыми двигателями	10-кратное номинальное напряжение возбуждения Минимум 1 500
	б) Одноякорные преобразователи, пускаемые пусковыми двигателями или со стороны постоянного тока	1 000 + двойное номинальное напряжение возбуждения Минимум 1 500

Продолжение табл. 5,4

№ по пор.	Машина или ее часть	Действующее значение испытательного напряжения
6	Возбудители для электрических машин всех типов	1 000 + двойное номинальное напряжение Минимум 1 500
7	Вторичные обмотки (ротор асинхронных двигателей), не находящиеся в непрерывном короткозамкнутом состоянии: а) Для двигателей неререверсивных б) Для двигателей реверсивных с применением торможения противотоком	1 000 + 2-кратное номинальное напряжение роторной обмотки 1 000 + 4-кратное номинальное напряжение роторной обмотки
8	Собранные в группы машины или аппараты	Если испытанию подвергается группа, собранная из нескольких новых, только что установленных и соединенных вместе аппаратов, из которых каждый проходил через соответствующее испытание электрической прочности, то испытательное напряжение не должно превышать 85% испытательного напряжения того аппарата, у которого это напряжение ниже всего
9	Крановые двигатели постоянного тока	1 000 + тройное номинальное напряжение

ному корпусу машины, с которым на время испытания данной обмотки электрически соединяются все прочие не участвующие в испытании обмотки. Соединенные между собой многофазные обмотки считают за одну цепь, если начало и конец каждой фазы не выведены к специальным зажимам. При наличии выводов от начала и конца каждой фазы испытание от корпуса делается поочередно для каждой фазы при присоединенных к корпусу прочих фаз. Если одна из обмоток машины при номинальном режиме связана с корпусом машины, то на время испытания электрической прочности изоляции такой обмотки она должна быть отсоединена от корпуса машины.

Испытание начинается с напряжения, не превышающего одной трети испытательного напряжения (табл. 5,4). Подъем напряжения до полного значения испытательного напряжения производится постепенно или ступенями, не превышающими 5% полного значения; при этом время, допускаемое для подъема испытательного напряжения от половинного до пол-

ного значения, должно быть не менее 10 сек. Полное испытательное напряжение выдерживается затем в течение 1 мин., после чего снижается до одной трети своего значения и отключается.

При этом испытании не должно происходить пробоя изоляции, а также перекрытия по поверхности изоляции. Наличие местной короны допускается. До и после испытаний следует произвести измерение сопротивления изоляции обмотки меггером.

Испытательное напряжение при испытании электрической прочности изоляции обмотки относительно корпуса и относительно других обмоток должно быть переменным, частоты около 50 гц и практически синусоидальным.

Если машина подвергалась испытанию изоляции относительно корпуса на заводе в соответствии с ГОСТ 183-41, но доставлялась на место установки в разобранном виде, а также если возникают опасения, что при перевозке и хранении машины могли произойти повреждения обмоток, то собранная и высушенная на месте установки машина может быть подвергнута поверочному испытанию на электрическую прочность изоляции относительно корпуса. При этом к машине прикладывается в течение 1 мин. напряжение, равное 75% испытательного напряжения, указанного в табл. 5,4.

Испытание электрической прочности машин после ремонта, при котором была произведена замена всей изоляции обмотки, производится так же, как и вновь изготовленных машин. После ремонта обмотки машины, бывшей некоторое время в эксплуатации, отремонтированную машину следует подвергнуть испытанию напряжением, равным 1,3 номинального напряжения машины и не меньше 0,5 испытательного напряжения, указанного в табл. 5,4.

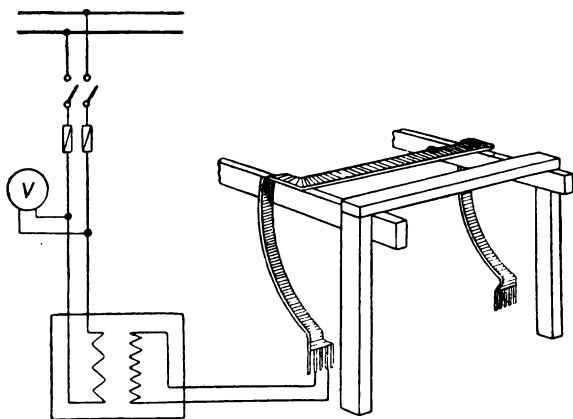
5.6. Испытание электрической прочности витковой изоляции

Для того, чтобы исключить возможность попадания в машину катушек с ослабленной витковой изоляцией, необходимо, помимо проверки электрической прочности изоляции отдельных катушек относительно корпуса, производить также предварительный контроль электрической прочности витковой изоляции каждой катушки до ее укладки в машину, а также непосредственно после укладки.

Испытание витковой изоляции катушек до укладки в машину. В разрезных катушках испытание электрической прочности изоляции между соседними витками не встречает затруднений и может быть легко выполнено обычными способами.

При этом испытываемое напряжение прикладывается к рядом расположенным виткам и выдерживается 10—15 сек. В катуш-

ках, витки которых составлены из отдельных параллельно расположенных проводников, изоляция между соседними проводниками до их запайки проверяется через лампочку от сети 220 в. В обмотках, исполненных в виде полукатушек, а также у якорных волновых катушек междувитковая изоляция испытывается путем приключения рядом лежащих проводников к испытательному трансформатору (фиг. 5,1). Испытание неразрезных катушек обычными способами практически невозможно, и в этом случае требуется применение специальных методов. Возможны два основных метода, обеспечивающих получение повышенного напряжения между витками: 1) метод непосред-



Фиг. 5,1.

ственного приложения напряжения к испытуемой катушке; 2) индуктивный метод, при котором необходимая разность потенциалов между витками создается переменным магнитным потоком, пронизывающим испытуемую катушку.

При первом методе падение напряжения в испытуемой катушке, присоединенной к источнику переменного тока, будет составлять

$$U_{\kappa} = i \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \text{ [в]}, \quad (5,1)$$

где i — ток в испытуемой катушке;
 ω — круговая частота переменного тока;
 L — эффективная индуктивность испытуемой катушки;
 r — омическое сопротивление испытуемой катушки.

Если пренебречь омическим сопротивлением, которое обычно мало по сравнению с индуктивным, то падение напряжения на испытуемой катушке

$$U_{\kappa} \approx i \omega L \text{ [в]}. \quad (5,2)$$

Так как величина тока, протекающего через испытываемую катушку, ограничивается допустимым нагревом, то получение достаточно высокого испытательного напряжения на катушке может быть достигнуто увеличением индуктивного сопротивления ωL .

Увеличение эффективной индуктивности испытываемой катушки может быть осуществлено путем помещения испытываемой катушки на стальной шихтованный сердечник. Однако нетрудно показать, что и в этом случае практически невозможно добиться получения сколько-нибудь значительного падения напряжения на испытываемой катушке при обычной частоте приложенного напряжения (50 гц). Увеличение частоты напряжения, прикладываемого к катушке, до 500—1 000 гц позволяет при применении стального сердечника получать величину падения напряжения 5—10 в на виток.

При столь низких значениях напряжения между отдельными витками при испытании нельзя выявить те дефектные места в витковой изоляции катушек, где еще нет полного замыкания между витками, но где изоляция имеет пониженную электрическую прочность. Учитывая величину перенапряжений, которые могут возникать между витками катушек в электрических машинах в рабочих условиях, необходимо испытывать их напряжением в несколько сот и даже тысяч вольт (катушки высоковольтных обмоток).

Создание между соседними витками неразрезных катушек испытательных напряжений 500—1 000 в и выше может быть осуществлено только при использовании высокочастотных колебаний или же импульсов напряжения.

При использовании индуктивного метода напряжение, индуктируемое в испытываемой катушке, как во вторичной обмотке трансформатора равно:

$$U''_{\kappa} = 4kf\Phi\omega \cdot 10^{-8} [\text{в}], \quad (5,3)$$

где k — коэффициент формы кривой;

Φ — амплитудное значение магнитного потока, пронизывающего испытываемую катушку;

f — частота пульсации магнитного потока;

ω — число витков в испытываемой катушке.

Существенное повышение величины напряжения на испытываемой катушке и в этом случае может быть практически достигнуто только за счет повышения частоты.

Для обеспечения испытательных напряжений между витками 500—1 000 в и выше необходимо применение высокочастотных колебаний с частотой 10^4 — 10^5 гц.

В заводской практике при испытании витковой изоляции неразрезных катушек находит применение как метод непосредственного приключения катушки к источнику высокочастотных колебаний, так и индуктивный метод.

К установкам, применяемым для испытаний междувитковой изоляции неразрезных катушек, предъявляются следующие основные требования:

1. Напряжение между витками при испытании неразрезных катушек должно достигать 500—1 500 в и выше.

2. Распределение напряжения между отдельными витками испытываемой катушки должно быть по возможности равномерным.

3. При приложении к катушке испытательного напряжения в междувитковой изоляции не должно возникать чрезмерно больших диэлектрических потерь.

4. Метод должен давать возможность просто и легко определить как момент, так и место пробоя междувитковой изоляции при испытании катушки.

5. Метод должен быть прост в работе, и его осуществление не должно требовать сложного и дорогостоящего оборудования.

Первое требование осуществляется применением при испытании витковой изоляции высокочастотных колебаний или импульсов напряжения.

Требование к равномерности распределения напряжения между витками катушек, имеющих небольшое число витков (статорные катушки), без особого труда выполняется при применении частот 10^4 — 10^5 гц.

Третье требование исключает возможность применения для испытания витковой изоляции незатухающих высокочастотных колебаний и требует использования сильно затухающих высокочастотных колебаний или же импульсов напряжения.

Четвертое требование заставляет применять достаточные мощности испытательных установок, а также надежные индикаторы, фиксирующие момент пробоя витковой изоляции при испытании катушек.

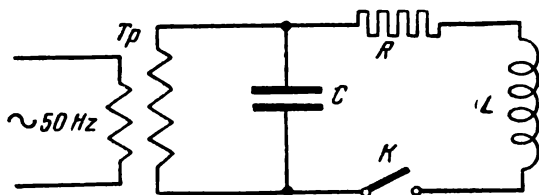
Ниже приводится описание основных методов, которые нашли достаточно широкое практическое применение при контроле междувитковой изоляции катушек в заводских условиях и которые в основном удовлетворяют поставленным выше требованиям.

Метод 1. При этом методе в контуре, состоящем из испытываемой катушки и конденсатора, создаются затухающие высокочастотные колебания (фиг. 5,2).

Если зарядить конденсатор C до напряжения U_c и затем разрядить его на испытываемую секцию L , замкнув ключ K ,

то при $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ в контуре L, R, C возникнут периодические затухания колебания с частотой

$$f \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} [24]. \quad (5,5)$$



Фиг. 5,2.

При этом коэффициент затухания

$$\delta \approx \frac{R}{2L}. \quad (5,6)$$

Напряжение на испытуемой катушке

$$U_k \approx U_C e^{-\delta t} \sin\left(2\pi f t - \arctg \frac{2\pi f}{\delta}\right). \quad (5,7)$$

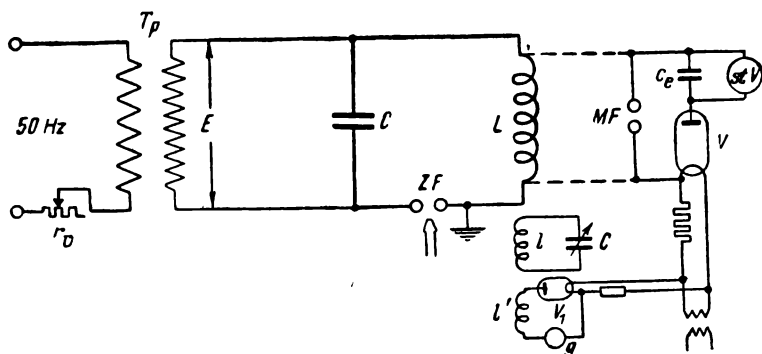
В действительности изменение напряжения на испытуемой катушке будет значительно сложнее из-за появления дополнительных паразитных колебаний, вызванных внутренней емкостью катушки.

Учитывая трудность измерения высокочастотного напряжения, возникающего в контуре самой катушки, а также неравномерности его распределения, обычно принимают меры для гашения этих паразитных колебаний. Одним из наиболее простых способов гашения высокочастотных паразитных колебаний, предложенным Г. Г. Швецом, является приключение параллельно испытуемой катушке чисто омического сопротивления. Это сопротивление увеличивает коэффициент затухания паразитных колебаний и мало сказывается на коэффициенте затухания основных колебаний.

В установках, применяемых для испытания электрической прочности междувитковой изоляции неразрезных катушек с помощью высокочастотных затухающих колебаний, разряд конденсатора на испытуемую катушку обычно производится через искровой промежуток. Возможно также применение

и тиратрона. На фиг. 5,3 приведена принципиальная схема испытательной установки, применяемой для испытаний витковой изоляции неразрезных катушек повышенным напряжением. Эта установка состоит из следующих основных элементов:

1) питающее устройство (регулятор напряжения r_v и повысительный трансформатор Tr мощностью около 10 кВа и напряжением до 15—20 кВ);



Фиг. 5,3.

2) колебательный контур, включающий в себя батарею конденсаторов C общей емкостью 0,1—0,5 мкФ, на рабочее напряжение до 15—20 кВ, испытуемую катушку L (индуктивность большинства статорных катушек электрических машин обычно лежит в пределах 10^{-3} — 10^{-5} гн) и последовательно включенный искровой разрядник ZF (шаровой с воздушным дутьем или вращающийся);

3) устройство для измерения напряжения на испытуемой секции (амплитудный вольтметр, состоящий из кенотрона V , конденсатора C_e и статического вольтметра stV , или шаровые разрядники MF , освещаемые электрической дугой);

4) устройство для фиксации пробоя междувитковой изоляции, представляющее собой упрощенный резонансный волномер и состоящее из промежуточного контура LC и измерительного контура, включающего кенотрон V , катушку L' и гальванометр G .

Описанная схема позволяет получать на неразрезных статорных катушках напряжения между витками до 1500—2000 в при частотах 10^5 — $5 \cdot 10^5$ гц.

К достоинствам описанного метода следует отнести:

1. Распределение напряжения между витками испытуемых катушек, при небольшом числе витков (что имеет место у большинства статорных катушек) достаточно равномерное, особенно при приключении параллельно к испытуемой катушке омического сопротивления (100—200 ом).

2. Величина диэлектрических потерь в междувитковой изоляции относительно невелика и при длительности испытания 10—15 сек. не может повредить изоляции испытуемой катушки.

3. При достаточной мощности питающих элементов обмотки и соответствующем напряжении на конденсаторе возможно получение на испытуемых катушках напряжений до 10—15 кВ и выше (при частотах $1 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^5$ гц).

4. Установки, выполненные по описанному выше методу, не сложны и достаточно надежны в работе.

Однако в этих установках имеются контуры, гребущие перед началом работы настройки в резонанс друг с другом, что усложняет работу при массовых испытаниях катушек различных типов. Кроме того, при плохой экранировке индикатор и его работа недостаточно надежны.

Общий вид установки, выполненной по описанному методу, виден на фиг. 5,4.



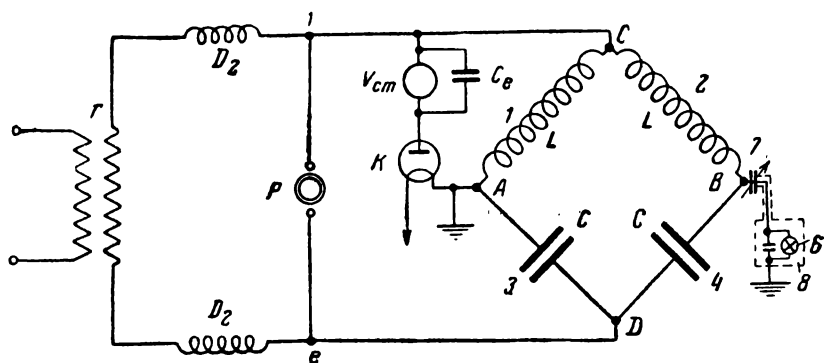
Фиг. 5,4.

Метод 2. Несколько отличную схему имеет установка, предназначенная для испытания электрической прочности междувитковой изоляции отдельных катушек электрических машин, предложенная впервые в СССР проф. О. Б. Броном. Эта установка была осуществлена на ХЭМЗ и в течение ряда лет успешно применялась для массового контроля междувитковой изоляции катушек до их укладки в машину. Принципиальная схема такой установки приведена на фиг. 5,5.

Питающее напряжение подводится от регулируемого высоковольтного трансформатора T мощностью 30 кВА и напряжением на высокой стороне до 15 кВ. Напряжение на трансформаторе повышается до тех пор, пока не будет происходить систематического пробоя искрового промежутка вращающегося синхронного разрядника P . В моменты пробоя разрядника в контуре возникнут высокочастотные быстрозатухающие колебания (фиг. 5,6).

Наличие высокочастотных затухающих колебаний в контуре обеспечивает получение необходимого напряжения на испытуемой катушке.

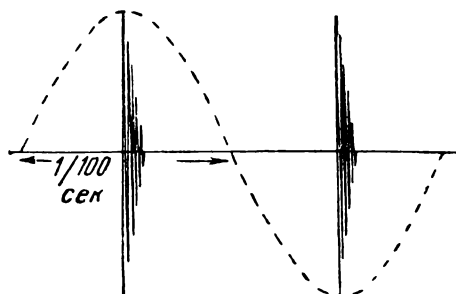
Две одинаковые испытуемые катушки (1 и 2) и два одинаковых конденсатора (3 и 4) образуют мост.



Фиг. 5,5.

Если испытуемые катушки будут иметь одинаковые геометрические размеры и равные числа витков ($L_1 = L_2$), то при $C_1 = C_2$ разность потенциалов между точками A и B будет практически близка к нулю.

При пробое витковой изоляции в одной из катушек равновесие моста нарушается, и между точками A и B возникает разность потенциалов, достигающая нескольких сот вольт.



Фиг. 5,6.

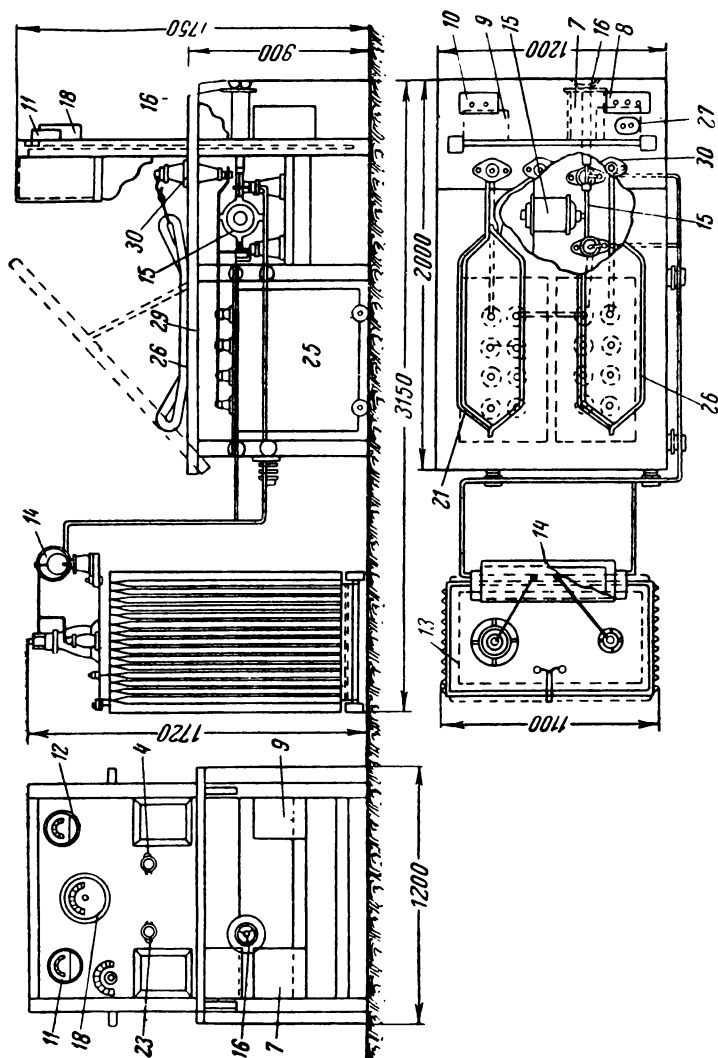
Это легко может быть обнаружено с помощью неоновой лампы 6, включенной через емкостной делитель 7, тщательно заэкранированный 8. Измерение напряжения на испытуемой катушке производится с помощью амплитудного вольтметра (K , $U_{ст}$ и C_v).

Чувствительность описанного метода очень велика (до 0,5%), так как при пробое междувитковой изоляции в одной из катушек между точками A и B возникает разность потенциалов, вызванная интерференцией колебаний разных частот.

Приведенная схема не требует применения волномеров, настраиваемых в резонанс, что является ее преимуществом. Полная схема заводской установки приведена на фиг. 5,7.

Расположение аппаратуры на установке этого типа показано на фиг. 5,8.

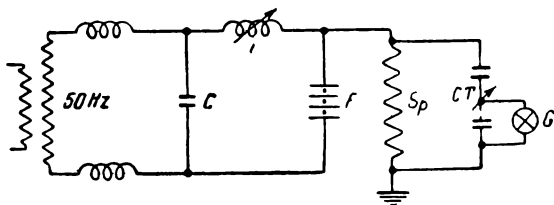
Испытание катушек на этой установке ведется при частоте около 10^5 гц. Длительность испытания составляет около 15—20 сек. К преимуществам данной установки следует отнести: отсутствие волномера и высокую чувствительность.



фиг. 5, 8.

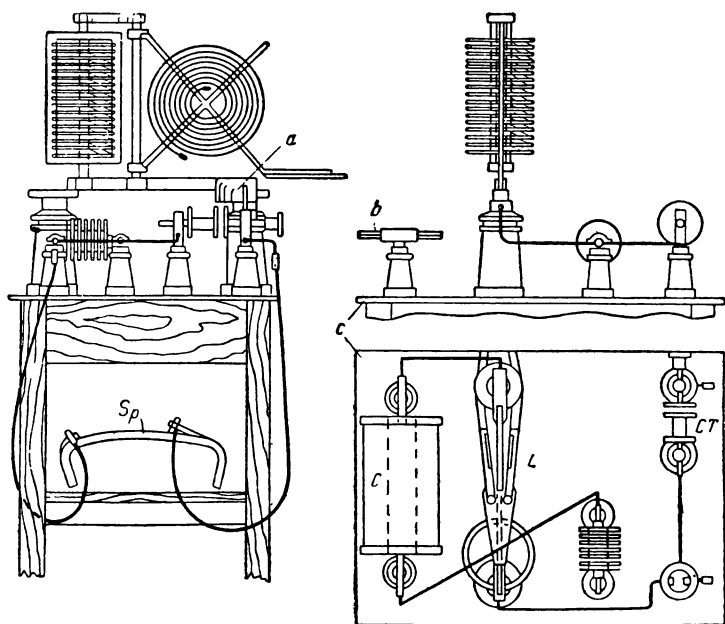
Цифровые указатели на фиг. 5,8 соответствуют фиг. 5,7. Схема предусматривает кнопочные управления 7 и 8 двигателем 6, потенциалрегулятором 5 и двигателем вращающегося разрядника 15. Назначение остальных элементов схемы ясно из чертежа.

Метод 3. При испытании междувитковой изоляции отдельных катушек электродвигателей средней мощности иногда применяется установка, принципиальная схема которой приве-



Фиг. 5,9.

дена на фиг. 5,9. В этой установке имеются два гальванически связанных контура. Один из них, связанный с питающим трансформатором, состоит из конденсатора C , переменной самоиндукции L и искрового разрядника F . Другой гальванически с ним связанный контур, включает в себя испытуемую катушку S_p и конденсаторы емкостного делителя CT . При разряде емкости C через разрядник F в контуре L, C, F возникают быстрозатухающие высокочастотные колебания.



Фиг. 5,10.

