



Изоляция электрических машин

Излагаются вопросы выбора электроизоляционных материалов (ЭИМ) и обмоточных проводов, конструкций и технологии изготовления изоляции.

Данное пособие - включает разделы:

- электроизоляционные материалы и обмоточные провода;
- конструкции и технология изоляции обмоток.

Школа для электрика - <https://electricalschool.info/>

Электронные книги - <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>

Канал в ТГ - <https://t.me/electricalschool>

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

§ 1. Основные полимеры, используемые для производства электроизоляционных материалов и пропиточных составов

Химическая структура полимеров рассмотрена с точки зрения их нагревостойкости и технологического использования для производства эмалей, пропиточных лаков и компаундов.

Основная характеристика электроизоляционных материалов (ЭИМ) и систем изоляции (СИ) – нагревостойкость зависит от химического строения полимера и связана с такими понятиями, как теплостойкость и термостойкость.

Теплостойкость характеризуется предельной температурой, при которой полимер теряет свою прочность под действием той или иной нагрузки;

термостойкость определяется температурой, при которой происходит химическое изменение полимера, отражающееся на его свойствах.

К числу важных температурных характеристик относятся: $T_{\text{хруп.}}$, $T_{\text{стек.}}$, $T_{\text{разм.}}$.

- $T_{\text{хруп.}}$ – температура при которой полимер становится хрупким, теряет способность сопротивляться ударным нагрузкам;
- $T_{\text{стек.}}$ – температура, при которой полимер приобретает высокоэластические свойства;

- $T_{\text{разм.}}$ – температура, при которой полимер деформируется без нагрузки.

Следует отметить, что взаимосвязь между характеристиками неоднозначна, например, с ростом молекулярного веса полимера $T_{\text{стек.}}$ меняется мало, а $T_{\text{разм.}}$ растет заметнее.

Отметим влияние химического состава и строения полимеров на их нагревостойкость.

Энергия связи, размер атома.

Так как первичный акт термического или термоокислительного разложения полимера – это разрыв связей, то их устойчивость к нагреву оценивается прежде всего энергией связи.

В таблице 1 приводятся примеры, показывающие связь тепловых характеристик, в частности температуры размягчения полимера с величиной энергии связи между атомами и с их размерами.

Таблица 1

Величина энергии связи ккал/моль	Радиус атома Å	Основная цепь полимера	$T_{\text{разм.}},$ °C
C – H – 97	F – 0,64	– (CF ₂ – CF ₂) –	250
C – F – 116	Cl – 1,33	– (CF ₂ – CFCl) –	150
C – Cl – 91			

Высокая теплостойкость ($T_{\text{разм.}}$) [1] политетрафторэтилена (Фторпласта-4) обусловлена не только большей энергией связи C – F, но и меньшим размером атома фтора, обеспечивающим плотную упаковку атомов фтора, этот слой защищает основную цепь (– C – C –) от внешних воздействий. Таким образом, сопротивление связи разрыву зависит от взаимного влияния атомов и групп, от экранирующего действия атомов, расположенных вблизи менее прочных связей.

Влияние кристалличности.

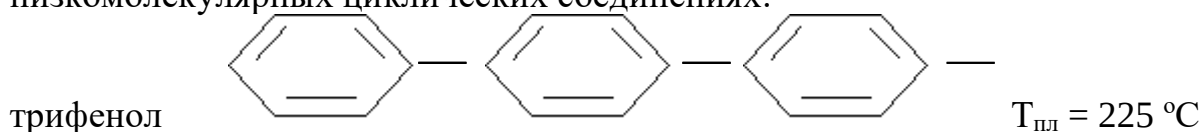
Линейные и разветвленные полимеры деформируются от нагревания и нагрузок из-за подвижности молекул и их звеньев. Поэтому более стоек к нагреву полимер, сохраняющий стеклообразное состояние или кристаллическую структуру в области высоких температур. К ним относятся полимеры с объемными группами, затрудняющими свободное вращение элементов структуры молекулы вокруг C – C – связи, и с полярными группами, усиливающими межмолекулярное притяжение. Сюда относятся кристаллические полимеры с водородными межмолекулярными связями и стереорегулярного строения.

Содержание ароматических колец и гетероциклов.

Существенное влияние на нагревостойкость оказывает наличие в полимере ароматических циклов (циклоцепные полимеры).

Особенность ароматических углеводородов заключается в том, что в их молекулах каждый атом углерода связан не только σ -электронами, но и π -электронами, образующими устойчивую замкнутую систему в виде единого кольцевого облака. При этом π -электроны не принадлежат определенной паре атомов углерода, а обобщены всеми атомами и способны перемещаться по всей молекуле.

Для ароматических углеводородов характерно сильное межмолекулярное взаимодействие. Температура плавления у них бывает настолько высокой, что во многих случаях их практически не удается расплавить. Влияние циклов в цепи на $T_{пл}$ можно показать на низкомолекулярных циклических соединениях:



Наличие шести циклов, повышает $T_{пл}$ до $470\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Например, для эпоксидной смолы существует математическое соотношение между термостойкостью и количеством закрытых бензольных колец

$$y = A \cdot x + B,$$

где y – термостойкость, $^{\circ}\text{C}$;

x – количество бензольных колец.

Наличие связи $\text{Si} - \text{O}$.

Следующим способом повышения устойчивости к нагреву является введение в состав цепи полимера связи $\text{Si} - \text{O}$, $\text{Si} - \text{C}$, $\text{Si} - \text{H}$. Наиболее прочна силоксановая связь $\text{Si} - \text{O}$. Энергия связи $\text{Si} - \text{O}$ 89 ккал/моль . При термоокислительном воздействии на кремнийорганические полимеры разрывается связь углерода с кремнием, как менее прочная. В результате органический радикал от Si отрывается полностью, а основная цепь сохраняет структуру. Дальнейшее