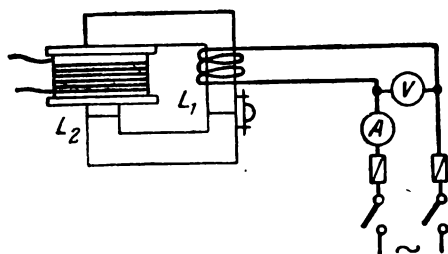
Изменяя самоиндукцию катушки L , можно добиться резонанса между контурами L, C, F и S_p, C, T . При этом на испытуемой катушке S_p будет иметь место максимальное напряжение.

Регулируя емкость делителя напряжения $СТ$, добиваются такого напряжения, при котором неоновая лампа вспыхивает. Зная напряжение, при котором загорается неоновая лампа, а также соотношение емкостей в емкостном делителе, можно легко определить напряжение на испытываемой катушке S_p .

При пробое витковой изоляции в испытываемой катушке резонанс в системе расстраивается и неоновая лампочка гаснет. Общий вид описанной установки показан на фиг. 5,10.

Испытание междувитковой изоляции катушек на описанной выше установке производится при частоте около 10^6 гц.

К достоинствам этого метода следует отнести высокую чувствительность и сравнительную простоту установки.



Фиг. 5,11.

Метод 4. Этот метод базируется на использовании индуктивного принципа и машинного генератора повышенной частоты (500—1 000 гц).

При испытании витковой изоляции катушек, у которых напряжение между витками мало (например, катушки возбуждения синхронных машин,

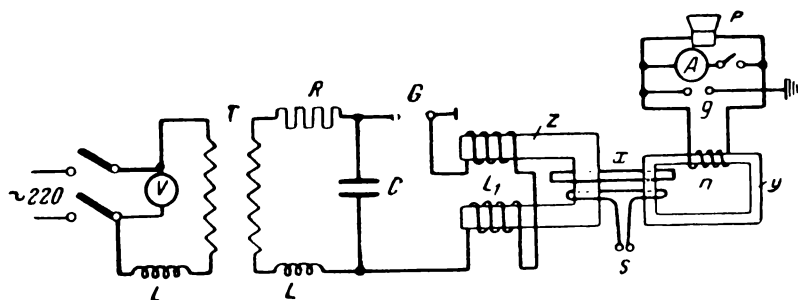
изготовленные из шинной меди), обычно применяются установки, принципиальная схема которых показана на фиг. 5,11.

Первичная катушка L_1 питается от специального высокочастотного агрегата, обеспечивающего получение переменного тока частотой 500—1 000 гц. Испытуемая катушка L_2 помещена на разборный стальной сердечник, в котором возбуждается пульсирующий магнитный поток обмоткой L_1 . При этом методе возможно получение напряжения между витками 10—15 в. При наличии в испытываемой катушке значительных дефектов в витковой изоляции, приводящих к появлению короткозамкнутых витков, будет происходить их сильный нагрев из-за больших токов, протекающих в короткозамкнутом контуре, а также сильное гудение стального сердечника. Кроме того, при наличии короткозамкнутых витков в испытываемой катушке резко возрастает ток в первичной цепи, контролируемый амперметром. Описанный выше метод позволяет легко и просто устанавливать наличие короткозамкнутых витков у испытываемых катушек.

Если при испытании катушек требуется не только установить отсутствие короткозамкнутых витков, но и проверить электрическую прочность междувитковой изоляции, то необходимо применять индуктивный метод с использованием высокочастотных затухающих колебаний частотой 10^1 — 10^5 гц.

Метод 5. Описанный ниже метод основан на возбуждении в испытуемой катушке повышенных напряжений за счет индукции при высоких частотах (10^4 — 10^5 гц).

Принципиальная схема установки, работающей по этому принципу, приведена на фиг. 5,12. Эта установка состоит в основном из питающей части (повысительный трансформатор T), колебательного контура (конденсатор C — искровой разрядник G — катушка L_1 , насаженная на сердечник Z), испытуемой катушки x и устройства, служащего для регистрации наличия короткозамкнутых витков в испытуемой катушке (вспомогательный сердечник y , связанный с испытуемой катушкой, и вспомогательная катушка n — индикатор).



Фиг. 5,12.

При разряде конденсатора через разрядник в контуре возникают высокочастотные затухающие колебания.

Возбуждаемый катушкой L_1 магнитный поток будет индуцировать в испытуемой катушке высокочастотное затухающее напряжение

$$U_{L_2} \approx U_{L_1} \frac{n_{L_2}}{n_{L_1}}, \quad (5,14)$$

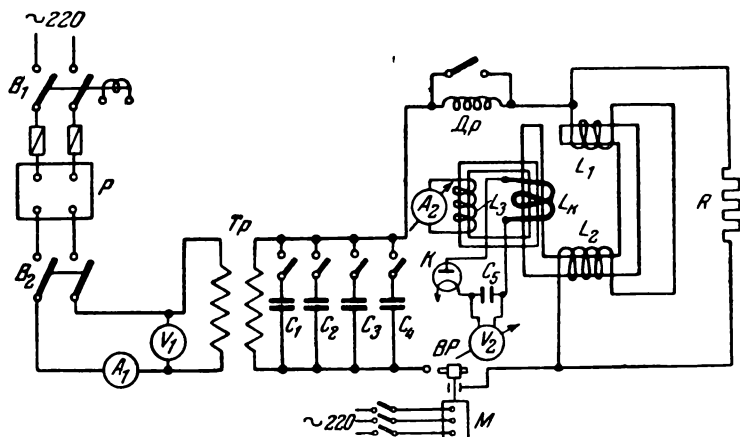
где U_{L_1} — напряжение на первичной катушке, приключенной к колебательному контуру;

n_{L_2} — число витков на испытуемой катушке;

n_{L_1} — число витков на первичной катушке трансформатора.

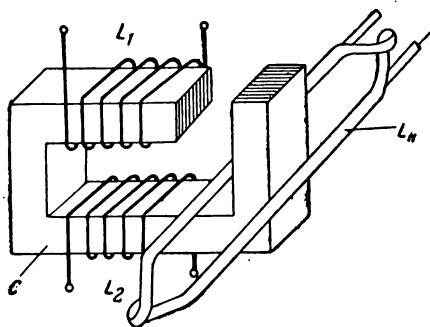
При отсутствии у испытуемой катушки короткозамкнутых витков ток в ней при испытании практически не будет проходить. Если же в испытуемой катушке имеются короткозамкнутые витки или же они возникнут из-за пробоя витковой изоляции при испытании повышенным напряжением, то в короткозамкнутом витке потечет ток, который возбудит соответствующий магнитный поток в вспомогательном сердечнике (y). Этот магнитный поток будет индуцировать переменное напряжение

в катушке n , насаженной на этот сердечник. Так как катушка n соединена с тепловым амперметром или громкоговорителем, то при появлении напряжения на катушке n через амперметр A или катушку громкоговорителя P пройдет ток, который будет обнаружен визуально или на-слух.



Фиг. 5,13.

Приводим описание промышленной установки этого типа, которая в течение ряда лет успешно применяется в СССР для заводских испытаний витковой изоляции неразрезных статорных катушек высоковольтных машин.



Фиг. 5,14.

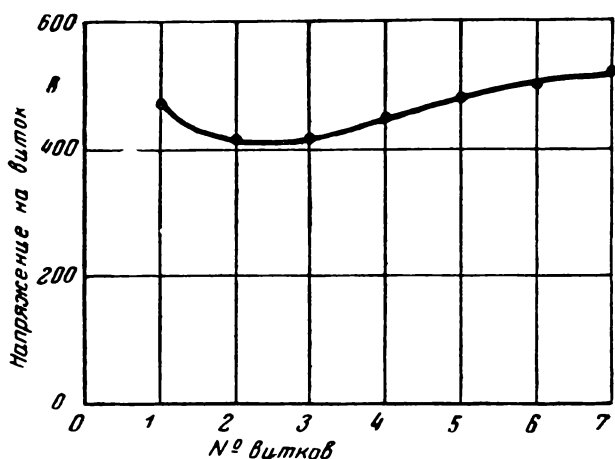
На фиг. 5,13 приведена общая схема установки.

Первичная обмотка изготовлена из меди и состоит из двух катушек L_1 и L_2 , имеющих по четыре витка, которые могут соединяться последовательно и параллельно.

Испытуемая статорная катушка L_k при испытании помещается в вырез (паз), который имеется в стальном сердечнике (фиг. 5,14). Применение фигурного разомкнутого сердечника с пазом позволяет значительно ускорить испытание катушек, так как не требуется разборки ярма. Вспомогательный стальной сердечник расположен рядом с основным сердечником и, при испытании катушки одна сторона ярма разнимается и испытуемая катушка располагается таким

образом, чтобы она находилась одной стороной в вырезе основного сердечника и, кроме того, охватывалась вспомогательным сердечником

Катушка L_3 , насаженная на нижнюю сторону ярма вспомогательного сердечника, замкнута на тепловой амперметр или лампочку накаливания, которые служат индикатором, определяющим момент пробоя витковой изоляции испытуемой катушки. При емкости конденсаторов в колебательном контуре $C = 0,5 \text{ мкф}$ в зависимости от способа соединения катушек первичной обмотки трансформатора, а также размеров испытуемой катушки и числа витков в ней, частота затухающих колебаний в основном контуре колеблется от 10 000 до 30 000 гц.



Фиг. 5,15.

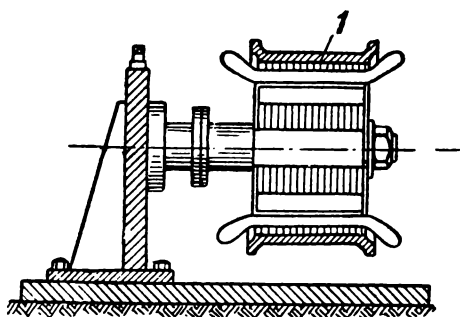
Колебания в испытуемой катушке, являясь вынужденными, близки по форме к колебаниям первичного контура. Собственные высокочастотные колебания испытуемой катушки практически не сказываются на основных колебаниях благодаря наличию стального сердечника, который способствует гашению паразитных колебаний, имеющих очень высокую частоту.

Включение дросселя D_r последовательно с катушками первичной обмотки трансформатора благоприятно сказывается на распределении напряжения между витками испытуемой катушки. Поэтому его следует включать при испытании многovitковых катушек. На фиг. 5,15 приведена кривая, характеризующая распределение напряжения у семивитковой статорной катушки с непрерывной микалентной изоляцией при ее испытании на вышеописанной установке при частоте затухающих колебаний около 15 000 гц. Таким образом, наличие стального сердечника в испытательной установке позволяет получить

вполне удовлетворительное распределение напряжения вдоль испытуемой катушки.

К преимуществу испытательной установки с магнитным сердечником относится также простой и надежный способ регистрации пробоев витковой изоляции.

Усложняющим элементом в описанной установке является наличие основного и вспомогательного стальных сердечников.



Фиг. 5, 16.

Установка со стальным сердечником особенно пригодна для заводских испытаний многовитковых катушек.

Для испытания витковой изоляции катушек после их укладки в машину в настоящее время также применяются разнообразные методы, некоторые из которых будут описаны ниже.

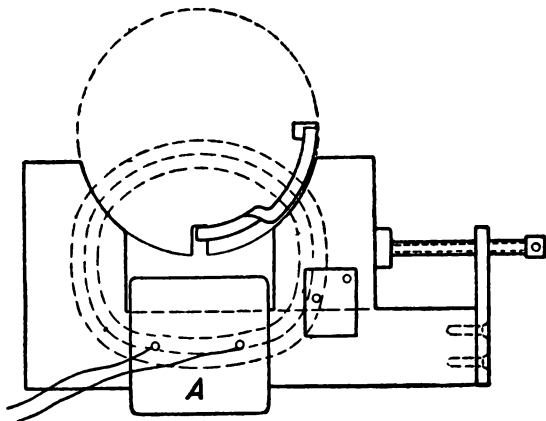
Одни методы основаны на приключении испытуемой обмотки к источнику повышенной частоты или импульсов, другие — на индуктировании в ней напряжения от дополнительной магнитно-связанной обмотки, включенной на повышенную или высокую частоту.

Установки для непосредственного включения испытуемой обмотки на повышенную частоту (500—1 000 гц) обычно применяются для испытания небольших обмоток, так как иначе требуется большая мощность питающего агрегата. При этом способе испытуемая обмотка приключается к генератору повышенной частоты через амперметр. Увеличение тока по сравнению с нормальным указывает на наличие короткозамкнутых витков в испытуемой обмотке. При применении этого метода для испытания витковой изоляции статорных обмоток машин переменного тока чаще всего пользуются следующим методом. Статор 1 (фиг. 5,16) одевается на стальной шихтованный цилиндр, диаметр которого равен диаметру ротора. Этот цилиндр служит магнитопроводом для силовых линий магнитного потока, создаваемого обмоткой статора при испытании.

Вместо специального цилиндра иногда пользуются ротором, который вставляется в статор без подшипниковых щитов.

Обмотка статора приключается к генератору повышенной частоты (500—1 000 гц) через амперметр с переключателем. При отсутствии в испытуемой обмотке короткозамкнутых витков и правильном соединении катушек сила тока во всех фазах будет одинаковая. Наличие виткового замыкания обнаруживается по сильному гудению и нагреву обмотки.

При испытании междувитковой изоляции обмотанных якорей обычно применяется индуктивный метод. Переменное магнитное поле создается двухполюсным электромагнитом (фиг. 5,17). Для того, чтобы электромагнит можно было применить для испытания якорей машин разных габаритов, полюсы обычно делаются раздвижными. Питание обмотки электромагнита производится переменным током частотой 500—1 000 гц



Фиг. 5,17.

от специального двигателя-генератора. Испытуемый якорь помещается на подставке таким образом, чтобы полосы электромагнита охватывали обмотку по шагу и чтобы зазор между ними и сталью якоря был не более 5—7 мм. Магнитные силовые линии, возбуждаемые катушкой сердечника, индуктируют в обмотке якоря переменную электродвижущую силу с частотой 500—1 000 гц. При наличии в якорной обмотке короткозамкнутых витков или при замыканиях между коллекторными пластинами в витках, замкнутых накоротко, потечет ток большой силы, который нагреет дефектную катушку.

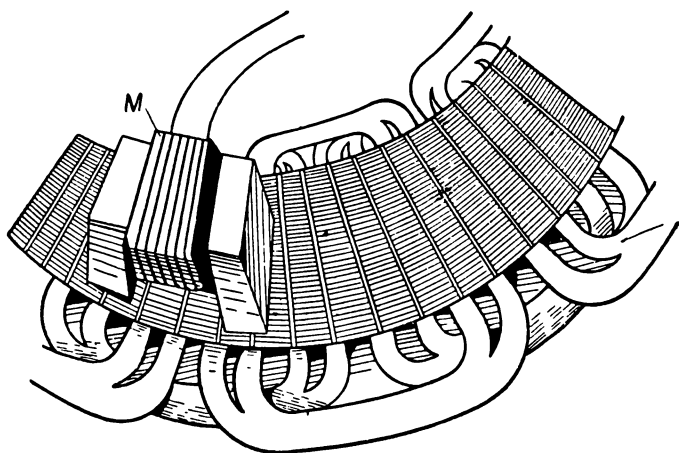
Место витковых соединений может быть легко обнаружено при помощи телефона или стальной пластинки.

Проверка витковой изоляции роторов может быть произведена следующим образом. Испытуемый ротор вставляется в контрольный статор, включенный на повышенную частоту, и медленно проворачивается. Наличие короткозамкнутых витков устанавливается по увеличению питающего тока, усиленному гудению и нагреву дефектной части обмотки ротора.

Аналогичным образом может быть произведена проверка витковой изоляции статоров. В этом случае в испытуемый статор вставляется контрольный ротор, включенный на повышенную частоту.

Указанные устройства можно питать напряжением нормальной частоты (50 гц), но при этом требуются большие мощности питающих установок. При этом наличие больших токов может привести к перегреву испытуемой обмотки.

Наличие короткозамкнутых витков в статорных обмотках крупных машин переменного тока может быть обнаружено при помощи электромагнита, показанного на фиг. 5,18. Обмотка электромагнита *М* питается током повышенной частоты. Если обмотка статора не имеет короткозамкнутых витков, то ток в обмотке электромагнита *М* невелик. При наличии короткозамкнутых витков в статорной обмотке сила тока резко увеличивается и короткозамкнутые витки нагреваются.



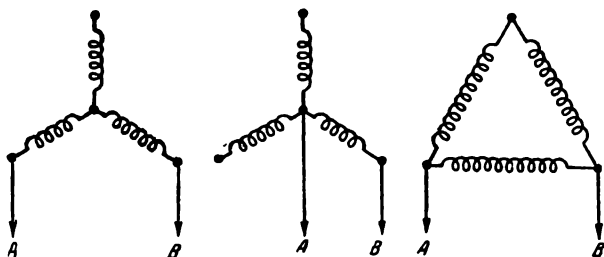
Фиг. 5,18.

Описанные выше методы испытаний междувитковой изоляции обмоток, уложенных в машину, основанные на использовании промышленной (50 гц) или повышенной частоты (500—1 000 гц), позволяют обнаружить только полностью замкнутые витки у обмоток, уложенных в машину. Если же в испытуемой машине имеются катушки с поврежденной витковой изоляцией, электрическая прочность которой мала, но не равна практически нулю, то при испытании таких обмоток описанными методами даже сильно поврежденные места не будут обнаружены, так как величина напряжения, приходящаяся на витковую изоляцию, недостаточна для ее пробоя в дефектных местах. Вместе с тем в условиях эксплуатации такая дефектная витковая изоляция будет пробита при возникновении в обмотках перенапряжений. Поэтому проверку электрической прочности витковой изоляции повышенным напряжением следует производить также и у обмоток после их укладки в машину.

Одним из возможных способов, обеспечивающих испытание витковой изоляции катушек, уложенных в машину, повышенным напряжением, является метод 1, применяемый при испытании витковой изоляции отдельных катушек до их укладки в машину (стр. 266).

При этом методе в испытуемой обмотке или части ее возбуждаются высокочастотные быстрозатухающие колебания ($5 \cdot 10^3$ — 10^5 гц), что обеспечивает получение необходимой величины испытательного напряжения (сотни и даже тысячи вольт на виток).

Применяемая при этом схема принципиально не отличается от приведенной фиг. 5,3, только вместо испытуемой катушки в колебательный контур включается обмотка, уложенная в



Фиг. 5, 19.

машину. На фиг. 5,19 показаны типичные случаи приключения к колебательному контуру установки статорных и роторных обмоток машин переменного тока.

Настраивающую катушку волномера в этом случае располагают вблизи ротора или статора иногда даже во внутренней расточке статора.

При испытании якорных обмоток высокочастотное напряжение подводится к двум точкам коллектора и якорь при испытании проворачивается. Длительность испытания междувитковой изоляции обмоток, уложенных в машину, составляет около 10—15 сек. Частота затухающих колебаний обычно лежит в пределах $5 \cdot 10^3$ — 10^5 гц.

В последние годы для испытания междувитковой изоляции обмоток электрических машин после их укладки в машину широко применяются импульсные методы, описание которых приводится ниже.

Импульсный метод. Если производить разряд конденсатора C (фиг. 5,20), имеющего напряжение U_c на соединенные последовательно катушки с индуктивностями L_1 и L_2 и шунтированные омическим сопротивлением $R+R$, то полное напряжение, действующее в цепи при разряде,

$$u = U_c \frac{e^{-at}}{\sin \varphi} \cdot \sin(bt - \varphi), \quad (5,15)$$

где

$$a = \frac{1}{4RC}; \quad (5,16)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{C(L_1 + L_2)} - \frac{1}{16R^2C^2}}; \quad (5,17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}. \quad (5,18)$$

Это напряжение распределится между катушками L_1 и L_2 пропорционально их индуктивности.

Напряжение на катушке L_1 будет равно

$$u_{L_1} = U_C \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cdot \frac{e^{-at}}{\sin \varphi} \sin(bt - \varphi), \quad (5,19)$$

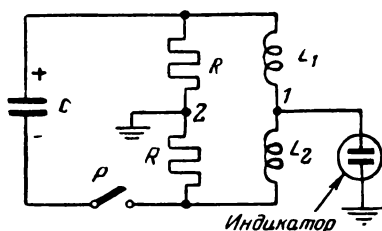
а на катушке L_2

$$u_{L_2} = U_C \frac{L_2}{L_1 + L_2} \cdot \frac{e^{-at}}{\sin \varphi} \sin(bt - \varphi). \quad (5,20)$$

Разность потенциалов между точками 1 и 2 схемы фиг. 5,20

$$u_{1,2} = \frac{U_C}{\alpha} \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} \cdot \frac{e^{-at}}{\sin \varphi} \cdot \sin(bt - \varphi) \quad (5,21)$$

при $L_1 = L_2$; $u_{L_1} = u_{L_2}$ и $u_{1,2} = 0$. При разных значениях L_1 и L_2 разность потенциалов между точками 1 и 2 может иметь положительное или отрицательное значение.

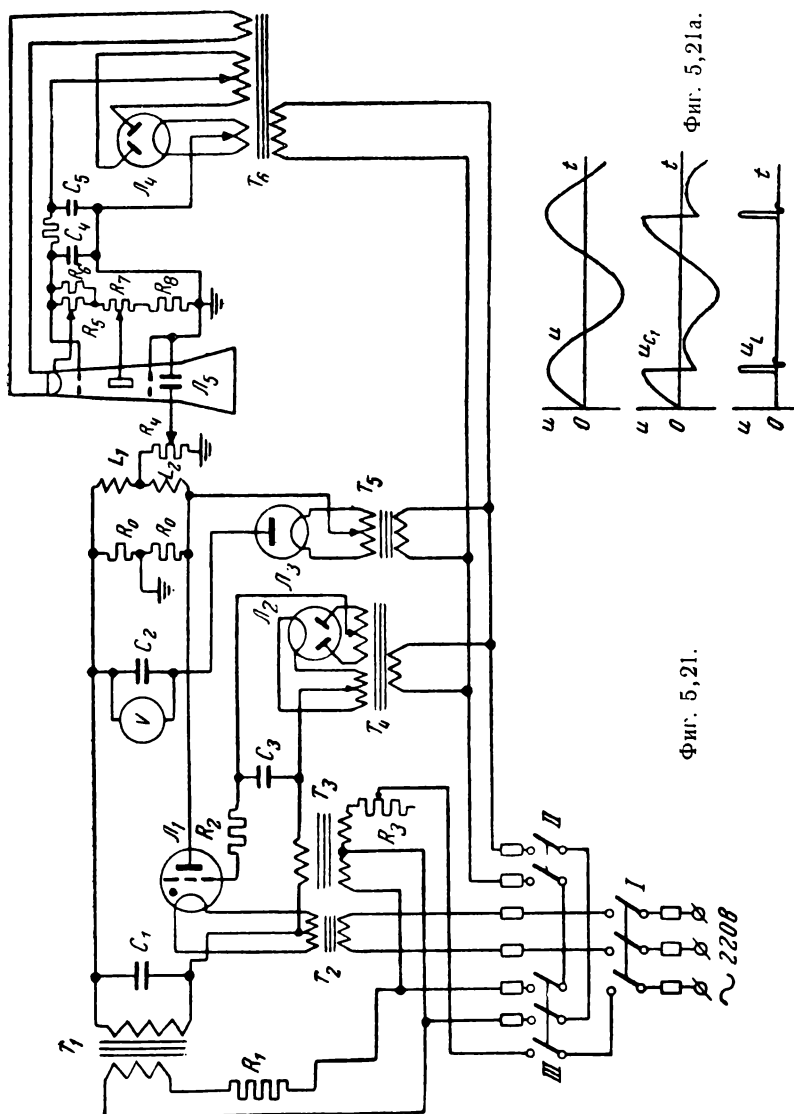


Фиг. 5,20.

Описанный выше принцип был предложен инж. С. П. Грецким для испытания междувитковой изоляции статорных катушек, уложенных в машину. Если разряд конденсатора C производить периодически (с помощью какого-нибудь разрядника) на две катушки, уложенные в статор и после-

довательно соединенные друг с другом, параллельно к которому присоединено чисто омическое сопротивление $2R$, то с помощью индикатора напряжения, включенного между витками 1 и 2, можно легко установить наличие или же отсутствие короткозамкнутых витков.

При $L_1 = L_2$ индикатор дает практически нулевое показание. Если же в одной из катушек будет иметься виток с дефектной изоляцией, то $L_1 \neq L_2$ и индикатор отметит явно выраженную полярность. В качестве индикатора может быть применен катодный осциллограф или же «магический глаз» (электронная лампа типа 6Е5).



Периодический разряд конденсатора обычно производится тиратроном, хотя возможно применение разрядника другого типа, например искрового.

На фиг. 5,21 приведена схема установки, обеспечивающая испытание междувитковой изоляции уложенных в машине обмоток напряжением около 100 в на виток.

Схема работает следующим образом. Конденсатор C_1 заряжается непосредственно от вторичной обмотки transforma-

тора T_1 . Тиратрон J_1 заперт отрицательным потенциалом сетки, задаваемым кенотроном J_2 . В полупериод питающего тока, когда анод тиратрона находится под положительным потенциалом и на его сетку подается положительный импульс от пикового трансформатора T_3 , происходит разряд конденсатора C_1 на последовательно соединенные испытуемые катушки L_1 и L_2 , шунтированные сопротивлением $2R_0$.

Разряд конденсатора имеет характер затухающих колебаний с частотой

$$f \approx \frac{1}{2\pi V(L_1 + L_2)C} [гц]. \quad (5,22)$$

В момент перехода питающего тока через нуль дуга в тиратроне J_1 рвется и тиратрон запирается. В течение следующего полупериода тиратрон не зажигается, так как его анод находится под отрицательным потенциалом. Таким образом, тиратрон разряжает конденсатор 50 раз в секунду.

Напряжение напряжений во времени на емкости U_{C_1} в испытуемых катушках U_L , представлены на фиг. 5,21.

Генерируемое в испытуемых катушках измеряется амплитудным вольтметром (кенотрон J_3 , трансформатор накала T_5 , конденсатор C_2 и статический вольтметр V). Напряжение, возникающее в нейтрали катушек L_1 и L_2 при появлении короткозамкнутых витков, отмечается на экране катодного осциллографа J_5 в виде вертикальной линии, направленной от нулевой линии вверх или вниз в зависимости от положения катушки с дефектной изоляцией.

Максимальная величина напряжения, которая может быть получена на испытуемой катушке, ограничена параметрами кенотрона. При применении тиратрона ТГ-162 возможно получение напряжения между витками

$$U_k = \frac{3500}{2n} [в], \quad (5,23)$$

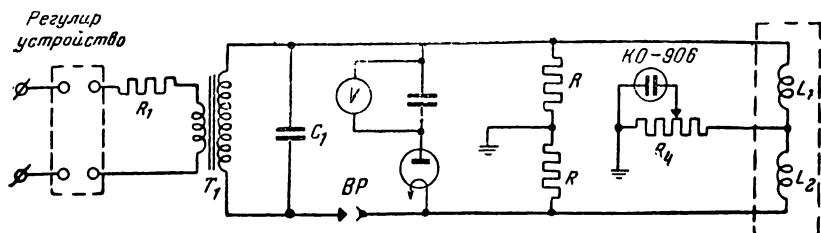
где n — число витков в катушке.

В тех случаях, когда необходимо испытание междувитковой изоляции катушек после их укладки в машину более высоким напряжением, вместо тиратрона следует применять синхронный вращающийся разрядник Bp (фиг. 5,22).

Описанный метод ввиду своей относительной простоты и высокой чувствительности может быть с успехом использован для заводских испытаний витковой изоляции катушек после их укладки в машину.

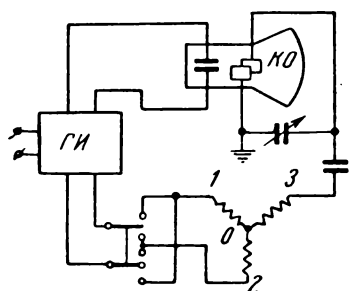
Следует отметить, что описанная установка позволяет обнаружить также наличие в статоре катушек с неодинаковым числом витков.

Испытание витковой изоляции осциллоскопом. В последнее время разработан новый метод испытания витковой изоляции обмоток электрических машин с помощью

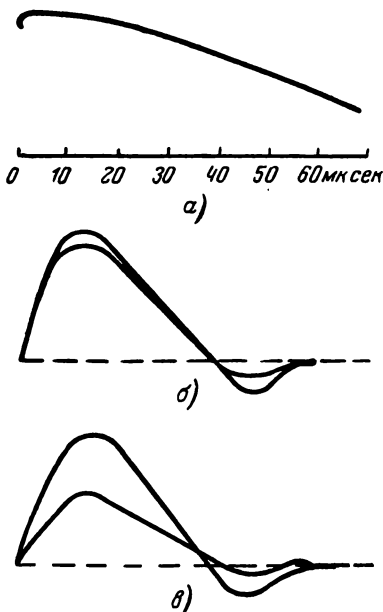


Фиг. 5,22.

специального прибора — осциллоскопа, принцип действия которого основан на визуальном сравнении формы волны в симметричных обмотках или же частях обмоток. При испытании витковой изоляции обмоток электромашин этим прибором импульсы напряжения определенной величины (до 10 кВ) подаются через синхронный переключатель на испытываемую часть обмотки попеременно то в одном, то в другом направлении (фиг. 5,23, где ГИ — генератор импульсов; КО — катодный осциллограф, 0—1, 0—2, 0—3 — фазы испытываемой обмотки).



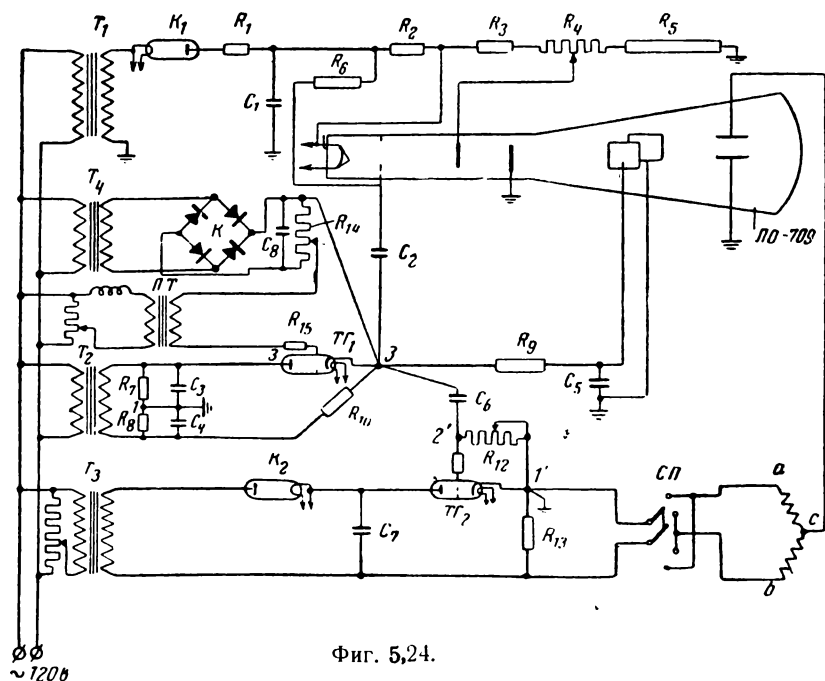
Фиг. 5,23.



Фиг. 5,23а.

Если испытываемая обмотка (или части ее) симметрична, то форма и величина волны в точке симметрии (например, нейтрали) будут одни и те же для каждого направления движения импульса. В этом случае на экране катодного осциллографа, присоединенного к симметричной точке обмотки, появится

одна стоячая волна. При наличии в обмотке дефектов, искажающих симметрию (например, короткое замыкание витка из-за пробоя витковой изоляции), напряжение на нейтрали при разных направлениях движения волны будет различно и на экране осциллографа появятся две волны. По виду этих волн можно судить о характере дефекта. На фиг. 5,23 показаны типичные осциллограммы, полученные при испытании изоляции электрических машин, имеющих различные дефекты в витковой изоляции (*а* — падающая волна; *б* — один виток короткозамкнут; *в* — одна катушка замкнута).



Фиг. 5,24.

В СССР кандидатами технических наук М. В. Смирновым и В. Д. Мажуга разработан и построен портативный аппарат для обнаружения витковых замыканий в обмотках электрических машин и для проверки правильности схем соединения обмоток. Этот аппарат состоит из трех основных и трех вспомогательных узлов (фиг. 5,24). Основные узлы: 1) электронно-лучевая трубка с экраном и контур питания этой трубки, 2) контур развертки луча на экране по оси времени, 3) контур импульсного генератора. Вспомогательные узлы: а) выпрямительный контур для запираания контура развертки времени и для синхронного управления открыванием и появлением луча на экране, разверткой этого луча по оси времени и подачей

волны импульса на испытуемые обмотки; б) пик-трансформатор для более устойчивой работы тиратрона контура развертки; в) синхронный переключатель с четырьмя парами контактов для подачи волн импульсного генератора на испытуемые обмотки поочередно то в одном, то в другом направлении.

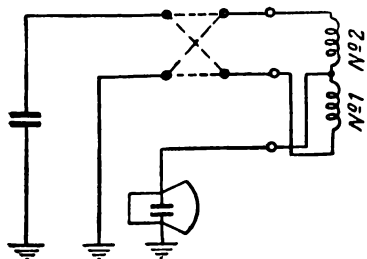
Работа прибора осуществляется следующим образом. При срабатывании тиратрона $TГ_1$ одновременно с открыванием и разворачиванием луча на экране подается через емкость C_5 положительный импульс на сетку тиратрона $TГ_2$, который до этого был заперт отрицательным потенциалом на сетке. Как только на сетку тиратрона $TГ_2$ импульсного генератора поступает положительный импульс, тиратрон открывается и конденсатор C_7 разряжается на испытуемые обмотки через синхронный переключатель СП поочередно то в одном, то в другом направлении. Волна импульса, войдя в обмотку в точке a или в точке b (поочередно), дойдет до точки c , претерпевая изменения, которые можно наблюдать на экране электроннолучевой трубки, причем если плечо $a-c$ обмотки симметрично с плечом $b-c$, то волны в точке c в обоих случаях будут накладываться друг на друга и на экране будет наблюдаться одна кривая.

При нарушении симметрии плеч $a-c$ и $b-c$ из-за короткого замыкания между витками, неправильной схемы соединения, разного числа витков, пробоя изоляции обмотки между фазами или на корпус (если обмотка уложена в пазы машин) или по каким-либо другим причинам волна в точке c , прошедшая через плечо $a-c$ будет отлична от волны, прошедшей через плечо $b-c$, и на экране появятся две отличные друг от друга кривые. Аппарат может быть применен для обнаружения витковых замыканий в обмотках электрических машин как до укладки в машину, так и после укладки.

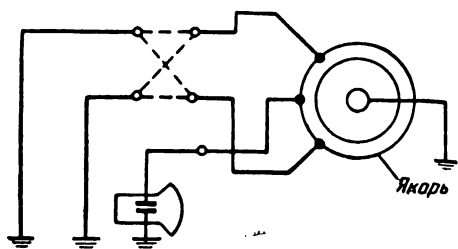
После разработки импульсного контура на более высокое напряжение (до 10 кВ) и разработки методов получения равномерного распределения напряжения вдоль обмотки аппарат этого типа может быть применен не только для обнаружения короткозамкнутых витков, но и для испытания электрической прочности витковой изоляции обмоток до и после укладки их в сталь. Аппарат имеет следующие преимущества: он портативен, имеет небольшой вес, питается от обычной осветительной розетки и может быть использован для массового контроля на электромашиностроительных заводах и в ремонтных мастерских, а также для профилактических испытаний витковой изоляции в эксплуатации.

Описанный выше метод является универсальным и позволяет производить испытание витковой изоляции обмоток электрических машин постоянного и переменного тока мощностью от долей киловатта до самых больших величин.

На фиг. 5,25 показана схема включения осциллоскопа при испытании витковой изоляции отдельных катушек или однофазных двигателей, а на фиг. 5,26 схема для испытания якорных обмоток (между ветвями или между двумя соседними коллекторными пластинами).

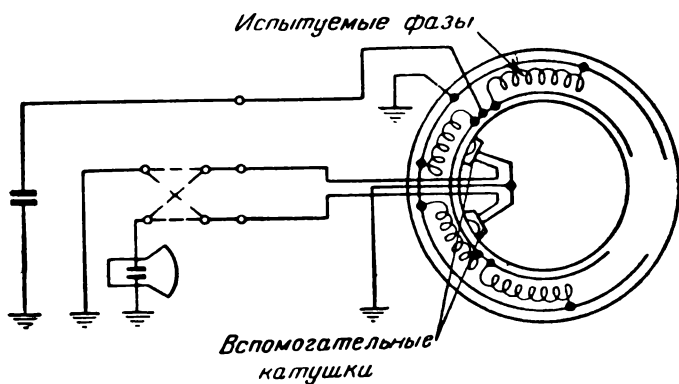


Фиг. 5,25.



Фиг. 5,26.

Описанный метод позволяет также производить испытание статорных обмоток, состоящих из большого числа параллельных ветвей. В этом случае применяется дополнительный электромагнит с двумя обмотками, который индуктивно связывается с двумя симметричными элементами обмотки (фиг. 5,27).



Фиг. 5,27.

Распределение напряжения вдоль обмоток разных исполнений при импульсном испытании витковой изоляции показано на фиг. 5,28, где кривая 1 характеризует распределение напряжения в обмотке якоря крупной машины; 2, 3 и 4 — в магнитных катушках с большим числом витков (35 000). Следует отметить, что по характеру кривой на экране электроннолучевой трубки можно легко определить и характер повреждения (коронирование в дефектном месте, наличие дуги и т. п.).

Чувствительность данного метода настолько велика, что позволяет обнаружить несимметричность обмоток из-за плохой пропитки лаками и компаундами.

Сравнивая метод испытания электрической прочности витковой изоляции обмоток импульсами с использованием осциллографа с синхронным переключателем с другими методами, можно установить следующие его преимущества:

1. Универсальность, позволяющая производить испытание витковой изоляции практически у всех обмоток как до, так и после укладки их в машину.

2. Возможность изменения испытательного напряжения от нуля до требуемой величины.

3. Легкое и простое управление установкой.

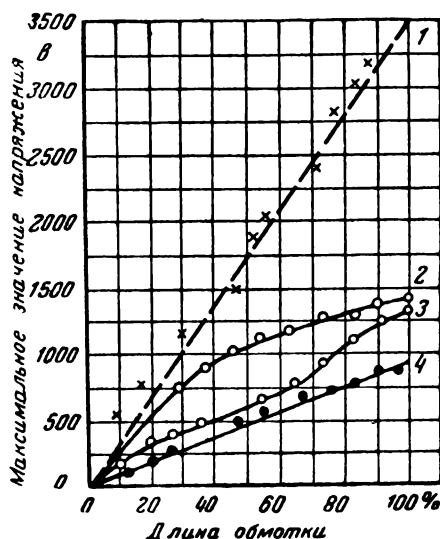
4. Наличие электроннолучевой трубки позволяет объективно оценивать характер и величину повреждений витковой изоляции и легко находить дефектное место.

Следует рекомендовать самое широкое применение этого метода на электромашиностроительных заводах, в ремонтных мастерских, а также при профилактических испытаниях витковой изоляции в условиях эксплуатации.

Испытательные напряжения при проверке электрической прочности витковой изоляции обмоток. Исходя из результатов многочисленных исследований различных видов междувитковой изоляции катушек электрических машин, а также учитывая длительный опыт промышленных испытаний на электромашиностроительных заводах, установлены определенные величины испытательных напряжений для витковой изоляции в зависимости от вида изоляции.

В табл. 5,5 приведены эффективные значения испытательных напряжений, приходящихся на один виток катушки (разрезной или неразрезной), испытываемой до укладки ее в машину, для основных типов междувитковой изоляции катушек при длительности испытания 10—15 сек.

Приведенные в табл. 5,5 величины испытательных напряжений относятся к полностью готовым катушкам (изолирован-



Фиг. 5,28.

Таблица 5,5

Изоляция витков катушки	Испытательное напряжение витков в
Провод ПБО (пропитанный)	150
Провод ПБД, ПДА или ПСД (пропитанный)	300
Провод ПЭЛБО (пропитанный)	400
Провод ПЭЛШО (пропитанный)	400
Голый провод, изолированный по всей длине одним слоем хлопчатобумажной ленты вполнахлеста	500
Голый провод, изолированный одним слоем микаленты 0,13 мм вполнахлеста	800
Голый провод, изолированный одним слоем микаленты 0,13 мм вполнахлеста и сверху одним слоем хлопчатобумажной ленты впритык	1 000
Провод ПБД, между витками прокладки из лакированного электрокартона толщиной 0,2 мм	500
Провод ПБД, ПДА или ПСД между витками прокладки из миканита толщиной 0,20 мм	500
Провод ПБД, ПДА или ПСД, изолированный по всей длине витка одним слоем микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста и хлопчатобумажной лентой вполнахлеста.	1 500
Провод ПБД, ПДА или ПСД, изолированный по всей длине витка двумя слоями микаленты толщиной 0,13 мм и слоем хлопчатобумажной лентой впритык	2 000

ным, пропитанным или компаундированным) до их укладки в машину. При этом при испытании витковой изоляции неразрезных катушек применяются высокочастотные затухающие колебания.

Таблица 5,6

Наименование материала	Толщина в мм	Пробивное напряжение (эффект.) в кв при частоте					
		$f = 15\ 000\ \text{гц}$			$f = 50\ \text{гц}$		
		макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.
Электрокартон	0,11	3,7	3,0	3,6	3,95	2,5	3,1
Лаковая пленка	0,05	6,0	3,5	4,3	5,9	3,0	4,1
Слюда	0,02	4,5	3,9	4,2	6,2	1,13	3,76

Разрезные катушки обычно испытываются напряжением частотой 50 гц. Сравнительные испытания электрической прочности материалов, применяемых для витковой изоляции катушек при частоте 50 гц, а также при повышенных частотах, показали, что электрическая прочность этих материалов, определенная при воздействии на них высокочастотных затухающих колебаний, практически не отличается от электрической прочности при промышленной частоте (50 гц), что подтверждается данными табл. 5,6.

Опытами установлено, что при пробое изолирующих материалов высокочастотными затухающими колебаниями не замечается заметного термического действия, если время испытания не превышает 10—15 сек. Подобные результаты, приведенные в табл. 5,7, получены и для образцов имитирующих витковую микалентную изоляцию.

Таблица 5,7

Частота	Пробивное напряжение в кв		
	макс.	мин.	среднее из 20 пробоев
Затухающие колебания 15 000 гц . . .	42	17,0	30,8
50 гц . . .	46,5	14,1	28,2

Установлено также отсутствие заметного влияния на электрическую прочность витковой изоляции высокочастотных затухающих колебаний при времени воздействия до 10—15 мин., что следует из данных табл. 5,8 для микалентной изоляции.

Таблица 5,8

Время воздействия на изоляцию затухающих высокочастотных колебаний при 3 000 в	Пробивное напряжение витковой изоляции при 50 гц в кв _{макс}		
	макс.	мин.	средн.
0 мин.	46,5	14,1	25,2
5 "	43,2	14,0	24,8
10 "	42,5	14,0	24,3

Испытательное напряжение между витками для катушек, уложенных в пазы статора, должно быть несколько ниже напряжения, которое прикладывалось при испытании катушки до ее укладки в машину. Но вместе с тем это напряжение не должно быть ниже тех напряжений, которые можно ожидать при перенапряжениях.

Испытание электрической прочности изоляции между смежными витками для вновь изготовленных машин согласно ГОСТ 183-41 производится в течение 5 мин. при холостом

ходе машины путем повышения подводимого (в случае двигателя) или генерируемого (в случае генератора) напряжения на 30 % сверх номинального напряжения машины.

При испытании обмоток после их ремонта электрическая прочность испытывается так же, как у новых машин, но только в течение 1 мин.

5.7. Измерение сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции машины зависит от многих факторов, главнейшими из которых являются: свойство и качество примененных изоляционных материалов, толщина и площадь изоляции между частями машины, находящимися под напряжением, и корпусом машины, содержание и распределение влаги в изоляции, температура и др. Поэтому трудно установить определенные нормы для сопротивления изоляции как для вновь выпускаемых машин, так и для машин, находящихся в эксплуатации.

Контрольные измерения сопротивления изоляции следует производить:

1. При сушке обмоток, уложенных в машину, до и после пропитки обмоток в лаках;

2. При сушке высоковольтных машин перед подключением их к напряжению (испытательному или рабочему);

3. При заводском испытании готовой машины после испытания на нагревание, до и после испытания электрической прочности изоляции относительно корпуса. В этом случае общее сопротивление изоляции машины при температуре, близкой к рабочей, должно быть не ниже предписываемого ГОСТ 183-41 и определяемого по формуле

$$R_i = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}}, \quad (5,24)$$

где R_i — сопротивление изоляции в мегомах;

U — номинальное напряжение обмотки машины в вольтах;

P — мощность машины в киловольтамперах.

4. При эксплуатационном контроле общего состояния изоляции машины.

Для измерения сопротивления изоляции электрических машин обычно применяется мегомметр с ручным или электрическим приводом. При этом один зажим мегомметра, имеющий обозначение «земля», соединяется с корпусом испытуемой машины; другой с обозначением «сеть» соединяется с обмоткой или частью машины, сопротивление которой необходимо измерить, после чего приводят ручку прибора во вращение со ско-

ростью, обозначенной на мегомметре или же в инструкции к нему.

При измерении сопротивления крупных и особенно высоковольтных машин наблюдается значительное изменение сопротивления изоляции в первый период измерения из-за заряда емкости и абсорбционных явлений. Аналогичные явления происходят и при уменьшении скорости вращения ручки прибора ниже номинальной. Поэтому ручку следует вращать по возможности равномерно, со скоростью не ниже номинальной.

Отсчет величины сопротивления по мегомметру следует производить после того, как стрелка практически установится в определенном положении. Для измерения сопротивления изоляции электрических машин могут быть также применены cathодные мегомметры, получающие все более широкое распространение. Описание cathодных мегомметров можно найти в соответствующих руководствах.

Можно рекомендовать при измерении сопротивления применение приборов со следующими напряжениями:

- а) высоковольтные обмотки—1 000 и 2 500 в;
- б) низковольтные обмотки—500 в.

Сопротивление изоляции машин сильно меняется с температурой, а поэтому, сравнивая между собой сопротивление изоляции, необходимо приводить его к определенной температуре, например к 20° С (или 100° С).

До настоящего времени для суждения о состоянии изоляции электрических машин часто пользуются величиной сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса, а также между отдельными обмотками. В частности при установлении влагостойкости изоляции электрических машин производится измерение сопротивления изоляции машины, помещенной в атмосферу с 95—98%-ной относительной влажностью.

При контроле изоляции машин в условиях эксплуатации также производятся замеры сопротивления изоляции. Следует отметить, что величина сопротивления изоляции машины не может являться достаточным критерием для установления состояния изоляции и степени ее надежности. Непригодность измерения сопротивления изоляции в качестве основного критерия при оценке надежности (т. е. запаса электрической прочности) изоляции следует из того, что не существует прямой связи между электрической прочностью и сопротивлением диэлектриков (см. табл. 5,9).

Из табл. 5,9 следует, что электрокартон в сухом состоянии имеет практически то же удельное объемное сопротивление, что и слюда. Однако электрическая прочность электрокартона в 10 раз меньше, чем у слюды. Таким образом, высокое сопротивление изоляции электрической машины еще не является признаком, характеризующим наличие у изоляции достаточных запасов электрической прочности.

Таблица 5,9

Наименование диэлектриков	Удельное объемное сопротивление в ом . см	Электрическая прочность в кв/мм
Слюда мусковит	10 ¹⁵ —10 ¹⁶	100—250
Слюда флогопит	10 ¹³ —10 ¹⁴	80—180
Электрокартон ЭВ		
а) В сухом состоянии	10 ¹⁴ —10 ¹⁵	10—15
б) При 65% относительной влажности	10 ¹⁰	7—10
Лакоткань светлая		
а) До сушки	10 ¹¹ —10 ¹²	25—30
б) После сушки	10 ¹³ —10 ¹⁴	30—35
Битум нефтяной	10 ¹⁴ —10 ¹⁵	25—30
Ткань стеклянная непропитанная . .	10 ¹² —10 ¹³	5—6

При длительном нагреве до 100—110° С пропитанной целлюлозной волокнистой изоляции ее сопротивление обычно несколько повышается, но в то же время эта изоляция становится хрупкой, легко повреждается при работе машины, ее электрическая прочность резко падает.

В процессе теплового старения микафолиевой изоляции якорных секций при температуре 165° С установлено, что сопротивление изоляции секции возросло в 3 раза при одновременном снижении электрической прочности почти в 2 раза.

Произведенные нами исследования показали, что после выдерживания обмотанного якоря с миканитовой изоляцией в атмосфере с 95—98 % -ной относительной влажностью в течение 40 суток общее сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса снизилось более, чем в 200 раз. В то же время пробивное напряжение изоляции обмотки снизилось с 8 200 в до 4 500 в, т. е. меньше, чем в 2 раза.

Определения сопротивления и электрической прочности миканитовой изоляции стержней при их длительном пребывании в атмосфере с 95 % -ной относительной влажностью показали, что при снижении сопротивления изоляции стержней в 1 000 раз электрическая прочность этих стержней снизилась всего на 13—28 % (см табл. 5,10).

Таблица 5,10

Время в часах	Миканитовая изоляция на шеллаке		Миканитовая изоляция на глифтале	
	Сопротивление в ом	Пробивное напряжение в кв	Сопротивление в ом	Пробивное напряжение в кв
0	8·10 ¹⁰	29,9	4·10 ¹¹	29,1
96	9·10 ⁸	—	4,6·10 ⁸	27,0
320	6,7·10 ⁷	22,7	1,0·10 ⁷	23,5
484	6,7·10 ⁷	21,4	9,9·10 ⁶	23,5

Исследования изоляции ряда низковольтных машин, длительно выдерживаемых в атмосфере с относительной влажностью 95—98%, также показали, что, несмотря на значительное снижение сопротивления изоляции этих машин (до 0,05—0,02 мгом), пробивное напряжение их изоляции оставались выше 1 000—1 500 в. Можно считать установленным, что при нахождении электрических машин в атмосфере с относительной влажностью 95—98% в первую очередь происходит отсыревание поверхностного слоя изоляции. В этом случае общее сопротивление изоляции определяется поверхностными токами утечки, а не токами, протекающими в толще изоляции. Аналогичные явления имеют место при поверхностных загрязнениях изоляции в условиях эксплуатации. Вместе с тем наличие поверхностных токов не оказывает существенного влияния на запас электрической прочности основной изоляции электромашин, а значит на их надежность.

Приведенные выше данные, а также ряд других, подтверждают высказанное нами утверждение, что абсолютная величина сопротивления изоляции электрических машин не может служить решающим критерием для оценки состояния машины. Поэтому всякие попытки установить для электрических машин величину минимального сопротивления следует признать несостоятельными и не имеющими под собой достаточного теоретического и экспериментального подтверждения.

Вопрос об установлении объективного критерия оценки состояния изоляции электрической машины в настоящее время является весьма актуальным, и в этом направлении необходима соответствующая экспериментальная работа. Следует отметить, что в последнее время для оценки степени увлажнения изоляции электрических машин был предложен ряд новых методов, таких, как установление зависимости емкости от температуры или частоты, снятие кривых абсорбции и др., которые позволяют более надежно установить состояние изоляции, в частности степень ее увлажнения.

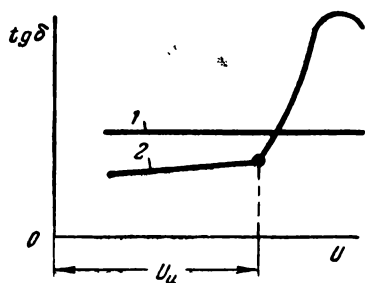
5,8. Измерение диэлектрических потерь в изоляции обмоток

При контрольных испытаниях изоляции статорных обмоток электрических машин напряжением 6 кВ и выше необходимо определять величину диэлектрических потерь.

Измерение диэлектрических потерь в изоляции обмоток, изготовленных из высококачественных материалов, позволяет контролировать отдельные элементы технологии изолировки обмоток высоковольтных машин, определяющей плотность и монолитность изоляции.

Для обнаружения неплотностей в изоляции катушек, полукатушек и стержней необходимо не только измерить величину диэлектрических потерь при каком-нибудь напряжении (например, рабочем), но и установить характер изменения ди-

электрических потерь при различных напряжениях для установления напряжения, при котором начинается ионизация воздушных включений. На фиг. 5,29 приведены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ изоляции двух статорных катушек на рабочее напряжение 6 кВ. Из кривых фиг. 5,29 следует, что, несмотря на малые значения $\operatorname{tg} \delta$ у катушки 2 при напряжениях до 4 кВ (меньших, чем у катушки 1), изоляцию этой катушки следует признать недоброкачественной, так как при напряжении выше 4 кВ наблюдается резкое возрастание $\operatorname{tg} \delta$ из-за нали-



Фиг. 5,29.

чия воздушных включений в изоляции. Выбрав соответствующие значения напряжения, при котором должно производиться измерение диэлектрических потерь в изоляции обмоток, можно по приращению величины $\operatorname{tg} \delta$ судить о плотности изоляции.

Измерение диэлектрических потерь в изоляции обмоток может производиться: 1) у отдельных катушек, полукатушек

и стержней до их укладки в машину, 2) у собранных машин на заводе-изготовителе и 3) у машин, находящихся в эксплуатации.

Определение $\operatorname{tg} \delta$ у отдельных катушек, полукатушек и стержней обычно производится после окончательной изолировки. В случае непрерывной изоляции диэлектрические потери измеряются после полной изолировки и окончательного компаундирования.

По принятым на большинстве отечественных заводов нормам через контрольные определения $\operatorname{tg} \delta$ проходят:

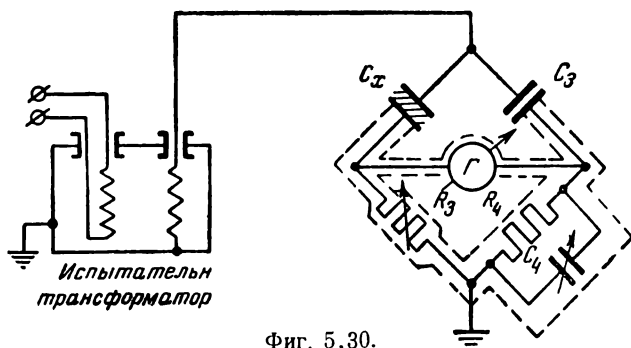
1) для машин мощностью от 4 000 до 6 000 кВт и напряжением 6 кВ и выше — все первые (по времени исполнения) катушки, (полукатушки или стержни) в количестве 10% от их общего числа в машине и дополнительно 10% по выбору;

2) для машин мощностью свыше 6 000 кВт и напряжением 6 кВ и выше — все катушки (полукатушки и стержни).

При массовых испытаниях катушек обычно применяются электроды из отожженной алюминиевой или слюняной фольги без охранных колец. Для более плотного прилегания электрода к поверхности изоляции применяется фольга в виде полос шириной 50—100 мм, наматываемых с перекрытием около 10 мм, которая тщательно притирается к поверхности изоляции. Длина электрода должна быть равна длине активной части пакетов статора. Для вывода используется медная луженая проволока диаметром 0,3—0,5 мм. Сверху электрод того обматывается хлопчатобумажной лентой впритык.

При проверочных испытаниях с обоих концов электрода на расстоянии 1—2 мм накладываются охранные кольца из фольги шириной 25—50 мм, которые должны заземляться. Измерение с охранными кольцами производится не менее, чем у 5% от числа взятых для контрольных испытаний катушек, но не менее, чем у двух катушек.

Определение диэлектрических потерь в изоляции катушек (полукатушек или стержней) производится высоковольтным мостом (фиг. 5,30, где C_x — испытуемая изоляция ма-



Фиг. 5,30.

шины; C_3 — эталонный конденсатор; R_3 — магазин омических сопротивлений; R_4 — чисто омическое сопротивление; C_4 — магазин емкостей; Γ — вибрационный гальванометр), при стандартной частоте и температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$, по прошествии не менее суток после окончания технологического процесса изготовления и приведения к нормальной температуре.

Тангенс угла диэлектрических потерь измеряется при напряжениях, равных половинному, полному и полуторному линейному номинальному напряжению машины, что дает возможность выявить наличие воздушных включений в изоляции катушек.

На основании многолетнего опыта советских заводов установлены максимально допустимые значения $\text{tg } \delta$ изоляции катушек, полукатушек и стержней (измеренные при номинальном напряжении машины и частоте 50 гц), приведенные в табл. 5,11.

Таблица 5,11

Мощность машины в квт	tg δ должны быть при номинальном напряжении не более	
	без охранных колец	с охранными кольцами
От 4 000 до 6 000	0,15	0,12
От 6 000 до 25 000	0,12	0,10
25 000 и выше	0,10	0,08

Однако абсолютное значение $\operatorname{tg} \delta$ не может служить достаточным критерием при оценке диэлектрических свойств изоляции катушек, так как при этом не выявляется наличие воздушных включений в изоляции. Поэтому для полной оценки качества изоляции необходимо определить рост диэлектрических потерь:

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1, \quad (5,26)$$

где $\operatorname{tg} \delta_1$ — тангенс угла диэлектрических потерь, определенный при половинном от номинального напряжения;

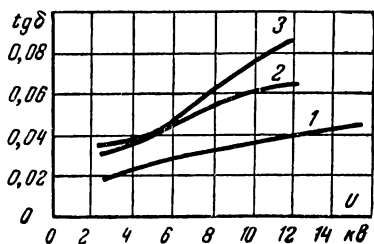
$\operatorname{tg} \delta_2$ — тангенс угла диэлектрических потерь, определенный при полуторном номинальном напряжении.

В табл. 5,12 приводятся допускаемые советскими заводами значения $\Delta \operatorname{tg} \delta$ для катушек, полукатушек и стержней.

Таблица 5,12

Мощность машины в <i>квт</i>	$\Delta \operatorname{tg} \delta$	
	без охранных колец	с охранными кольцами
От 6 000 до 25 000	0,05	0,04
25 000 выше	0,04	0,03

Обычно значения $\operatorname{tg} \delta$ для изоляции катушек до их укладки в машине при температуре $20 \pm 5^\circ \text{C}$ колеблются в пределах от 0,06 до 0,09, а $\Delta \operatorname{tg} \delta$ — в пределах от 0,005 до 0,03. На фиг. 5,31 приведены типичные кривые, выражающие графически зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$, для стержней и катушек, имеющих непрерывную микалентную изоляцию (1 — статорные катушки турбогенератора 100 тыс. *мвт*; 2 и 3 — статорные катушки на 6 *кв*).

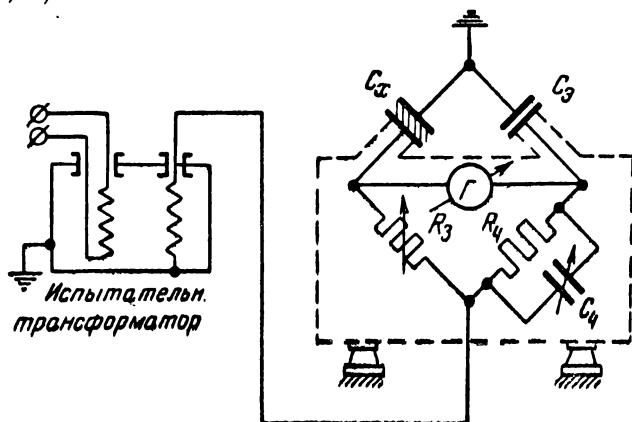


Фиг. 5,31.

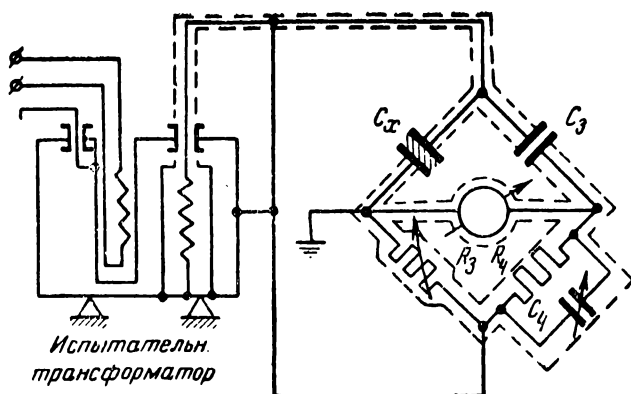
Диэлектрические потери у собранных машин обычно несколько отличаются от величины диэлектрических потерь у отдельных катушек из-за наличия воздушных зазоров между изоляцией обмотки и сталью статора. Наличие полупроводящих слоев на поверхности изоляции сглаживает влияние этих воздушных зазоров.

Для измерения диэлектрических потерь у собранных машин может быть использован обычный высоковольтный мост с использованием метода вычитания при двухкратном опре-

деления диэлектрических потерь: вначале без подключенной обмотки машины, а затем при подключенной обмотке. Возможно также применение моста по перевернутой схеме (фиг. 5,32) или по обратной схеме с заземленной диагональю (фиг. 5,33).



Фиг. 5,32.

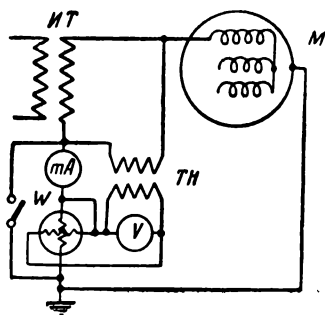


Фиг. 5,33.

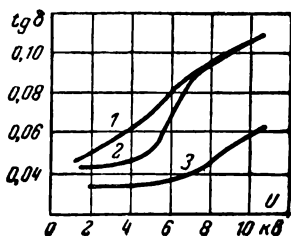
Вполне надежные результаты могут быть получены при измерении диэлектрических потерь у собранных машин высокочувствительным ваттметром по схеме фиг. 5,34 (ИТ — испытательный трансформатор; М — испытуемая машина; W — ваттметр; mA — миллиамперметр переменного тока; ТН — трансформатор напряжения). При этом должны быть учтены паразитные емкостные токи, искажающие показание ваттметра и введены соответствующие поправки.

Если измерение диэлектрических потерь в катушках, полукатушках и стержнях мощных машин, напряжением 6 кВ

и выше (до их укладки), является обязательным, то измерение диэлектрических потерь у собранных машин не нормировано и производится на электромашиностроительных заводах сравнительно редко. Измерение диэлектрических потерь у собранных машин представляет значительно меньшую ценность, так как при этом замеряются диэлектрические потери не только в изоляции обмотки, но во всех прослойках воздуха, которые находятся в сильном электрическом поле и в которых возникают добавочные, «внешние» потери, менее опасные для миканитовой изоляции.



Фиг. 5,34.



Фиг. 5,35.

На фиг. 5,35 представлены кривые, характеризующие зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения при 50°C для трех турбогенераторов, мощностью 55,5—58,9 тыс. *кв*а, напряжением 10,5 *кв*, производства завода „Электросила“, находящихся в эксплуатации. Из кривых фиг. 5,35 следует, что $\operatorname{tg} \delta$ у этих машин даже при 50°C лежит ниже норм, установленных для вновь изготовленных обмоток.

5.9. Контроль влажности изоляции по изменению емкости обмоток

Для контроля степени увлажнения изоляции электрических машин может быть использована зависимость емкости от температуры или частоты. На фиг. 5,36 показано изменение емкости обмотки асинхронного двигателя небольшой мощности с изоляцией класса А от температуры, для влажной (1) и сухой (2) изоляции. Использование этой зависимости позволяет определить степень отсыревания изоляции электрических машин с изоляцией класса А.

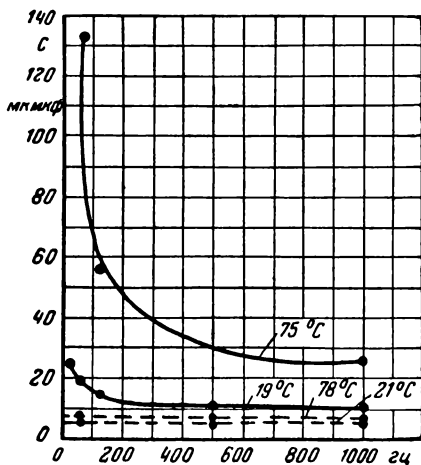
Следует отметить, что у машин с миканитовой изоляцией (компаундированной) не наблюдается столь резкого изменения зависимости емкости от температуры при технической частоте. Более удобно контролировать состояние изоляции

электрических машин по изменению емкости от частоты (фиг. 5,37 сплошные линии — влажная; пунктир — сухая изоляция). Эти методы могут быть использованы для контроля изоляции в процессе сушки изоляции, а также при испытаниях изоляции в условиях эксплуатации.

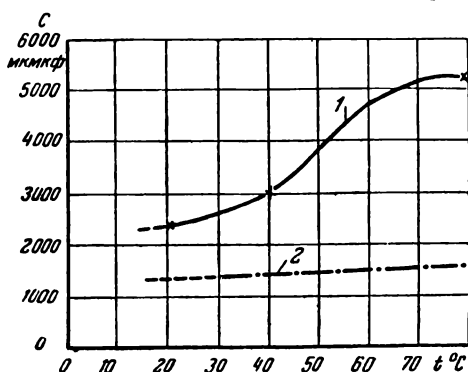
5,10. Контроль состояния изоляции по кривым абсорбции

В последнее время для контроля степени увлажнения изоляции электрических машин с большим успехом применяется метод, основанный на снятии зависимости тока утечки от времени, т. е. абсорбционных кривых.

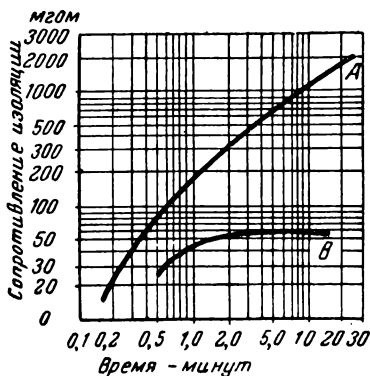
На фиг. 5,38 показано изменение сопротивления изоляции от времени приложения напряжения в процессе сушки генератора 31 000 ква, 3,3 кв.



Фиг. 5,37.



Фиг. 5,36.



Фиг. 5,38.

Следовательно, снимая кривые абсорбции [$J = f(t)$ или $R = f(t)$], можно по их характеру установить состояние изоляции, так как у сухой изоляции (кривая A) наблюдается значительная зависимость тока от времени, в то время как для отсыревшей изоляции изменение тока от времени меньше (кривая B).

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ЭКСПЛУАТАЦИИ

6.1. Условия работы изоляции электрических машин в эксплуатации

Изоляция электрических машин после их выпуска заводом-изготовителем подвергается различным воздействиям, которые оказывают влияние на ее состояние. Так, во время транспортировки машины с завода-изготовителя к месту установки ее изоляция подвергается воздействию влаги, пониженных температур, тряски и др. В процессе монтажа изоляция машины также подвергается различным внешним воздействиям. Однако наиболее существенные воздействия на изоляцию имеют место при непосредственной эксплуатации машины. Эти воздействия зависят как от режима работы машины, так и условий, в которых находится машина (влажность, температура окружающего воздуха и др.).

Во всех электрических машинах, независимо от того, где они установлены, при работе под нагрузкой изоляция (витковая и относительно корпуса) подвергается следующим воздействиям: 1) электрического поля, 2) рабочих нагревов, 3) механических усилий (электродинамические силы, внутренние вибрации, центробежные силы у вращающихся частей и др.).

Эти воздействия будут действовать все время, пока машина находится в рабочем режиме.

В период включения машины в рабочий режим, а также при наличии переходных режимов, напряженность электрического поля, температура и механические усилия, действующие на изоляцию, изменяются и могут значительно превосходить те, которые имеют место при установившемся режиме работы машины.

Кроме перечисленных выше воздействий, определяемых режимом работы машины, на ее изоляцию могут действовать и другие факторы, не зависящие от того, работает машина или нет. К числу таких воздействий относятся:

1. Влажность воздуха, соприкасающегося с обмоткой. Воздействие влажности на изоляцию существенно в тот период, когда машина находится в нерабочем состоянии и когда температура изоляции близка к температуре окружающего воздуха. В этот период будет происходить проникание влаги в изоляцию и ее отсыревание. Наиболее интенсивно влага будет засасываться в изоляцию машины при ее остывании, когда в порах и капиллярах изоляции давление будет несколько ниже атмосферного.

2. Повышенная температура окружающего воздуха. При расчетах электрических машин обычно исходят из температуры окружающего воздуха $+35^{\circ}\text{C}$ (для нормальных стационарных машин). Однако в некоторых случаях эксплуатации температура окружающего воздуха может превосходить $+35^{\circ}\text{C}$. В этом случае даже при работе с номинальной нагрузкой неизбежен повышенный перегрев обмоток машин выше допустимого.

3. Химически активные вещества, которые могут находиться в охлаждающем обмотку воздухе. Сюда относятся пары кислот, щелочей, хлор, аммиак, озон, пары растворителей (бензин, бензол и др.) и масел, а также смазочные вещества и жидкости, применяемые для охлаждения режущих инструментов (эмульсии), и др. Особенно высокие концентрации химически активных веществ могут быть в гальванических мастерских, травильных участках, а также на химических заводах.

4. Пыль, проводящая или не проводящая. При работе вентилируемых машин в помещениях, содержащих пыль, копоть, золу и т. п., их изоляция подвергается непосредственному воздействию пыли, которая частично оседает на поверхности изоляции, а частично, проносясь с большой скоростью, оказывает абразивное действие. В зависимости от химического состава пыль может быть химически активной (сода, соль и т. п.), а также нейтральной (цемент, песок, глина и т. п.).

5. Внешние механические воздействия. Сюда относятся вибрации, толчки, удары, передаваемые электромашинам со стороны первичных двигателей (в случае генераторов) или же со стороны привода (в случае электродвигателей). Наиболее сильные внешние механические воздействия имеют место в тяговых электродвигателях, судовых установках и т. п.

6. Морская вода — в корабельных установках.

7. Низкие температуры, достигающие на самолетных установках -60°C .

8. Водород. В современных крупных турбогенераторах охлаждающей средой является водород. Следует отметить, что по имеющимся данным водородная атмосфера, будучи

восстановительной, является более благоприятной средой для изоляции по сравнению с воздухом.

9. Минеральное масло. В потенциалрегуляторах с масляным охлаждением изоляция подвергается непосредственному воздействию горячего трансформаторного масла.

10. Микроорганизмы (например, гнилостные бактерии). В сырых и теплых помещениях органическая изоляция, особенно целлюлоза, может подвергаться воздействию микроорганизмов. В тропических районах наблюдается также воздействие на органическую изоляцию насекомых.

Из приведенного выше видно, в каких тяжелых условиях может находиться и работать электрическая машина и каким воздействиям может подвергаться ее изоляция.

6.2. Поведение изоляции электрических машин в эксплуатации

Как было указано выше, в § 6,1, изоляция электрических машин, находящихся в эксплуатации, подвергается различным воздействиям, которые, оказывая влияние на изоляцию, могут вызывать в ней как обратимые, так и необратимые процессы, приводящие в конечном счете к ухудшению физических, электрических и механических характеристик изоляции машин.

При длительном воздействии напряжения на изоляцию обмоток высоковольтных машин в ней при известных условиях могут происходить заметные изменения диэлектрических свойств отдельных ее составляющих элементов, что изменяет свойства и всей изоляции в целом.

На наличие таких процессов, ухудшающих с течением времени диэлектрические свойства изоляции, указывает зависимость пробивного напряжения от времени; пробивное напряжение при длительном воздействии напряжения с течением времени понижается. Обычно ухудшение диэлектрических свойств изоляции при электрическом старении сопровождается снижением ее механических свойств.

Процессы, происходящие в изоляции машин при длительном воздействии на нее повышенных напряжений, могут быть:

а) обратимыми, когда после снятия на некоторое время напряжения («отдыха») диэлектрические свойства изоляции возвращаются к первоначальным;

б) необратимыми, приводящими к разрушениям и химическим изменениям, т. е. к старению изоляции.

Почти все процессы, происходящие в изоляции под воздействием электрического поля, обычно идут в направлении ухудшения ее диэлектрических свойств.

Электрическая энергия может переходить в изоляции в тепловую, дополнительно нагревая ее, в механическую, образуя разрывы и трещины в материале, в химическую, вы-

зывая разложение материала. Все эти процессы могут протекать в изоляции одновременно, а также возможен переход энергии из одной формы в другую; так, например, сильный разогрев изоляции может привести к дополнительному химическому и механическому разрушению органической части изоляции.

Исключительно большое влияние на процессы электрического старения оказывает ионизация внутренних газовых включений, если таковые имеются в толще изоляции (см. § 2,6 и 2,14).

Ионизация воздушных (газовых) включений может приводить к:

- а) увеличению тепловых потерь в изоляции;
- б) механическому расщеплению слюдинок (при наличии искровых разрядов);
- в) образованию озона и окислов азота, которые в присутствии влаги образуют азотистую и даже азотную кислоту.

Озон, являясь сильным окислителем, разрушает некоторые органические материалы (целлюлоза, шеллак и др.). Азотная и азотистая кислоты могут действовать не только на изоляцию, но и на металлы (сталь, медь).

Рассмотрим, как действуют продукты ионизации на отдельные составные части изоляции высоковольтных машин. Изоляция современных высоковольтных машин может содержать в себе следующие материалы: 1) слюду; 2) склеивающие вещества (битумные лаки, шеллак); 3) пропитывающие вещества (лаки, компаунды); 4) целлюлозные материалы (бумаги, электрокартон, хлопчатобумажные ленты). Как показывают исследования, озон и окислы азота практически не действуют на слюду. На битумные лаки и битумные компаунды продукты ионизации сравнительно мало действуют, даже при высоких концентрациях озона. Наиболее сильное действие оказывает ионизация на шеллак и целлюлозные материалы. Достаточно небольших очагов ионизации, чтобы началось химическое разрушение целлюлозных материалов. При этом оказывается, что раз начавшееся разрушение изоляции обладает свойством развиваться самостоятельно, без наличия электрического поля, за счет продуктов разложения. Поведение различных типов изоляции высоковольтных машин при воздействии на них напряжения подробно рассмотрено в § 2,9 и 2,11.

Кроме внутренней ионизации, когда разряды происходят во внутренних включениях, возможна также ионизация воздушных зазоров между поверхностью изоляции и стенками паза, а также у места выхода обмотки из паза и в лобовых частях обмотки.

Явление наружного коронирования (озонирования) наблюдается у многих машин, но является менее опасным, чем внутренняя изоляция, так как при наружном коронировании

разрушающему действию короны подвергаются только наружные слои изоляции. Более опасным является наличие местных скользящих разрядов в виде искр. Последние, помимо того что их наличие связано с появлением большого количества тепла, могут механически разрушать (расщеплять) слюду. Специальные исследования показали, что при искре длиной более 0,5 мм, скользящей по поверхности, разряды легко расщепляют слюду и тем самым ее разрушают.

В низковольтных машинах, где напряженность электрического поля в изоляции мала, процессы электрического старения практически не имеют места.

При нагревании органических материалов в них происходят необратимые процессы теплового старения, приводящие в первую очередь к потере эластичности и понижению механической прочности материала. При значительном тепловом старении органических материалов наблюдается и ухудшение диэлектрических свойств.

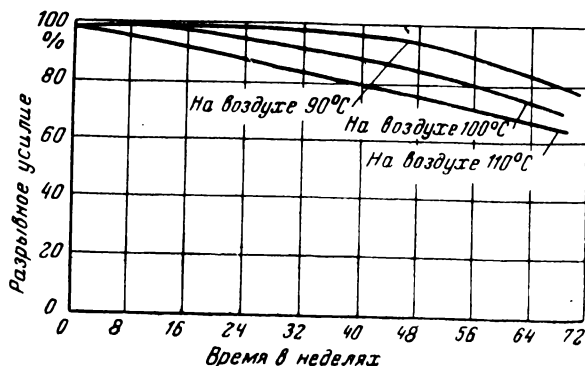
Многочисленные экспериментальные исследования теплового старения различных органических материалов показали, что степень теплового разрушения этих материалов зависит в основном от температуры и времени, в течение которого данный материал находится под воздействием нагрева. Кроме того, на скорость теплового старения органических материалов оказывают влияние и такие факторы, как процентное содержание кислорода в воздухе, давление воздуха, кратность обмена воздуха, в котором находится нагреваемый материал, наличие металлов, которые могут каталитически действовать на процессы старения, влажность атмосферы и др.

Большинство исследователей, занимавшихся изучением теплового старения пропитанных волокнистых органических материалов, определяли снижение механической прочности материала на разрыв и относительное удлинение у образцов, выдерживаемых в термостате при различных температурах, и на основании полученных экспериментальных данных пытались установить срок жизни материала при определенной температуре.

На фиг. 6,1 дана зависимость механической прочности латекса от времени воздействия на нее нагрева при 90°, 100° и 110° С. Из этих кривых следует, что при воздействии на латекс нагрева при 110° С в течение 60 недель ее механическая прочность на разрыв снижается почти на 40%.

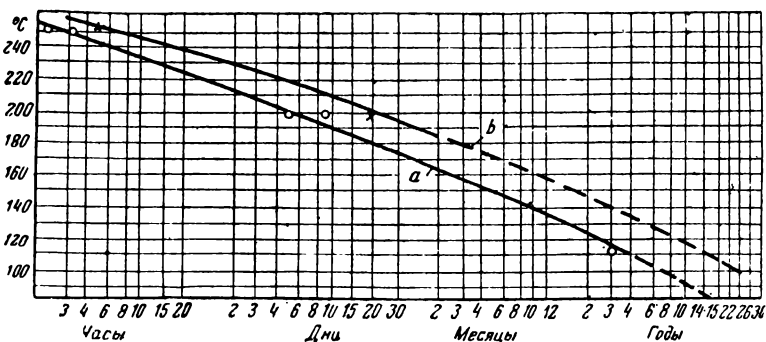
На фиг. 6,2 приведены «кривые жизни» изоляции класса А при тепловом старении. Нижняя кривая (а) характеризует состояние изоляции как твердое, хрупкое, но не ломкое; диэлектрические свойства высокие. Верхняя (б) относится к состоянию изоляции, при котором отсутствует достаточная механическая прочность; диэлектрические свойства низкие.

Следует отметить, что большинство исследователей при изучении теплового старения проводили испытания образцов органических материалов, длительно выдерживаемых в тер-



Фиг. 6,1.

мостатах. При таком методе условия теплового старения электроизоляционного материала существенно отличаются от тех, которые имеют место в работающей машине, где электроизоляционные материалы подвергаются комбинированному воздействию нагрева, электрического поля, механических усилий, влаги и т. п. Поэтому заслуживают внимания работы



Фиг. 6,2.

по изучению теплового старения изоляции статорных обмоток маломощных электродвигателей с изоляцией класса А¹. В этих работах статоры испытуемых асинхронных двигателей помещались в термостаты, в которых поддерживались температуры 200°, 160° и 135° С. Для определения момента, когда

² Сборник рефератов и переводов из иностранных журналов. Выпуск I, электрические машины, 1945, ЦБТИЭ.

вследствие теплового старения изоляции статоры становились не пригодными для работы, группы статоров периодически вынимались из термостатов, собирались с остальными частями электродвигателя (ротор, щиты с подшипниками) и подвергались суровому испытанию в работе. При этом электродвигатели работали в течение часа при нагреве, соответствующем полной нагрузке, и при изменении на полной скорости направления вращения через каждые две минуты.

Если при таком испытании электродвигателя не происходило витковых замыканий или же пробоя изоляции обмоток между фазами или на корпус, то такой электродвигатель разбирался и статор возвращался в соответствующий термостат для продолжения испытания до полного износа изоляции.

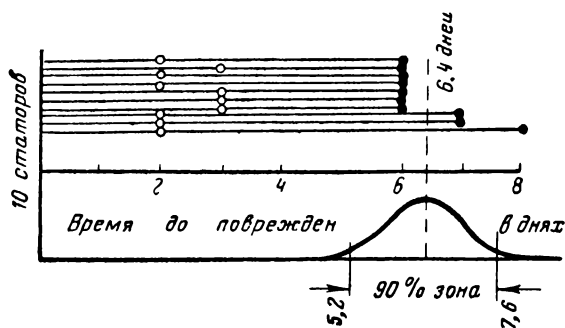
На фиг. 6,3, 6,4 и 6,5 приведены результаты испытаний, полученные при тепловом старении статоров асинхронных электродвигателей при температурах 200, 160 и 135° С (кружок — работа электродвигателей в течение часа без повреждения изоляции; точка — повреждение изоляции во время работы).

На основании статистических данных, полученных при изучении теплового старения асинхронных электродвигателей с изоляцией класса А, может быть построена 90%-ная зона, характеризующая сроки жизни изоляции при разных температурах (фиг. 6,6).

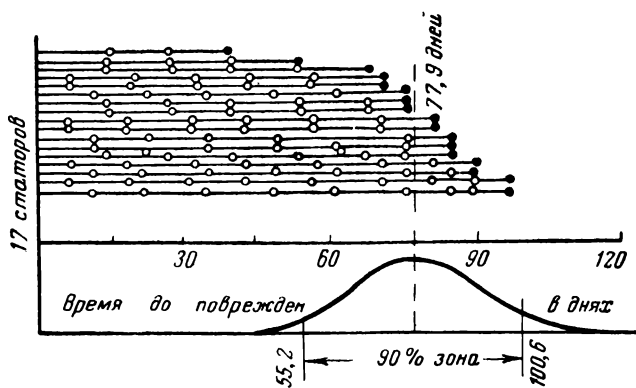
Из фиг. 6,6 следует, что при повышении температуры на 11—11,5° С, время до полного разрушения изоляции электродвигателей с изоляцией класса А сокращается вдвое. Необходимо отметить, что из этих данных нельзя сделать прямых выводов в отношении вероятной жизни изоляции электрических машин, находящихся в эксплуатации, так как при этом испытании отсутствовали другие воздействия на изоляцию, которые имеют место в действительных условиях эксплуатации (влажность, масло, грязь, разные газы, вибрации, переменная нагрузка, изменение окружающей температуры и др.), часть которых способствует увеличению, а часть — уменьшению срока жизни электродвигателя.

При ориентировочных расчетах длительности жизни изоляции машин можно принимать, что повышение рабочей температуры на 10° С, а для очень тяжелых условий работы на 8° С сокращает срок жизни изоляции вдвое (так называемое правило десяти или восьми градусов). В значительно меньшей степени изучено тепловое старение изоляции класса В, основой которой являются такие неорганические материалы, как слюда, асбест, стекловолокно.

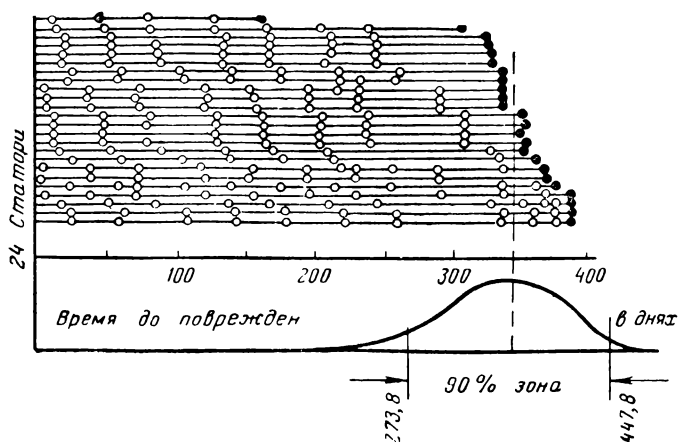
В этом случае срок жизни изоляции при повышенных температурах определяется в основном нагревостойкостью связующих и скрепляющих органических материалов, а также их процентным содержанием.



Фиг. 6,3.



Фиг. 6,4.



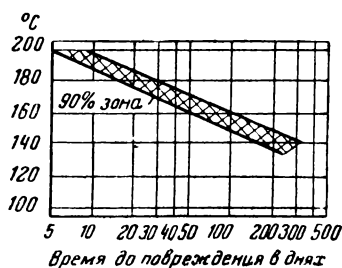
Фиг. 6,5.

Так, micaфольевая изоляция, в состав которой, кроме слюды, входит 25—35% шеллака и 15—20% бумаги, будет иметь значительно больший тепловой износ при данной температуре, чем, например, micaнитовая изоляция, содержащая 15—20% теплостойкого глифталевого лака.

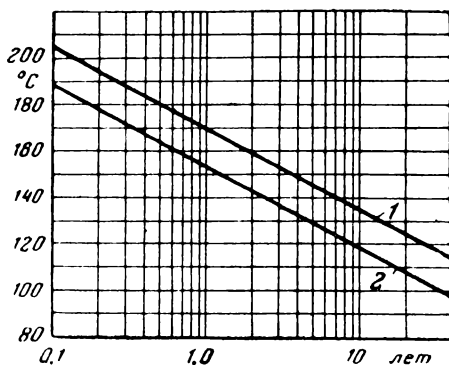
По имеющимся данным зона полного разрушения изоляции класса В при температурах выше 100—110°С имеет тот же характер, что и для изоляции класса А, но сдвинута на +20°С.

На фиг. 6,7 приведена зона, характеризующая «время жизни» изоляции класса В (1 — максимальные, 2 — минимальные значения времени жизни изоляции).

Более точный расчет допустимой температуры для машин, работающих при кратковременном или



Фиг. 6,6.



Фиг. 6,7.

кратковременноповторном режиме, может быть произведен, если известен график нагрузки машины, а также кривая жизни изоляции. Принимая скорость разрушения изоляции при температуре обмотки, определяемой нормами за единицу, можно найти относительную скорость разрушения изоляции при другой температуре, отличающейся от рекомендованной на $\pm \tau$, из формулы

$$R = e^{\pm \alpha \tau}, \quad (6,1)$$

где коэффициент α зависит от класса изоляции. Для изоляции класса А коэффициент α близок к 0,08.

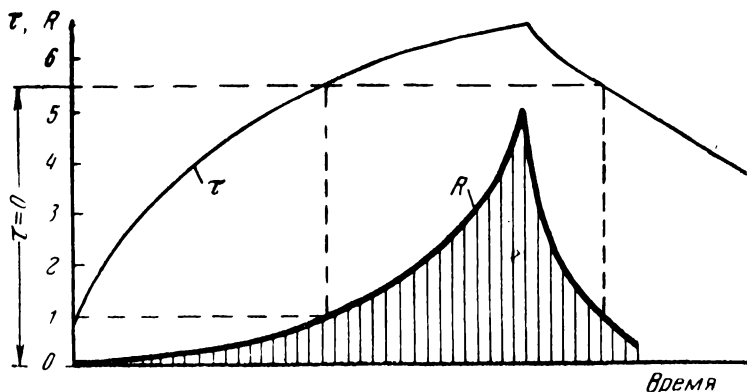
Зная скорость разрушения изоляции при данной температуре, можно определить общий тепловой износ изоляции за время t :

$$Z = \int_0^t R dt = \int_0^t e^{\pm \alpha \tau} dt. \quad (6,2)$$

Если температура обмотки электрической машины будет изменяться по некоторой кривой, то относительная скорость

разрушения изоляции из-за температурного старения будет иметь вид, представленный на фиг. 6,8, а тепловой износ изоляции определится заштрихованной площадью между кривой R и горизонтальной осью.

Приведенный выше принцип расчета теплового износа изоляции позволяет ориентировочно установить допустимые перегревы обмоток электрических машин, работающих в условиях кратковременного и кратковременноповторного режима, при заданном графике нагрузки.



Фиг. 6,8.

Как уже указывалось выше, при нахождении электрических машин во влаге наблюдается снижение общего сопротивления изоляции машины относительно корпуса из-за отсыревания изоляции. При этом также увеличиваются диэлектрические потери и несколько снижается пробивная прочность. Отсыревание изоляции электрических машин представляет собой сложный процесс, при котором влага, находящаяся в воздухе, абсорбируется поверхностью изоляции (поверхностное отсыревание), а также проникает в глубь изоляции, располагаясь в макроскопических, микроскопических и субмикроскопических порах (объемное отсыревание).

Следует отметить, что процесс отсыревания изоляции электрических машин является в основном обратимым процессом, так как при нагревании влага удаляется из изоляции, которая практически восстанавливает свои первоначальные свойства.

Однако при многократном отсыревании изоляции электрических машин и последующей интенсивной сушке наблюдается некоторое снижение влагостойкости из-за увеличения пористости изоляции. Поэтому не следует форсировать сушку изоляции сильно отсыревших машин. Восстановление влагостойкости изоляции может быть произведено путем сушки и последующей пропитки и лакировки изоляции обмоток.

Попадание грязи и пыли на поверхность изоляции приводит к снижению поверхностного сопротивления изоляции, а значит, и общего сопротивления изоляции машины. При сильном загрязнении поверхности изоляции возможны даже поверхностные разряды, особенно у высоковольтных машин, которые могут привести к разрушению изоляции и выходу машины из строя.

Минеральное масло и смазка, попадая на изоляцию, разрушают немаслостойкие составные части изоляции (битумные лаки и компаунды и др.).

Особенно сильно разрушают волокнистую целлюлозную изоляцию кислоты и щелочи. Поэтому машины, изоляция которых состоит из целлюлозных волокнистых материалов (электрокартон, лакоткани и др.), попадая в условия, когда их изоляция подвергается воздействию кислот и особенно щелочей, быстро выходят из строя.

6.3. Сушка изоляции электрических машин в условиях эксплуатации

При транспортировке электрических машин от завода-изготовителя к месту установки, при их хранении, а также при монтаже, происходит увлажнение изоляции, в результате чего ее диэлектрические свойства ухудшаются.

Для низковольтных машин некоторое снижение электрической прочности изоляции из-за отсыревания не опасно, так как эти машины имеют достаточный запас электрической прочности по отношению к рабочему напряжению и пробой несколько отсыревшей изоляции при напряжениях 220—500 в мало вероятен. Поэтому низковольтные машины, если только они не очень сильно отсырели, можно приключать к рабочему напряжению без предварительной подсушки. Что касается высоковольтных машин и особенно турбогенераторов, то их изоляцию необходимо хорошо высушивать перед приключением к напряжению, так как приключению машины с отсыревшей изоляцией к рабочему напряжению без предварительной сушки может привести к пробое. Сушку высоковольтных машин после монтажа или же длительной остановки необходимо производить даже в тех случаях, когда сопротивление изоляции обмоток по отношению к корпусу оказывается достаточно высоким. Перед сушкой машины поверхность изоляции должна быть тщательно очищена от пыли и грязи.

Нагрев машины не должен производиться слишком быстро особенно при нагреве током, так как при этом возможны местные перегревы, которые могут вызвать механические напряжения в изоляции, слишком интенсивное парообразование и

образование повышенного давления внутри изоляции, а также тепловое старение органической части изоляции.

При сушке изоляции машины необходимо тщательно контролировать температуру в наиболее горячих местах. Не следует допускать в отдельных местах температур выше 120—130° С, особенно для компаундированной изоляции. Для удаления влаги, выделяющейся при сушке изоляции машины, необходимо обеспечить соответствующую циркуляцию и обмен воздуха.

Уменьшение тепловых потерь машин, подвергаемых сушке, достигается соответствующей теплоизоляцией.

Наибольший практический интерес представляет сушка неподвижных машин.

При сушке синхронных машин могут быть применены следующие методы нагрева:

1. Питание обмотки статора или ротора постоянным током. Сушка синхронных машин постоянным током может производиться при вставленном роторе. Если при этом ротор питается постоянным током, то вращать его нельзя. При этом способе сушки необходимо принимать меры, предупреждающие разрыв питающей цепи, во избежание опасных перенапряжений.

2. Питание обмотки статора переменным током. Если ротор вынут, то статор можно питать трехфазным током. При вставленном роторе обмотки статора должны быть соединены последовательно в разомкнутый треугольник. Напряжение источника питания должно быть выбрано с таким расчетом, чтобы по обмоткам статора протекал ток, равный 50—70% от нормального.

3. Нагрев ротора за счет потерь в стали. При этом способе к обмотке статора подводится трехфазное пониженное напряжение. Возникающее в статоре вращающееся магнитное поле вызовет в роторных контурах потери, нагревающие ротор. Для машин, имеющих проволочные бандажы на роторе, этот метод применять нельзя.

4. Сушка потерями в стали статора. Этот способ, предложенный И. А. Сыромятниковым, для сушки генераторов переменного тока находит все большее применение. Нагрев машины в этом случае осуществляется путем создания магнитного потока в спинке статора. Сушка может производиться как с вставленным ротором, так и без него.

Для создания магнитного потока может быть использован и ротор. В этом случае напряжение подается на концы вала, который служит витком. Измерение сопротивления изоляции обмотки при сушке потерями в стали статора может производиться без снятия напряжения с намагничивающей обмотки, так как в этом случае в обмотке статора не будет наводиться э. д. с.

При сушке синхронной машины с вставленным ротором одновременно со статором будет сушиться и ротор.

5. Сушка током короткого замыкания. В этом случае три фазы статора замыкаются накоротко через амперметр. Затем машина приводится в медленное вращение и к ротору подводится постоянное напряжение от постороннего источника. Возбуждение машины регулируется таким образом, чтобы получить необходимый нагрев обмотки статора.

6. Сушка внешним нагревом. При этом могут быть использованы инфракрасные лампы, нагревательные элементы и др.

В турбогенераторах сушка изоляции может производиться за счет вентиляционных потерь. Однако этот метод имеет ряд недостатков и поэтому не может быть рекомендован.

При сушке асинхронных двигателей могут быть применены следующие методы: питание обмоток статора постоянным или переменным током, сушка потерями в стали статора и внешними источниками нагрева. При приключении статора к переменному напряжению ротор затормаживается, и если он фазный, то в его цепь включается реостат для регулировки тока статора.

Для сушки машин постоянного тока могут быть использованы следующие методы: сушка током короткого замыкания, сушка от посторонних источников тока и сушка внешним нагревом.

Контроль состояния изоляции можно производить по изменению сопротивления во времени. В этом случае сушка должна продолжаться до тех пор пока при данной неизменной температуре сопротивление изоляции не установится на некоторой постоянной величине. В последнее время для контроля состояния изоляции при его сушке применяется измерение сопротивления изоляции в зависимости от времени приложения напряжения. При этом определяется коэффициент

$$k = \frac{R_2 - R_1}{R_1}, \quad (6,3)$$

где k — коэффициент, характеризующий степень увлажнения обмотки;

R_1 — сопротивление изоляции машины, замеренное через небольшой промежуток с момента приключения обмотки к напряжению (15—60 сек.);

R_2 — сопротивление изоляции машины, замеренное через более значительный промежуток, чем R_1 , когда его величина практически устанавливается (60—600 сек.).

Для отсыревшей изоляции значение коэффициента k близко к нулю. При сушке изоляции значение k возрастает до 1,8—2,0 и выше.

При контроле состояния изоляции машин при сушке могут быть также использованы зависимости емкости от температуры и от частоты.

6.4. Профилактические ремонты изоляции

Для того, чтобы обеспечить длительную работу электрических машин в условиях эксплуатации, необходимо следить за состоянием изоляции и принимать своевременные меры по ее восстановлению.

Для установления состояния изоляции электрических машин в настоящее время применяются специальные профилактические испытания (см. § 6,5).

При текущем профилактическом ремонте электрических машин должна производиться очистка поверхности изоляции, а также, если это необходимо, лакировка.

При капитальном ремонте турбогенераторов (который обычно производится 1 раз в год) правилами технической эксплуатации МЭС предусмотрен следующий объем работ:

а) Осмотр состояния обмотки статора, ротора и возбуждателя.

б) Ликвидация ослаблений крепления обмотки в пазовой и лобовой части.

в) Восстановление изоляции стягивающих болтов, если она нарушена.

г) Восстановление всех замеченных повреждений изоляции статора и ротора.

д) Очистка воздушных каналов, а также лобовых частей от пыли сжатым воздухом давлением 2 ат.

е) Удаление приставшей грязи и масла с помощью тряпки, смоченной в бензине.

ж) Покрытие лобовых частей статорной обмотки покровным лаком или пигментированной эмалью. Следует иметь в виду, что при каждой лакировке слой покровного лака утолщается, что ухудшает охлаждение лобовых частей обмотки. Кроме того, толстый лаковый слой неэластичен и легко трескается.

Периодическая лакировка обмоток должна также производиться у машин, работающих в сырых помещениях и на химических производствах.

6.5. Профилактические испытания изоляции электрических машин в условиях эксплуатации

Для того, чтобы не допустить аварии машины по вине изоляции, необходимо систематически контролировать ее состояние.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует универсальный и вполне надежный метод контроля изоляции

электрических машин в условиях эксплуатации, позволяющий достаточно точно определить состояние изоляции и степень ее надежности. Поэтому приходится производить оценку изоляции по комплексу испытаний.

В этом отношении крайне необходимы серьезные научно-исследовательские работы как по глубокому изучению процессов старения изоляции электрических машин, работающих в различных условиях эксплуатации, так и по разработке объективного метода, позволяющего определить в каждом отдельном случае истинное состояние изоляции машины, находящейся в эксплуатации.

Вместе с тем в настоящее время уже имеется ряд методов, позволяющих получить некоторое суждение о состоянии изоляции. Приводим краткое описание этих методов, применяющихся при профилактических испытаниях, а также их оценку.

а) Измерение сопротивления изоляции

Нами уже было показано, что величина сопротивления изоляции не может служить сколько-нибудь надежным критерием для оценки состояния изоляции, так как даже при наличии в машине значительных механических повреждений (трещин, проколов и т. п.) сопротивление изоляции может иметь весьма высокое значение. С другой стороны, загрязнения или отсыревание поверхности изоляции, вполне допустимые с точки зрения надежности основной изоляции машины, приводят к значительному снижению величины сопротивления изоляции. В этом случае оценка общего состояния изоляции машины по величине сопротивления изоляции приведет к неправильным выводам, как это часто и бывает.

Однако высказанное нами мнение о малой ценности метода контроля состояния изоляции машины по величине сопротивления не означает, что в настоящее время этот метод должен быть полностью отброшен, так как в ряде случаев он позволяет обнаружить грубые дефекты в изоляции. Этот метод должен оставаться как контрольный перед включением машины в работу для проверки отсутствия каких-либо дефектов, приводящих к резкому снижению величины сопротивления.

б) Испытание изоляции повышенным переменным напряжением

Из всех существующих методов только испытание изоляции повышенным напряжением позволяет установить наличие необходимого запаса электрической прочности изоляции у испытываемой машины.

В самом деле, прикладывая к испытываемой изоляции напряжение, превышающее рабочее в n раз, мы можем утверждать,

что если это испытание машина выдержала, то она при данном состоянии изоляции имеет по крайней мере n -кратный запас электрической прочности по отношению к рабочему.

Вместе с тем испытание изоляции машины повышенным напряжением не позволяет получить какой-либо количественной оценки, характеризующей общее состояние изоляции. Кроме того, приложение к испытываемой изоляции повышенных по сравнению с рабочим напряжений может вызвать в ней необратимые процессы, приводящие к ухудшению ее основных свойств.

Одним из основных моментов, определяющих, с одной стороны, эффективность испытания повышенным напряжением, а с другой — степень ослабления изоляции при этом испытании, является правильный выбор величины испытательного напряжения. По этому вопросу в настоящее время нет единого мнения.

Согласно инструкции МЭС при испытании электрической прочности изоляции высоковольтных обмоток после капитального ремонта без полной (или частичной) замены обмотки применяется напряжение, равное $1,0 \div 1,3$ от номинального (линейного).

Б. Н. Каноныкин, исходя из величины перенапряжений, которые могут возникать в обмотках электрических машин в условиях эксплуатации, рекомендует при профилактическом испытании в холодном состоянии применять напряжение $1,65 U_n$, а в нагретом состоянии $1,5 U_n$.

М. В. Хомяков¹ предлагает дифференцировать величину испытательного напряжения в зависимости от условий работы машины. Другие авторы предлагают производить дифференциацию в зависимости от срока работы машины в эксплуатации. Г. И. Лысаковский, исходя из величины вероятных перенапряжений и изменения электрической прочности по мере развития дефектов, а также соотношения между значениями электрической прочности при различных видах перенапряжений, предлагает производить эксплуатационные испытания машин напряжением, равным $(1,5 \div 1,75) U_n$. Для изношенной изоляции им предлагается испытание постоянным током напряжением $(2,0 \div 2,5) U_n$. За границей при профилактических испытаниях изоляции применяются напряжения, равные $(1 \div 1,5) U_n$.

По нашему мнению, при установлении величины испытательных напряжений должны учитываться следующие моменты:

1) Величина и длительность перенапряжений, которые могут возникать в обмотке испытываемой машины, а также их ко-

¹ См. „Электричество“, 1948 г., № 2, стр. 79—80.

личество. Для машин, у которых мало вероятны сколько-нибудь значительные перенапряжения, не следует применять слишком высоких испытательных напряжений. В тех же случаях, когда изоляция машин может подвергаться воздействию значительных перенапряжений (например, машины, соединенные с воздушной сетью), следует соответственно повысить величину испытательного напряжения.

2) *Степень стойкости изоляции машины к воздействию повышенных напряжений.* Для машин с непрерывной микалентной компаундированной изоляцией можно допускать более высокие испытательные напряжения, чем для микафолиевой или лакотканевой, так как имеющиеся данные опытов, по искусственному старению микалентной компаундированной изоляции, проведенных на ХЭМЗ и на заводе «Электросила», показывают, что при двухсуточном воздействии двойного рабочего напряжения при температуре 100°C не наблюдается заметного ухудшения диэлектрических свойств микалентной изоляции. С другой стороны, воздействие повышенных напряжений на лакотканевую изоляцию, а также микафолиевую, содержащую шеллак, вызывает в ней заметные ухудшения.

3) *Общее состояние изоляции.* Как уже указывалось, при работе машины в результате старения изоляции ее свойства ухудшаются и происходит снижение электрической прочности. Поэтому, устанавливая величину испытательного напряжения, следует учитывать степень износа изоляции и допускать более низкие испытательные напряжения для сильно изношенной изоляции.

4) *Соотношение между значениями электрической прочности при испытании, а также при работе машины в условиях эксплуатации.* При этом должны быть учтены различия в температуре, роде тока, длительности приложения напряжения, распределении напряжения по толще изоляции, вдоль обмотки и др.

По нашему мнению, для большинства высоковольтных машин, находящихся в эксплуатации, величина испытательного напряжения должна лежать в пределах от 1,5 до 1,7 U_n . Что касается низковольтных машин, то вопрос о проверке состояния их изоляции в условиях эксплуатации повышенным напряжением требует изучения и соответствующего обоснования, так как по этому вопросу в настоящее время отсутствуют достаточные данные.

в) Определение тангенса угла диэлектрических потерь

Имеющиеся в настоящее время данные по замеру, в течение длительного времени, величины диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) в высоковольтных машинах показывают, что первоначальные надежды, которые возлагались на эту характеристику, не оправдались.

Теперь уже почти нет сомнений в том, что величина диэлектрических потерь не может в должной степени характеризовать общее состояние и надежность изоляции высоковольтной машины. В самом деле: для подавляющего большинства машин, у которых производился замер диэлектрических потерь, $\operatorname{tg} \delta$ со временем уменьшается или остается практически неизменным. В то же время в изоляции неизбежно происходят необратимые процессы старения, которые приводят к общему ухудшению ее состояния. Этот процесс общего ухудшения состояния изоляции, как правило, не сопровождается соответствующим изменением $\operatorname{tg} \delta$.

Однако, нам кажется было бы преждевременным полностью отказаться от замеров $\operatorname{tg} \delta$ у работающих машин. Наиболее ценной является зависимость от напряжения, так как она позволяет установить величину напряжения, при котором происходит ионизация воздушных зазоров.

г) Испытание изоляции витков

Применяемое в эксплуатации испытание витковой изоляции путем повышения напряжения до 1,3 номинального в течение 5 мин. следует признать ничего не дающим, если учесть, что любое коммутационное перенапряжение, а тем более атмосферное, создает между витками напряжение, превосходящее рабочее в десятки и даже сотни раз.

Кроме перечисленных выше методов, применение которых узаконено определенными нормами (в СССР инструкциями МЭС) и которые уже сравнительно давно применяются в энергосистемах, в последнее время внедряются новые методы профилактических испытаний электрических машин, представляющие собой несомненный интерес.

К числу таких методов относятся:

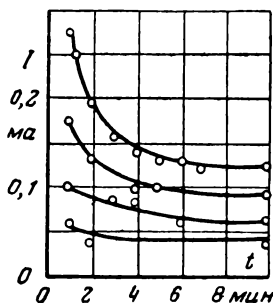
1) Испытание повышенным выпрямленным напряжением. При этом испытании напряжение, подаваемое от выпрямительной установки на обмотку, постепенно повышается до испытательного и выдерживается 10 мин., причем каждую минуту записывается показание последовательно включенного микроамперметра. Характер изменения тока от напряжения, а также отсутствие признаков пробоя изоляции при испытательном напряжении служат критерием оценки состояния изоляции.

Необходимость 10-минутной выдержки напряжения вызвана тем обстоятельством, что ток, протекающий через изоляцию при определенной величине приложенного напряжения, устанавливается не сразу, а вследствие явлений абсорбции обычно через 8—10 мин. (фиг. 6,9).

При наличии в испытываемой изоляции дефектных мест, а также при общем ослаблении изоляции (например, вслед-

ствие отсыревания), возрастание показания микроамперметра при повышении напряжения будет происходить не пропорционально напряжению. Чувствительность этого метода испытания к местным дефектам может быть объяснена следующим образом. При постоянном напряжении токи утечки в здоровой изоляции очень малы, и поэтому они не вызывают заметного нагревания изоляции. Вместе с тем токи утечки в дефектном месте будут вызывать местный нагрев, а это в свою очередь вызовет рост тока по экспоненциальному закону, с соответствующим дальнейшим нагревом дефектного места. При этом токи утечки через дефектное место могут возрасти во много раз даже при небольшом повышении температуры. Токи утечки через дефектное место, накладываясь на токи утечки здоровой части испытуемой изоляции, могут заметно увеличить суммарный ток, измеряемый микроамперметром.

Следует отметить, что при испытании изоляции переменным напряжением активный ток через изоляцию во много раз больше сквозного тока при постоянном напряжении. Поэтому даже при значительном росте активного тока через дефектное место возрастание суммарного тока будет мало заметно.



Фиг. 6,9.

Испытание повышенным выпрямленным напряжением имеет следующие преимущества по сравнению с испытанием повышенным переменным напряжением:

1) В испытуемой изоляции при постоянном напряжении отсутствуют диэлектрические потери, которые возникают при переменном напряжении и нагревают изоляцию, вызывая в ней необратимые процессы старения.

2) Появление объемных зарядов в воздушных включениях устраняет начавшуюся ионизацию, а значит, и опасность ее воздействия на испытуемую изоляцию.

3) Испытание постоянным током позволяет выявить местные дефекты.

4) При испытании изоляции постоянным током нет необходимости в тяжелой аппаратуре (трансформаторе, регуляторе напряжения и др.), которая необходима при испытании переменным током.

5) Возможность при испытании изоляции постоянным напряжением снять кривые абсорбции, характер которых позволяет установить общее состояние изоляции и в первую очередь степень ее увлажнения.

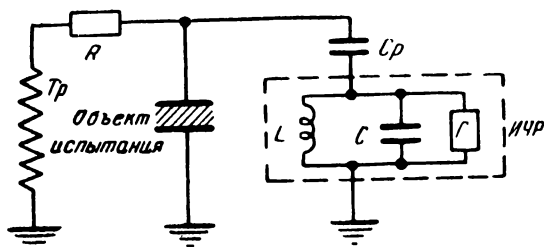
При установлении величины испытательного выпрямленного напряжения следует иметь в виду распределение напря-

жения по толщине изоляции, а также степень воздействия его на изоляцию. Поэтому для миканитовой изоляции, у которой кратность пробивного напряжения при постоянном токе по отношению к эффективному значению переменного тока составляет около двух (при односторонней выдержке), следует применять напряжение не менее двухкратного от испытательного напряжения при переменном токе. По нашему мнению, до получения достаточно обоснованных данных при испытании изоляции электрических машин выпрямленным напряжением следует применять напряжения от 3,0 до 3,7-кратные к номинальному.

Испытание выпрямленным напряжением не исключает другие методы профилактических испытаний электрических машин, а только дополняет их.

Применение индикатора частичных разрядов. Существующие методы испытаний не позволяют выявить частичные разряды, происходящие в дефектной изоляции.

Применение индикатора частичных разрядов (ИЧР) может оказать существенную помощь в установлении состояния изоляции высоковольтных машин, находящихся в эксплуатации. Принципиальная схема включения ИЧР показана на фиг. 6,10, где C_p — разделительный конденсатор; L — индук-

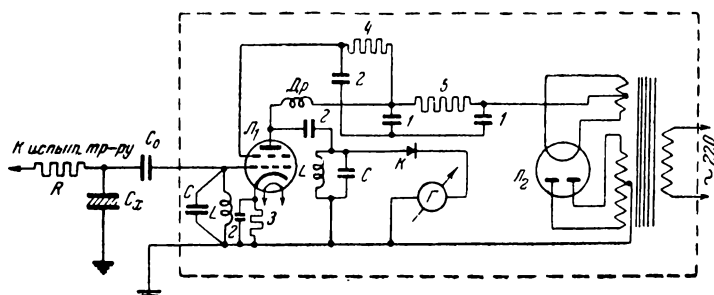


Фиг. 6,10.

тивность; C — емкость; Γ — гальванометр с твердым выпрямителем; R — сопротивление. При наличии в испытуемой изоляции местных несквозных дефектов, например воздушных включений, в них будут возникать местные разряды при напряженности электрического поля, превосходящей электрическую прочность дефектных мест. Если с целью, в которой возникают частичные разряды, связан колебательный контур, то резкие изменения режима испытательной цепи в моменты разрядов вызовут в контуре высокочастотные колебания с частотой

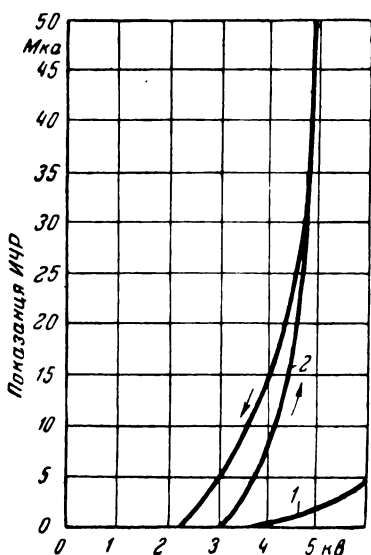
$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_0)}} \quad (6,4)$$

Применив усилительную и одновременно выпрямительную схему с электронными лампами, можно не только обнаружить наличие частичных разрядов, но и установить их интенсив-



Фиг. 6,11.

ность. Схема индикатора частичных разрядов, разработанного в лаборатории им. проф. Смурова, показана на фиг 6,11.



Фиг. 6,12.

Основным элементом ИЧР является колебательный контур LC , соединенный с испытуемой изоляцией через разделительный конденсатор C_0 . Возникающие в этом контуре колебания при частичных разрядах подаются на сетку усилительной лампы L_1 , в анодную цепь которой включен дроссель $Др$. Падение напряжения на этом дросселе подается на второй колебательный контур LC , аналогичный первому. Параллельно второму контуру через купроксный или селеновый выпрямитель включен гальванометр $Г$, по отклонению стрелки которого судят о наличии разрядов в изоляции и их интенсивности. (Остальные обозначения: C_x — испытуемая машина; 1, 2 — C_x конденсаторы;

3, 4, 5 — омические сопротивления; L_2 — кенотрон.)

На фиг. 6,12 приведены кривые, характеризующие зависимость отклонения прибора ИЧР от величины приложенного напряжения для электродвигателей напряжением 3,15 кВ с разным состоянием изоляции. Из рассмотрения кривых видно,

что у двигателей с нормальной изоляцией (1) не наблюдается заметного роста показаний ИЧР от напряжения, в то время как у дефектных имеется значительная зависимость отклонения гальванометра при напряжениях до 4,5 кв (2).

При оценке результатов испытаний ИЧР необходимо учитывать схему испытаний, температуру, влажность и др.

Отмечая несомненную ценность ИЧР, позволяющего оказать существенную помощь в определении как местных, так и общих ухудшений изоляции электрических машин в начальной стадии их развития, вместе с тем нельзя считать, что этот метод является универсальным, исключаящим другие методы испытаний. По нашему мнению, ИЧР должен являться весьма полезным дополнением к другим методам профилактических испытаний изоляции высоковольтных машин.

Абсорбционное испытание. Как уже указывалось, характер абсорбционных кривых дает возможность судить о степени отсыревания изоляции электромашин. Этот метод особенно ценен при оценке состояния машин, находившихся длительное время в нерабочем состоянии. В этом случае всегда вероятно увлажнение изоляции, и для того, чтобы найти степень отсыревания изоляции, следует определить характер абсорбционных токов. Это испытание следует производить следующим образом. К испытуемой обмотке прикладывается постоянное напряжение и через 15-секундные интервалы в первую минуту, через минутные интервалы в последующие минуты вплоть до 10 мин. производится измерение тока абсорбции, протекающего через изоляцию машины.

Если наблюдается малая зависимость сопротивления изоляции от времени приложения напряжения, то изоляция, отсырела, и наоборот.

Испытание импульсами. В настоящее время практически отсутствуют надежные методы контроля состояния витковой изоляции у машин, находящихся в эксплуатации.

Поэтому следует рекомендовать применение при профилактических испытаниях машин импульсных испытаний. Описание этого метода, а также применяемой аппаратуры дано в § 5,6.

д) Периодичность испытаний электромашин. Весьма важно установить в каждом отдельном случае периодичность испытаний изоляции электрических машин, находящихся в эксплуатации. По этому вопросу пока не существует общих единых норм.

Согласно эксплуатационному циркуляру № Э-25 Министерства электростанций СССР для электрооборудования станций и подстанций установлены следующие нормы испытаний изоляции электромашин.

1. Синхронные генераторы (компенсаторы). Профилактические испытания в процессе эксплуатации;

а) Дистанционные измерения сопротивления изоляции цепей возбуждения — 1 раз в смену.

б) Измерение сопротивления изоляции обмоток статора, ротора и цепей возбуждения — перед каждым пуском и после каждой остановки (для пиковых станций 2 раза в месяц).

Испытания при капитальном ремонте:

а) Испытание повышенным напряжением переменного тока главной изоляции статора и изоляции обмоток возбуждателя.

б) Измерение сопротивления изоляции всех обмоток, термодетекторов и подстудовой изоляции подшипников.

в) Измерение угла диэлектрических потерь обмотки статора (необязательно).

г) Измерение сопротивления изоляции цепей возбуждения (на ходу).

д) Испытание повышенным напряжением витковой изоляции статора.

2. Двигатели собственного расхода электростанций и двигатели-генераторы. Профилактические испытания в процессе эксплуатации: измерение сопротивления изоляции обмоток двигателей и двигателей-генераторов — при текущих ремонтах.

Испытания при капитальном ремонте:

а) Измерение сопротивления изоляции обмоток двигателя,

б) Испытание изоляции обмоток повышенным напряжением.

Следует устанавливать периодичность испытаний электрических машин, находящихся в эксплуатации, в зависимости от срока службы машины, а также от общего состояния изоляции. Так, для машин, работающих в тяжелых условиях и имеющих сильно изношенную изоляцию, необходимы более частые испытания изоляции, и наоборот.

6.6. Болезни и аварии электрических машин по вине изоляции

Современная статистика аварий электрических машин показывает, что число аварий по вине изоляции очень велико. Это может быть объяснено двумя основными причинами:

1) недостаточно высоким качеством изоляции;

2) неправильной эксплуатацией машин.

К числу наиболее характерных болезней и аварий электрических машин по вине изоляции относятся:

1. Форсированное старение изоляции. Это наиболее распространенная причина, вызывающая разрушение изоляции, потерю эластичности и механической прочности, что приводит к появлению трещин, надрывов и тому подобных дефектов и в конечном счете к преждевременному выходу изоляции из строя.

Основной причиной форсированного старения изоляции является превышение температуры выше допустимой для данного класса изоляции. В высоковольтных машинах, кроме

теплового старения, может иметь место также и электрическое старение, вызванное продуктами ионизации (электрической короны).

Так как процессы теплового и электрического старения являются в основном необратимыми, то восстановление изоляции, разрушенной в результате форсированного старения, невозможно. Такая изоляция должна быть заменена новой. Поэтому в условиях эксплуатации нельзя допускать таких режимов работы, которые приводят к превышениям температур выше допустимых для данного класса изоляции.

Внешними признаками старения изоляции являются:

а) *следы высоких температур*: потемнение светлых материалов, потускнение лака, хрупкость, разрушение хлопчатобумажной ленты, электрокартона и тому подобных материалов, местное вытекание лака или компаунда, появление листов слюды, наличие на поверхности изоляции трещин и, наконец, полное местное разрушение изоляции с признаками обугливания;

б) *разрушение изоляции электрическими разрядами*, часто наблюдаемое у высоковольтных машин старых конструкций (протяжная обмотка, гильзовая микафолиевая изоляция с гильзой из электрокартона или лентероида в пазу статора);

в) *разбухание изоляции* особенно в вентиляционных каналах, местах выхода обмотки из паза и в лобовых частях.

2. *Механические повреждения изоляции*. Эти повреждения могут быть вызваны: неосторожной работой при сборке, ремонтах и ревизиях машины, сильными толчками и вибрациями, ненормально большими токами в обмотках (внезапные короткие замыкания турбогенераторов, пусковые токи электродвигателей), резкими изменениями температуры и др.

По своему характеру механические повреждения могут быть внешними, затрагивающими только верхние слои изоляции, и общими, когда они затрагивают и основную часть изоляции машины. Внешние механические повреждения обычно не ослабляют основной изоляции и должны устраняться при очередных ревизиях и осмотрах машин. Общие повреждения изоляции, вызывающие появление глубоких трещин и разрывов, могут привести к пробое изоляции и выходу машины из строя.

Наиболее часто трещины в изоляции появляются в месте выхода обмотки из пазов. Такие трещины являются весьма опасными и обычно приводят к пробое изоляции. При обнаружении глубоких трещин в местах выхода из паза необходима немедленная замена поврежденной части обмотки. Появление трещин в некотором отдалении от активной стали и в лобовых частях обмотки менее опасно, если расстояние тре-

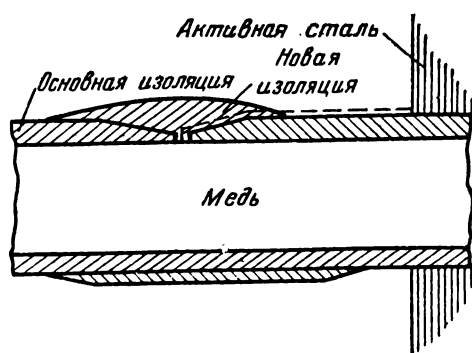
шины от заземленных частей достаточно велико для того, чтобы вызвать пробой или перекрытие.

В высоковольтных машинах наличие трещин, удаленных от активной стали на расстояние

$$L \geq 10 + \frac{U_n}{200} [\text{мм}] \quad (6,5)$$

(где U_n — номинальное напряжение машины в в), может не потребовать замены поврежденного элемента обмотки. В этом случае изоляция в районе трещины должна быть срезана на конус, как это показано на фиг. 6,13, и поврежденное место тщательно заизолировано несколькими слоями микаленты или лакотканевой (лучше черной) ленты, а затем сверху одним слоем хлопчатобумажной ленты, и залакировано. Однако следует иметь в виду, что изолированное таким образом место не равноценно целому, и поэтому за ним должно вестись систематическое наблюдение.

3. Ослабление крепления обмотки из-за усыхания изоляции. Обмотка должна быть плотно и прочно



Фиг. 6,13.

закреплена как в пазах, так и в лобовых частях. При длительной работе машины наблюдается ослабление крепления пазовой части обмотки из-за уменьшения размеров пазовых клиньев, прокладок, а также основной изоляции из-за усушки. В этом случае необходимо произвести переклиновку машин.

Ссыхание изоляционных прокладок и распорок в лобовых частях приводит к ослаблению затяжки, что может вызвать нежелательные деформации лобовых частей при аномальных режимах работы машины и появлению трещин и надрывов в изоляции обмотки. Поэтому при ревизиях машин необходимо тщательно проверять состояние крепления и устранять замеченные недостатки. Размер распорки может быть восстановлен дополнительной прокладкой лучше всего из гетинакса.

При ослаблении крепления лобовых частей к бандажным кольцам необходимо проложить в образовавшиеся зазоры изоляционные прокладки из электрокартона, гетинакса или фибры. Следует иметь в виду, что в этом случае недопустима деформация обмотки при подтяжке ее к кольцам, так как это может вызвать появление трещин и пробой изоляции.

4. **Озонирование высоковольтных машин и турбогенераторов.** Наличие озона в охлаждающем воздухе не является признаком аварийного состояния машины, так как современная компаундированная изоляция не разрушается даже при значительных концентрациях озона. Однако в тех случаях, когда обнаружено обильное озонирование высоковольтной машины, следует принять меры для устранения или же ослабления этого явления. В большинстве случаев устранение сильного озонирования возможно путем покрытия мест выхода изоляции из паза полупроводящим слоем (железистой асбестовой лентой или специальным лаком). Следует иметь при этом в виду, что это мероприятие является весьма ответственной операцией и должно производиться по консультации и под наблюдением специалистов.

5. **Витковые замыкания обмотки.** Замыкание витков между собой из-за порчи изоляции является весьма распространенной формой аварии. В обмотках постоянного тока витковые замыкания не вызывают прямой аварии машины. В случае обмоток переменного тока витковые замыкания ведут к появлению значительных токов в короткозамкнутых витках, сильному их нагреву и полному разрушению изоляции, соприкасающийся с нагретыми витками. Обычно витковое замыкание приводит к обугливанию и пробое основной изоляции и выходу машины из строя.

6. **Отсыревание изоляции.** При нахождении машины во влажной атмосфере в нерабочем состоянии происходит отсыревание изоляции. Отсыревшая изоляция должна быть подсушена.

7. **Снижение сопротивления изоляции.** Существует много самых различных причин, приводящих к снижению сопротивления изоляции электрических машин. К числу их относят: отсыревание изоляции, особенно поверхностное, загрязнение изоляции проводящей пылью (например, угольной), сильный нагрев изоляции и др.

Нами уже указывалось, что величина сопротивления изоляции не может служить основным критерием для оценки общего состояния изоляции электрической машины, однако сильное падение сопротивления изоляции машины ниже многолетнего уровня должно привлечь внимание обслуживающего персонала. В этом случае следует установить причины резкого снижения сопротивления изоляции и по возможности устранить их. В большинстве случаев для этого необходимо несколько подсушить изоляцию или же очистить поверхность изоляции от пыли и грязи и перелакировать ее. Если же и в этом случае не удастся повысить сопротивление изоляции машины, то следует привлечь для выявления причин снижения сопротивления изоляции соответствующих специалистов.

8. Повышение диэлектрических потерь в изоляции высоковольтных машин. Если в изоляции машин наблюдается систематическое повышение диэлектрических потерь, то в некоторых случаях это может служить признаком происходящих процессов разрушения изоляции. Вместе с тем небольшие изменения величины диэлектрических потерь в течение определенного промежутка времени не могут служить основанием для суждения о действительном состоянии изоляции. Поэтому при обнаружении систематического роста диэлектрических потерь в изоляции высоковольтных машин такие должны быть взяты на особый учет и за состоянием их изоляции должен быть установлен особый контроль.

9. Разрушение изоляции смазкой. В тех случаях, когда на изоляцию машины попадает минеральное масло или же консистентная смазка наблюдается разрушение изоляции, особенно если она покрыта и пропитана маслостойкими лаками или компаундами. Кроме того, наличие масел на поверхности изоляции способствует оседанию пыли и загрязнению. При обнаружении этого явления необходимо тщательно очистить поверхность изоляции от грязи и масел с помощью чистой тряпки, смоченной в легком бензине, и затем покрыть маслостойким лаком или пигментированной эмалью.

10. Разрушение изоляции кислотами, щелочами, хлором, аммиаком и другими химически активными веществами. При нахождении электрических машин в атмосфере, содержащей пары кислот, щелочей, хлор, аммиак и тому подобные химические вещества наблюдается интенсивное разрушение изоляции, приводящее в конечном счете к выходу машины из строя. В этих случаях необходима полная замена изоляции на химически стойкую.

11. Пробой изоляции обмотки. Электрический пробой изоляции всегда представляет собой тяжелую аварию, немедленно выводящую машину из строя и требующую частичной или полной замены обмотки. Причины пробоя весьма разнообразны. К наиболее распространенным видам пробоя изоляции обмотки относятся:

а) пробой из-за перенапряжений (коммутационных или атмосферных);

б) пробой отсыревшей изоляции;

в) пробой из-за чрезмерных перегревов изоляции;

г) пробой вследствие механического повреждения изоляции;

д) пробой вследствие общего старения изоляции;

е) пробой вследствие попадания в обмотку посторонних предметов (например: куски металла, гайки, болта и т. п.);

ж) пробой вследствие дефектов изоляции;

з) пробой без видимых причин.

6,7. Ремонт и модернизация изоляции электрических машин

Приступая к ремонту изоляции электрической машины, необходимо прежде всего установить причины выхода изоляции из строя с тем, чтобы при ремонте принять соответствующие меры, исключающие возможность повторения аварии по этим же причинам.

Основными причинами преждевременного выхода изоляции электрической машины могут быть:

1. Несоответствие изоляции условиям эксплуатации машины, а именно:

а) недостаточная нагревостойкость изоляции (для машин, работающих в условиях повышенных перегревов обмоток);

б) малая стойкость изоляции к действию озона (для высоковольтных машин);

в) недостаточная механическая прочность изоляции (особенно для машин, работающих на повторнократковременных режимах и реверсах);

г) малая влагостойкость изоляции (для машин, работающих в помещениях с повышенной влажностью);

д) малая стойкость изоляции к действию смазочных масел и эмульсий, применяемым, для охлаждения режущего инструмента (для электродвигателей металлообрабатывающих станков);

е) малая химическая стойкость изоляции (для машин, работающих в химических цехах).

В результате такого несоответствия неизбежен быстрый выход машин из строя.

2. Низкое качество примененных для изоляции электрической машины материалов. В этом случае даже в нормальных условиях эксплуатации вероятен преждевременный выход машины из строя.

3. Неудачная конструкция изоляции электрической машины.

4. Плохое технологическое выполнение изоляции электрической машины (плохая пропитка, механические повреждения изоляции и др.).

5. Неправильная эксплуатация машины. В этом случае выход изоляции из строя возможен даже при ее высоком качестве.

Наличие в настоящее время новых, более совершенных электроизоляционных материалов позволяет при ремонте машины не только восстановить изоляцию на прежнем уровне но и существенно улучшить ее качество, сообразуясь со специфическими условиями эксплуатации машины.

Однако правильный выбор электроизолирующих материалов при ремонтах возможен только при достаточном знании основных свойств этих материалов.

До настоящего времени для изоляции электрических машин применяются следующие материалы:

- 1) хлопчатобумажная пряжа — для изоляции обмоточных проводов;
- 2) лакоткань, лакошелк — для изоляции между обмотками и относительно корпуса;
- 3) электрокартон;
- 4) хлопчатобумажные ленты и т. п.

Все эти материалы обладают сравнительно невысокой нагревостойкостью и влагостойкостью, а также низкой химической стойкостью. Пропитка этих материалов лаками мало защищает их от воздействия тепла, влаги и химических реагентов. Поэтому электрические машины с такой изоляцией, попадая в тяжелые условия эксплуатации, очень быстро выходят из строя.

Микафолий на шеллаке, еще до настоящего времени применяющийся для изоляции высоковольтных обмоток, недостаточно стоек к воздействию электрической короны, а также повышенной температуры и влажности. Поэтому микафолиевая изоляция, особенно если она содержит в себе пустоты, оказывается недостаточно надежной в эксплуатации при напряжениях выше 6 кВ.

В СССР в последние годы появились новые виды электроизолирующих материалов, применение которых позволяет значительно повысить эксплуатационную надежность электрических машин, работающих в условиях, когда их изоляция подвергается воздействию повышенных температур, влажности, активных химических реагентов. К числу таких материалов относятся: стекловолоконные материалы, синтетические пленки, кремнийорганические соединения, винифлекс и др.

Применение при ремонтах новых, более совершенных электроизолирующих материалов позволяет значительно повысить надежность изоляции, а в ряде случаев повысить мощность за счет увеличения коэффициента заполнения пазов или увеличения рабочей температуры.

Приведенные в главах I, II, III и IV данные вполне достаточны для правильного выбора материалов и конструкций изоляции ремонтируемых машин, а также технологии их изоляции и пропитки обмоток.

ЛИТЕРАТУРА

- А. П. Александров и др. Физика диэлектриков, стр. 560, 1932.
- А. Е. Алексеев и М. П. Костенко. Турбогенераторы. Госэнергоиздат, 350 стр., 1939.
- К. А. Андрианов. Новая эмалевая изоляция— винифлекс. „Электричество“, 1945, № 10.
- К. А. Андрианов и др. Винифлекс — новая электрическая изоляция, Госэнергоиздат, 48 стр., 1946.
- К. А. Андрианов. Кремнийорганические высокополимерные соединения. Часть 1. Госэнергоиздат, 92 стр., 1946.
- К. А. Андрианов и др. Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы. „Электричество“, 1946, № 4.
- К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. Кремнийорганические полимерные продукты для промышленности, Часть II. 1946, ЦБТИЭ.
- К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. Об изоляции низковольтных моторов. Бюллетень ВЭИ, 1940,
- К. А. Андрианов, Новые смолы и пластмассы для электрической изоляции. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. 2, 1938.
- К. А. Андрианов, Вопросы хмостойкости электроизоляционных лаков. Труды ВЭИ, выпуск № 38, Изоляционные материалы, 1940.
- К. А. Андрианов и О. И. Грибанова, Вопросы противоскоростной изоляции и полимеризующиеся смолы с повышенной водостойкостью. Труды ВЭИ, выпуск № 38, Изоляционные материалы, 1940.
- К. А. Андрианов, Вопросы теплостойкости электроизолирующих лаков и пластических масс. Труды ВЭИ, выпуск № 38. Изоляционные материалы, 1940.
- К. А. Андрианов и др., Электроизоляционные материалы. Труды ВЭИ, 1941.
- К. А. Андрианов, Новые материалы и заменители в электрической изоляции. „Электричество“, 1944, № 4.
- Б. П. Апаров и В. Л. Лавров. Современные тенденции в развитии синхронных генераторов и способов их защиты. „Электричество“, 1932, № 7.
- К. С. Архангельский и А. Н. Власов. Индикатор частичных разрядов. „Электричество“, 1939, № 1.
- В. А. Баев и Г. Н. Обухов. Изоляция секций тяговых двигателей микалентой на асфальтовом лаке. „Вестник электропромышленности“, 1937, № 2.
- В. А. Баев и Г. Н. Обухов. Исследование изоляции секций тяговых электродвигателей. „Вестник электропромышленности“, 1936, № 12,
- В. А. Баев, О применении микалекса для щеткодержателей электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1936, № 4.
- М. А. Басс, Пропиточный компаунд на садкинском асфальтите. Сборник по обмену техническим опытом, вып. III, 1944.
- А. Я. Бергер. Обмотки переменного тока. Госэнергоиздат, 1933.

- А. Я. Бергер. Турбогенераторы. Часть II. ОНТИ, 1937.
- А. Я. Бергер. Турбогенераторы. Часть I. ОНТИ, 1935.
- А. Я. Бергер и Б. Е. Грицков. Проблема повышения генераторного напряжения паровых электростанций и высоковольтный турбогенератор. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- О. Б. Брон. Влагостойкая и водонепроницаемая изоляция электрических машин. Труды Третьей всесоюзной конференции по электроизоляционным материалам, 1934.
- О. Б. Брон. Выбор системы изоляции для машин переменного тока. „Электричество“, 1935, № 9.
- О. Б. Брон. Выбор системы изоляции для машин переменного тока. Сборник „За единые серии электрических машин“, вып. 1, 1935.
- О. Б. Брон. К вопросу о противосыровой изоляции „Вестник электропромышленности“, № 12, 1930.
- О. Б. Брон. Контроль прочности междувитковой изоляции электрических машин. „Электричество“, 1935, № 20.
- О. Б. Брон. Усадка коллекторного миканита. Сборник „Вопросы изоляции в электротехнике“ (Труды Первой Всесоюзной конференции по электроизоляционным материалам), 1930.
- Б. П. Бурьянов. Профилактика главной изоляции генераторов. Сборник информационных материалов Мосэнерго, часть II, 1947.
- Б. П. Бурьянов. Контроль за старением изоляции генераторов. „Электрические станции“, 1945, № 4—5.
- Ю. Н. Ван-Гаут, М. Ю. Пошерстник. Производство обмоточных слабotoчных и теплостойких проводов с волокнистой изоляцией, изд. завода Севкабель, 111 стр., 1939.
- А. К. Варденбург и Т. Д. Филигриевская. К вопросу изоляции, электрических машин. Материалы по обмену техническим опытом, ЦБТИЭ, вып. 22, 1947.
- А. К. Варденбург и С. В. Шишкин. Липкие ленты для электропромышленности. Информационно-технический сборник ЦБТИ. Вып. X. 1948.
- И. И. Варшавчик. Опыт сушки генератора потерями в железе ротора. „Электрические станции“ 1948, № 3.
- Е. К. Виниченко. Изоляция высоковольтных машин. „Энергетика“, вып. 3, 1936.
- Н. В. Виноградов. Намотка катушек и секций электрических машин. Госэнергоиздат, 1946.
- Н. В. Виноградов. Обмотки электрических машин. Госэнергоиздат, 1946.
- Н. В. Виноградов. Технология производства электрических машин. Госэнергоиздат, 1948.
- М. Д. Вольпин, Р. Г. Гемке, Е. И. Еремеев и др. Обмотки электрических машин. Госэнергоиздат, 400 стр., 1940.
- Б. М. Вул. Выбор системы изоляции для машин 6000 в. Сборник „За единые серии электрических машин“, вып. II, 1935.
- Б. М. Вул и И. М. Гольдман. Борьба с краевыми разрядами как метод повышения использования изоляции. Журнал технической физики, 1931, т. 8, в. 12.
- Ф. С. Гланц. Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока. Сборник „Электросила“, 1947, № 4.
- И. М. Гольдман. Ослабление краевого эффекта с помощью полупроводящих слоев. „Журнал технической физики“ 1931, т. 5, вып. 39.

- Б. М. Гончаренко.** Испытательные напряжения обмоток электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1944, № 5—6.
- Б. М. Гончаренко.** Срок службы изоляции электрических машин при форсированных режимах эксплуатации. „Вестник электропромышленности“, 1943, № 7—8.
- А. М. Горбунов.** Испытание коллекторного миканита на усадку. „Заводские лаборатории“, 1936, т. 5, № 12.
- С. П. Гредкий.** Испытание витковой изоляции статорных катушек в машине. „Вестник электропромышленности“, 1941, № 10—11.
- П. Г. Грудинский и Красильников.** Авария с генератором 50 000 квт. „Электрические станции“, 1932, № 6.
- Я. С. Гурин, В. И. Калитвянский и С. В. Цукерник.** Улучшение теплоотдачи шунтовых катушек, длительно включенных при неподвижном якоре. „Вестник Харьковского электромеханического завода“, 1940, № 4—5.
- Ф. А. Дементьев.** Защита обмоток низковольтных машин пропиточными лаками и компаундами. „Вестник электропромышленности“, 1939, № 10—11.
- Ф. А. Дементьев.** Изменение сопротивления изоляции обмоток машин с температурой. „Электричество“, 1939, № 5.
- Ф. А. Дементьев.** Пропитка и обмазка обмоток низковольтных машин изд. ВНИТОЭ, 1939.
- В. В. Енько.** Перегрузка турбогенераторов. „Электричество“, 1933, № 17.
- Д. В. Ефремов.** К вопросу о выборе изоляции 6000-вольтных обмоток машин средней мощности. Сборник „За единые серии электрических машин“, вып. I, 1935.
- Д. В. Ефремов и Р. А. Лютер.** Проблемы изоляции для электрических машин. Труды Третьей всесоюзной конференции по электроизоляционным материалам, 1934.
- Ф. Г. Железников.** Производственные контрольные испытания изоляции статорных катушек, полукатушек, и стержней обмоток электрических машин высокого напряжения. Сборник „Электросила“, 1945, № 2—3.
- Г. К. Жерве.** Опыт сушки сильно отсыревших машин. Сборник „Электросила“, 1945, № 2—3.
- Л. В. Животовский.** Стеклоанная изоляция асинхронного двигателя и его мощность. „Электричество“, 1941, № 3.
- А. М. Залесский.** Профилактические испытания изоляции электрических машин. „Электричество“, 1948, № 2.
- А. М. Залесский и А. С. Зингерман.** Исследование импульсной прочности изоляции электрических машин. „Электричество“, 1949, № 2.
- А. П. Захарова.** Изготовление бумажно-миканитовых манжет. Информационно-технический сборник ЦБТИЭ, вып. X, 1948.
- Инструкция по применению стеклянной изоляции при ремонтах электродвигателей.** Металлургиздат, 1944.
- Инструкция по эксплуатации и ремонту турбогенераторов.** Госэнергоиздат, 1944.
- С. А. Кабанов.** Контроль производства электрических машин. Госэнергоиздат, 440 стр., 1935.
- З. Г. Каганов.** К вопросу о волновых явлениях в обмотках электрических машин. Диссертация, МЭИ, 1947.
- В. Е. Казанский.** Стационарный контроль изоляции цепи возбуждения генератора. „Электрические станции“, 1940, № 5—6.

- А. В. Калантаров. Испытание междувитковой изоляции обмоток. „Электричество“, 1933, № 5.
- А. В. Калантаров. Применение абсорбционных испытаний при сушке генераторов. „Электрические станции“, 1946, № 2.
- А. В. Калантаров. Эксплуатационные измерения диэлектрических потерь в изоляции электрических машин. Труды Третьей всесоюзной конференции по электроизолирующим материалам, 1934.
- А. В. Калантаров. Эксплуатационные испытания генераторов постоянным током. „Электрические станции“, 1946, № 1.
- Е. В. Калинин. Защита от перенапряжений вращающихся машин, работающих на воздушную сеть. „Электричество“, 1938, № 6.
- В. И. Калитвянский. Изоляция в новых сериях электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1947, № 1.
- В. И. Калитвянский. Испытание коллекторного миканита на усадку. „Вестник электропромышленности“, 1941, № 10—11.
- В. И. Калитвянский. Модернизация изоляции электрических машин при ремонтах. „Промэнергетика“, 1947, № 3.
- В. И. Калитвянский. Новые типы изоляции электрических машин. „Электричество“, 1947, № 6.
- В. И. Калитвянский. Новый вид синтетической изоляции обмоточных проводов. „Вестник электропромышленности“, 1943, № 9.
- В. И. Калитвянский. Пигментированные электроизолирующие лаковые эмали. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. I, 1937.
- В. И. Калитвянский. Применение асбестовых материалов в электромашиностроении. „Каучук и резина“, 1939, № 5.
- В. И. Калитвянский. Применение новых видов изоляции при ремонте электрооборудования. МОНИТОЭ, 1946.
- В. И. Калитвянский. Пропитка и лакировка обмоток электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 5—6.
- В. И. Калитвянский. Состояние и ближайшие задачи изоляционной техники в электромашиностроении. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. III, 1940.
- В. И. Калитвянский. Сушка и пропитка обмоток электрических машин и аппаратов. Изд. ЦБТИ МЭП, 1948.
- В. И. Калитвянский. Электрическое старение изоляции обмоток электрических машин. „Электропривод“, 1935, № 1.
- В. И. Калитвянский и С. В. Цукерник. О введении в стандарт на электрические машины нового, более теплостойкого класса изоляции. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 11.
- В. И. Калитвянский и С. В. Цукерник. Повышение мощности асинхронных двигателей при применении стеклянной изоляции. „Вестник электропромышленности“, 1941, № 1.
- В. И. Калитвянский и А. С. Чернишкина. Интенсификация процессов сушки обмоток электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1945, № 6.
- Б. Н. Каноныкин. К вопросу об ионизации в машинах. Журнал технической физики, 1935, т. V, вып. 4.
- Б. Н. Каноныкин. Производство изоляции обмоток электрических машин переменного тока. ГЭИ, 1933.
- Б. Н. Каноныкин. Профилактические испытания изоляции статорных обмоток. „Электричество“, 1937, № 15.
- Л. М. Камионский. Сушка якорей электромашин лампами инфракрасного излучения. „Вестник машиностроения“, 1946, № 1.

- Я. С. Колин. Эффективные методы профилактических испытаний изоляции обмоток генераторов. „Электрические станции“, № 1, 1949.
- В. А. Карасев и З. Г. Каганов. Распространение волн в обмотках электрических машин. „Электричество“, № 4, 1949.
- Е. Г. Комар. Асбестовая изоляция стержней статорной обмотки. „Новости техники“, 1933, зам. 4715.
- Е. Г. Комар. Изоляция статорных обмоток железистым асбестом. „Новости техники“, 1933, зам. 3753.
- Е. Г. Комар. Новый ГОСТ на турбогенераторы. „Вестник электропромышленности“, 1943, № 3.
- Е. Г. Комар. О предельных допускаемых температурах обмоток турбогенераторов. „Электрические станции“, 1940, № 7.
- Е. Г. Комар. Эксплуатация турбогенераторов. ГЭИ, 1943.
- А. В. Корицкий. Коллекторы на пластмассе. „Вестник электропромышленности“, 1942, № 11—12.
- А. В. Корицкий. Кратковременное воздействие высоких температур на бумажную и хлопчатобумажную изоляцию. „Вестник электропромышленности“, 1948, № 12.
- С. В. Крауз. О высоковольтных турбогенераторах с масляным охлаждением. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- А. Н. Ларионов. Высоковольтные турбогенераторы с жидкостным охлаждением. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- Ю. И. Лебедев. Производство коллекторов, „Вестник электропромышленности“, 1940, № 5—6.
- Б. П. Лебедев. Применение нового способа сушки электрических машин. „Электрические станции“, № 2, 1948.
- Г. И. Лысаковский. За повышение эффективности испытаний главной изоляции вращающихся высоковольтных машин. Доклад на Всесоюзной научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной электрической изоляции, апрель 1947 г.
- Г. И. Лысаковский. Повреждения изоляции высоковольтных двигателей собственных нужд станций. „Электрические станции“, 1946, № 1.
- Г. И. Лысаковский. Применение в эксплуатации метода контроля влажности изоляции по замеру емкостей. „Электрические станции“, 1946, № 12.
- Т. Н. Лысаковский и Н. Г. Соловьев. Замеры сопротивления изоляции статоров генераторов. „Электрические станции“, 1944, № 4.
- Г. И. Лысаковский и М. Г. Соловьев. Применение индикатора частичных разрядов для испытаний изоляции высоковольтных машин. „Электрические станции“, 1945, № 6.
- Г. И. Лысаковский. Повышение эффективности испытания главной изоляции статоров высоковольтных вращающихся машин. „Электрические станции“, 1948, № 10.
- Р. А. Лютер. К вопросу о высоковольтных турбогенераторах. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- Р. А. Лютер и Г. Г. Швец. Витковая изоляция электрических машин. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. I, 1937.
- Б. П. Лебедев. О предупреждении увлажнения изоляции электрических машин. „Электрические станции“, 1949, № 4.
- Е. К. Лашев, Слюда, часть I. Свойства слюд. Государственное издательство литературы по строительным материалам, 296 стр. (общирная библиография), 1948.

- И. Г. Лимова, Щелочестойкий электроизолирующий лак. „Вестник электропромышленности“, 1946, № 3.
- М. И. Мантров, Диэлектрические свойства миканита из слюды различных номеров. „Вестник электропромышленности“, 1935, № 11.
- М. И. Мантров, Поле высоковольтного ввода. „Электричество“, 1939, № 12.
- И. К. Макас. Изготовление секций с микафолиевой гильзой для электромаши́н большой мощности. „Вестник электропромышленности“, 1947, № 10.
- Л. Г. Мамиконян. Контроль влажности изоляции электрических машин и трансформаторов по изменению емкости их обмоток. „Электрические станции“, 1947, № 4.
- М. И. Мантров. Диэлектрические потери в слюдяной изоляции электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1936, № 2.
- М. И. Мантров. О контроле качества изоляции электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1935, № 8 и № 9.
- М. И. Мантров. Расчет давлений в производстве коллекторов в машинах постоянного тока. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 11.
- М. И. Мантров. Расчет давлений при опрессовке изоляции электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 10.
- М. И. Мантров. Слюдяная изоляция с повышенным пробивным напряжением. „Электричество“, 1935, № 9.
- А. Г. Меклер. Определение мощности двигателей при повторнократковременном графике с учетом старения изоляции. „Вестник электропромышленности“, 1947, № 6.
- И. Н. Мионов. Машина для лакировки жести. Информационно-технический сборник ЦБТИЭ, вып. X, 1948.
- М. М. Михайлов. К вопросу о пропитке изолирующих материалов и обмоток. Сборник „Вопросы изоляции в электротехнике“ (Труды Второй всесоюзной конференции по электроизоляционным материалам), 1932.
- М. И. Московский. Технология электромашиностроения. Госэнергоиздат, 488 стр., 1947.
- НИТОЭ. Рекомендации по пропитке и сушке электродвигателей в условиях ремонтных мастерских промышленных предприятий, 1944.
- В. С. Панасюк. Сушка инфракрасными лучами. Материалы по обмену техническим опытом, ЦБТИЭ, 1945, вып. VIII.
- П. Н. Панфилов, Р. Д. Торгунов, Д. Л. Арманд. Производство коллекторов тяговых двигателей. Под редакцией Д. Л. Арманд. Энергоиздат, 64 стр. 1934.
- В. А. Привезенцев. Производство обмоточных проводов с хлопчатобумажной, стеклянной и дельта-асбестовой изоляцией. Госэнергоиздат, 1945.
- В. А. Привезенцев. Производство эмалированной проволоки. Госэнергоиздат, 1947.
- В. А. Привезенцев. Производство обмоточных проводов с хлопчатобумажной, стеклянной и дельта-асбестовой изоляцией, изд. 3-е. Госэнергоиздат, 120 стр., 1945.
- В. А. Привезенцев. Производство эмалированной проволоки, Госэнергоиздат, 178 стр., 1945.
- В. А. Привезенцев, Методы испытания эмалированной проволоки. „Вестник электропромышленности“, 1949, № 6.

- В. А. Привезенцев и О. И. Рублевская. Теплостойкая эмалированная проволока. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 3.
- Н. А. Поляк. Повреждения и неисправности ротора паротурбинного генератора. Госэнергоиздат, 1942.
- Н. А. Поляк. Повреждение и неисправности статора паротурбинного генератора. Госэнергоиздат, 1940.
- М. И. Раппопорт. Новые методы профилактических испытаний высоковольтной изоляции. „Промэнергетика“, 1947, № 4.
- М. И. Раппопорт. Новые пути в методике профилактических испытаний изоляции. „Электричество“, 1945, № 10.
- Н. А. Сазонов и И. И. Эдельман. Озонирование в турбогенераторах. „Теоретическая и экспериментальная электротехника“, 1932, № 3.
- Н. А. Сазонов и И. И. Эдельман. Озонирование в турбогенераторах. „Электричество“, 1932, № 13.
- Б. Д. Садовский. Стеклоанная изоляция в электромашиностроении. „Вестник электропромышленности“, 1941, № 9.
- Сборник рефератов и переводов статей из иностранных журналов. Вып. 1. Электрические машины, стр. 21—25, ЦБТИЭ, 1945.
- Сводный каталог кабельной продукции. Вып. — Обмоточные провода, ЦБТИ НКЭП СССР. 1946.
- Г. И. Сканапи. Исследование диэлектрических потерь в изоляции обмоток крупных турбогенераторов и гидрогенераторов. „Электричество“, 1935, № 7.
- Г. И. Сканапи. Связь между механическими свойствами статорной непрерывной изоляции турбо- и гидрогенераторов и ее пробивным напряжением. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. II, 1938.
- Г. И. Сканапи. ТУ на слюду и слюдяные материалы для электромашиностроения. „Электричество“, 1935, № 9.
- Г. И. Сканапи и А. П. Ермолов. Метод устранения коронирования (озонирования) высоковольтных генераторов. Труды Третьей всесоюзной конференции по электроизолирующим материалам, 1934.
- Г. И. Сканапи и С. П. Грецкий. Методы расчета электрических свойств статорной изоляции высоковольтных машин. „Журнал технической физики“, 1937, т. VII, стр. 447.
- Г. И. Сканапи и В. Н. Канонькин. Применение ацетилцеллюлозы в качестве изоляции электрических машин. Труды Третьей всесоюзной конференции по изолирующим материалам, 1933.
- Г. И. Сканапи и Ф. А. Коленко. Анализ причин пробоя непрерывной изоляции высоковольтных машин. Сборник II „Электрическая изоляция“, 1938.
- М. В. Смирнов. Построение высоковольтных турбогенераторов. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- Справочник по электрической изоляции под ред. Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, Госэнергоиздат, 1948.
- А. С. Суханов. Механизация процессов пропитки обмоток. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 5—6.
- Ф. Т. Сухоруков. Механизация производства обмоток. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 11.
- Ф. Т. Сухоруков. Производство статорных высоковольтных обмоток в условиях военного времени. „Вестник электропромышленности“, 1944, № 8—9.
- Ф. Т. Сухоруков. Производство статорных обмоток американского типа. ОНТИ, 1934.

- Ф. Т. Сухоруков. Стахановская механизация обмоточно-изоляционных работ. ГЭИ, 1941.
- И. А. Сыромятников. Допустимые перегрузки генераторов. „Электрические станции“, 1941, № 15—16.
- И. А. Сыромятников. Влияние кратковременных перегрузок на сокращение срока службы изоляции. „Электрические станции“, 1940, № 8.
- И. А. Сыромятников. Вопросы эксплуатации синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1948.
- И. А. Сыромятников. Новый метод сушки мощных генераторов. „Электричество“, 1944, № 7.
- И. А. Сыромятников. Определение сопротивления изоляции обмотки ротора. „Электрические станции“, 1938, № 4.
- И. А. Сыромятников. Надежность работы электрических машин и требования эксплуатации. „Электричество“, № 1944, 8—9.
- И. А. Сыромятников. Сушка электрических машин потерями в железе без выемки ротора. „Электрические станции“, 1947, № 8.
- И. А. Сыромятников. Вопросы эксплуатации изоляции и требования к поставщикам изоляции. „Электричество“, 1949, № 2.
- М. Е. Сыркин и Э. Г. Файнштейн. Нормирование нагрева электрических машин. „Электричество“, 1949, № 3.
- Б. М. Тареев. Нагревостойкость электрической изоляции. „Вестник электропромышленности“, 1942, № 3.
- Б. М. Тареев. Проблемы теплостойкой изоляции в электрических машинах. „Электричество“, 1938, № 12.
- Б. М. Тареев. Теплопроводность пропитанной и непропитанной изоляции. „Вестник электропромышленности“, 1942, № 10.
- Б. М. Тареев (ред.). Стекланная изоляция, ГЭИ, 1943.
- Б. М. Тареев и Н. В. Александров. Волокнистая стекланная изоляция. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. III, 1940.
- Б. М. Тареев, В. А. Привезенцев и Н. В. Александров. Стекланная изоляция в электромашиностроении. „Вестник электропромышленности“, 1939, № 12.
- Б. М. Тареев и Р. С. Холодовская. Электроизоляционные конструкции на основе стекланного волокна, ЦБТИЭ, 1946.
- А. А. Тайц. Анализ аварий электромашин. МОНИТОЭ, 1946.
- Т. А. Титов. Методы и нормы профилактических испытаний электрооборудования. МОНИТОЭ, 1946.
- В. А. Трапезников и Е. Н. Зорин. Асинхронные машины со стекланной изоляцией. „Электричество“, 1944, № 4.
- Н. Тугаринов. О распределении удельного давления между пластинами по длине коллектора. „Вестник электропромышленности“, 1934, № 6.
- В. С. Тулин. Инструкции по сушке, пуску и уходу за электродвигателями. Гостехиздат, 1944.
- Н. М. Федоров. Сушка инфракрасными лучами. Материалы по обмену техническим опытом, ЦБТИЭ, 1945, вып. VII.
- Н. М. Федоров. Инфракрасная сушка. „Промэнергетика“, 1948, № 2.
- А. Я. Филимонов и П. А. Гуков. Коллектор на пластмассовой основе. „Вестник электропромышленности“, 1941, № 6.
- И. С. Хайлов, В. А. Родзевич. Применение прессшпановых гильз вместо слюды. Информационно-технический сборник ЦБТИ МЭП, вып. IX, 1948.
- Х. Г. Хуснутдинов. Новый пропиточный компаунд повышенного качества. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 2.

- Р. С. Холодовская.** Нагрев инфракрасным излучением. ЦБТИЭ, 1945.
- Р. С. Холодовская.** Современные методы сушки и пропитки электромоторов. МОНИТОЭ, 1946.
- Р. С. Холодовская и М. И. Шабанова.** Бензино- и маслостойкие эмали воздушной сушки. Сборник „Электрическая изоляция“, 1940.
- И. Чак.** Капитальный ремонт катушек трамвайных моторов методом компаундирования. „Транспорт и дороги города“, 1936, № 6.
- К. И. Черняк.** Теплопроводная изоляция и ее применение в электрических машинах. „Вестник электропромышленности“, 1937, № 6.
- К. И. Черняк и Г. К. Жерве.** Пути экономии меди в обмотках возбуждения электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 5—6.
- М. Г. Черняк.** Свойства и области применения стеклянного волокна. „Легкая промышленность“, 1944, № 1—2.
- М. Г. Черняк.** Свойства и применение стеклянного волокна при ремонте электромоторов. Гизлегпром, 25 стр., 1945.
- Я. И. Шабешев.** Механизация обмоточно-изолировочных работ. „Вестник электропромышленности“, 1940, № 5—6.
- Г. Г. Швец.** О расчете полупроводящих покрытий изоляции электрических машин. Сборник „Электросила“, 1947, № 4.
- Г. Г. Швец.** Предварительный контроль витковой изоляции неразрезных обмоток мощных электрических машин высокого напряжения. Сборник ЛЭМИ, № 2 (IV), 1934.
- Г. Г. Швец и С. П. Грецкий.** Экспериментальное исследование перенапряжений в обмотках электрических машин. Сборник „Электрическая изоляция“, вып. II 1938.
- С. Н. Шевчук и В. С. Парфенов.** К вопросу об аварийности электромоторного хозяйства в цехах Горьковского автозавода. „Вестник электропромышленности“, 1934, № 9.
- Э. Г. Шемис.** Конвейер для лакировки и просушки штампованных листов. Информационный сборник ЦБТИЭ, вып. V, 1947.
- Е. Б. Шварцман.** Механизация процесса изолировки обмоток электрических машин. „Вестник электропромышленности“, 1948, № 6.
- К. И. Шенфер.** Высоковольтные генераторы переменного тока. „Электричество“, 1936, № 6.
- К. И. Шенфер.** Высоковольтные генераторы переменного тока. Сборник „Высоковольтные турбогенераторы“, АН СССР, 1940.
- А. Л. Шор.** Повышение теплопроводности компаунда. „Вестник электропромышленности“, 1937, № 3.
- М. Ю. Шухатович.** Применение стеклянной изоляции для ремонта и восстановления электродвигателей горных машин. „Уголь“, 1944, № 9.
-

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аппарат для обнаружения короткозамкнутых витков 274, 286
 Аппаратура контрольно-измерительная 216
 Асбест 11
 Асбестовые ленты полупроводящие 109
 Асбобакелит 75
 Асботекстолит 30
 Асбоцемент 14
 Ацетобутиратцеллюлоза 31, 58, 61, 67, 79, 105, 120
 Бумага 11
 — асбестовая 13, 41, 28, 54
 — бакелизированная 28
 — графитированная 132
 — изоляционная 41
 — — намоточная 28
 — кабельная 28
 — оклеечная 28
 — телефонная 28
 Ванны пропиточные 212
 Вещества химически активные 303
 Вибрация 80
 Влагостойкость 23, 25, 33, 71, 75, 100, 116, 121, 199, 220, 227
 Водостойкость 23, 25, 33
 Воздействия электродинамические 80
 Восстановление компаундов 244
 Втулки миканитовые 168
 Выбор изоляции 35, 61, 76
 Гетинакс 13, 30, 168
 Гибкость изоляции 26, 121
 Гильза миканитовая 122, 153, 188
 — micaфолниевая 69, 81, 85, 94, 187
 — мягкая 66, 69, 76
 — пазовая 62, 64
 — твердая 69, 76
 — электрокартоновая 64
 Дерево 13
 Доски асбоцементные 30
 Замыкания витковые 327
 Запас электрической прочности 52
 Жидкость синтетическая 127
 Изделия намоточные 13
 Измерение сопротивления изоляции 316
 Износ тепловой 310
 Изолировка вполнахлеста 182
 — впритык 182
 — вразбежку 182
 — механизированная 186
 — микалентей 183
 — ручная 183
 Изоляция бумажная электротехнической стали 177
 — бумажно-бакелитовая 167
 — бумажно-масляная 127
 — винифлексовая 229
 — витковая 178—180
 — — катушек возбуждения 53
 — — роторных обмоток 41
 — — статорных обмоток 41, 42, 46—53
 — — якорных обмоток 41, 42
 — влагостойкая 19, 62, 163
 — — выпных обмоток 54, 145, 157
 — выводных концов 89, 106
 — кабельного типа 120
 — класса А 42, 43, 53, 54, 62—64, 76, 102, 120, 143, 145, 148, 150, 157, 159, 161, 168, 173, 179, 180
 — — В 42, 45, 53, 59, 62, 64, 68, 76, 106, 148, 151, 159, 160—163, 166, 168, 179
 — — ВС 42, 45, 46, 53, 62, 74, 151, 160, 162, 179
 — — СВ 42, 45, 46, 62, 160, 162, 179
 — контактных колец 149, 151
 — лобовых частей 59, 63, 82, 89, 154
 — межгрупповых соединений 83
 — междукатушечная 59
 — нагревостойкая 61, 62, 73, 74, 144, 179
 — неорганическая электротехнической стали 177
 — непрерывная 68, 72, 102, 106
 — — обмоткодержателей 149
 — обмоточных проводов 13, 41

- Изоляция основная 178, 179, 180
— пазовая 54—58, 60, 63, 64, 81, 85, 154
— пленочная 64
— проволочных бандажей 163
— протяжных обмоток 62, 81, 145
— роторных стержней 146
— соединительных шин 149
— ступенчатая 123
— стягивающих колец 167
— теплопроводящая 175
— уголков 86, 88, 102, 106, 108
— химически стойкая 179
— хомутиков 149
— шаблонных секций 160, 162
— шелковая 178
— эмалевая 178
Индикатор частичных разрядов 321
Ионизация 78, 98, 128, 130, 132, 205
Исполнение влагонепроницаемое 19, 176, 178
— морское 19
— нормальное 18, 178, 179
— специальное 20
— усиленное 19
Испытание абсорбционное 319, 323
— витковой изоляции катушек 263—277
— изоляции витков 319
— — коллектора 197
— — повышенным напряжением 316
— импульсами 323
— миканитовых конусов 194
Калибровка миканита 195
Каркас изолированный 172
— пластмассовый 168
Картон асбестовый 13
Кварцкомпаунд 174
Классы изоляции 11
Клей изоляционный 58
Клейкость 26
Колесания высокочастотные 265—267, 269, 273, 275, 281
Компаунд 17, 230, 244
Компаунды битумные 25
— обмазочные 26, 202, 241
Контроль компаундов 245
— лаков 243
— приемочный 252
— пропитки 247
— размеров 253
— сушки 314
Конус миканитовый 166, 193
— обратный 88, 90
— прямой 87, 93
Коробочка пазовая 58, 64, 68, 76
Коронирование 84, 128, 130, 205
Короны действие 99
Котлы пропиточные 212
— смесительные 213
Коэффициент заполнения 35
— импульса 52
— теплового расширения 22, 80
Лак асфальто-масляный 126
— битумно-масляный 25, 76, 102, 142, 178—180, 235
— глифталевый 12, 25, 76, 179
— глифтабакелитовый 26
— крезольно-масляный 25, 179
— кремнийорганический 12, 25, 26, 61, 76, 179
— полупроводящий 27
— сажный 132
Лакировка обмоток 178—180, 238
Лакотканевая лента черная 120
Лакоткань 54—56, 58, 59, 62—64, 67, 76, 82, 157, 159, 161
— черная 79, 105
Лакошелк 54, 58, 157
Лента асбестовая 13, 28, 41, 74, 175, 179
— железистая 110, 132
— лакотканевая 41, 66, 67, 68, 83, 84, 86—88, 90, 93, 102—105, 149, 168
— микашелковая 90, 93
— полупроводящая 109, 124
— стеклянная 41, 50, 64, 69, 74, 171, 172, 179
— хлопчатобумажная 28, 41, 49, 59, 63—73, 86—89, 91, 102—104, 107—110, 143, 147—149, 151, 159—165, 168, 170—172, 174, 178—180, 182
— шелковая 28, 41
Маслостойкость 23, 26
Материал композиционный 31, 58
Материалов изоляционных влияние 35—40
Материалы асбестовые 74
— стекловолокнистые 11, 13, 74
— прессованные 13
Метод ваттметровый 300
— импульсный 281
Методы испытаний витковой изоляции 266, 269, 273—275
Микалекс 14
Микакартон 59, 61, 64, 68
Микалента 14, 29, 41, 45, 53, 72, 73, 74, 106—110, 142—144, 147, 154, 162—164, 174
Миканит 61, 154, 171—173, 175
— гибкий 14, 29, 45, 59, 61, 76, 159, 160
— жаростойкий 14
— коллекторный 14, 29, 166
— прокладочный 14, 29

- Миканит формовочный 14, 29
 Микаткань 60
 Микафоллий 14, 29, 69, 70, 84, 86—88, 147, 152, 161, 162
 Морозостойкость 23
 Мост высоковольтный 297, 299

 Нагревостойкость 11, 18, 21, 25—27, 32, 38, 99, 117
 Надежность эксплуатационная 37
 — пробивная 56, 59, 69, 70, 72
 Назначение сушки 216
 Напряжение испытательное 256—262, 289

 Обмазка компаундами 241
 Оборудование вспомогательное 216
 Обработка технологическая 22
 Озонирование 205, 326
 Обутюжка машинная 187
 — ручная 187
 Озоностойкость 84, 100, 117, 121
 Окислы азота 80, 128
 Оксидирование электротехнической стали 177
 Определение тангенса угла диэлектрических потерь 318
 Опрессовка горячая 190
 — нагретых обмоток 190
 — холодная 189
 Осмотр внешний 253
 Осциллоскоп 285, 288
 Отсыревание изоляции 311, 327
 Очистка лаков 215

 Паста 26
 Периодичность испытаний 323
 Печь вакуумная 209
 — сушильная конвейерная 209
 — с естественной циркуляцией воздуха 202
 — — — инфракрасными лампами 210
 — — — паровым калорифером 204
 — — — продувом воздуха 204
 — — — циркуляцией воздуха 203
 — — — электрическим калорифером 205
 Пластины выводные 172
 Пластические массы 14, 30, 167
 Пленки синтетические 13, 31, 58, 65, 67, 79, 105, 120
 Пленкокартон 31, 58, 62, 66
 Повреждения изоляции 325
 Покрyтис полупроводящее 132—141
 Полyс механизированный 168
 Потери диэлектрические 21, 77, 36, 113, 295
 — — — удельные 97

 Пределы допускаемого превышения температуры 15—18
 — допускаемых температур 16
 Прилипаемость 25
 Приспособление прессующее 194
 Пробивное напряжение 59, 67, 69, 72, 121
 Пробой изоляции 130, 328
 Прокладки междувитковые 41
 Пропитка в компаундах 230
 — обмоток 170, 179, 180
 — погружением 226
 — под вакуумом 228
 — проводов с эмалевой изоляцией 229
 Процесс пропитки комбинированный 229
 — — — тренировочный 228
 Процессы лакировки 241
 — необратимые 304
 — обратимые 304
 — пропитки 226
 Прочность изоляции механическая 25, 32
 — — — электрическая 20, 33, 54, 56, 68, 71, 77, 93, 94, 99, 110, 113
 Пылeвepизация 239

 Разбавление лаков 244
 Разбухание изоляции 99, 121
 Разрушение изоляции 328
 Рамки гетинаксовые 173
 — миканитовые 173
 — электрокартонные 173
 Расстояние изоляционные 83, 93
 Режимы компаундирования 233
 — сушки 222
 — — — пропитанных обмоток 231
 Резина 14
 Ремонт капитальный 315
 — текущий 315

 Свойства диэлектрические 25, 26, 32
 — механические 21, 118
 Сердечник механизированный 173
 Слода 12, 24, 27, 29, 61
 Силоксаны 30
 Синтолента 31
 Синтофоллий 31
 Смолы кремнийорганические 31
 Соединения кремнийорганические 30
 — междyфазовые 144
 Сопротивление изоляции 21, 246, 292, 327
 — поверхностное 141
 Составляющая тангенциальная электрического поля 134
 Составы пропитывающие 24
 Способы сушки изоляции 313
 Срок жизни изоляции 308, 310

- Стабильность 22, 32
Станок изолировочный 186
— обкаточный 188
Старение изоляции 101, 119, 306, 324
— — электрическое 99, 304
Стеатит 14
Стеклоизоляция 75
Стеклолаколенга 14, 29, 69, 76
Стеклоленты 28, 76
Стекломиканит 29, 61, 62
Стекломикафолит 14
Стеклотекстолит 30
Стеклоткань 13, 23, 60—62, 64, 68
Стойкость к растворителям 23, 32, 33
— химическая 81
Стойкость изоляции 34, 121
Сушка вакуумная 237
— внешним нагревом 314
— коротким замыканием 313
— переменным током 313
— постоянным током 313
— потерями 313
— при повышенных температурах 234
Тангенс угла диэлектрических потерь 121, 296—299
Текстолит, 13, 30, 168
Температура вспышки паров растворителей 249
— предварительной сушки 220
— предельно допустимая 16
Тепловой износ изоляции 234
Теплопроводность 22, 32, 33, 39
Ткань асбестовая 13, 28, 164
— хлопчатобумажная 13, 28
— шелковая 13
Толщина изоляции 32, 55, 63, 67, 70, 71, 81, 86, 87, 90, 91, 103, 104, 107—109, 143, 144, 147, 157, 159, 160—162
Транспортировка лаков 215
Требования к изоляции 20—24
Триацетатцеллюлозы 31, 58, 61, 67, 79, 105, 120
Установка для испытания электрической прочности основной изоляции 254
— компаундировочная 213
— пропиточная 213
Усыхание изоляции 326
Фарфор 14
Фибра 13, 29
Химическая стойкость 23
Хлопок 11
Хранение лаков 215, 248
— проводов 33
Цилиндр бумажно-бакелитовый 123
Шайбы гетинаксовые 168
— миканитовые 168
Шелк 11
Шеллак 97
Шланги лакированные 13
Щитки выводные 145, 176
Экраны полупроводящие 133
Эластичность изоляции 26, 32
Электрокартон 13, 28, 31, 41, 44, 48, 49, 54—60, 62—68, 70, 71, 73, 76, 86, 87, 103, 104, 107, 108, 145, 147—150, 153, 154, 157, 159—165, 168, 170, 171, 173, 178, 179
— лакированный 62
Эмаль пигментированная 26, 53, 74, 142
— серая 91
Эмальпровода 33
Эффект краевой 127

О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
17	Таблица 1,3	Предельные допустимые температуры при . . .	Предельные допустимые превышения температуры при . . .
233	Таблица 4,5	$2H + 0,5B + BK + ПД +$ $+ (3 \div 5) + \left(\frac{1}{12} ПВ + \frac{1}{12} ПД\right)$	$2H + 0,5B + BK + ПД +$ $+ (3 \div 5) \times \left(\frac{1}{12} ПВ + \frac{1}{12} ПД\right)$

В. И. Кадитвянский—Изоляция электрических машин

Цена 18 руб.

В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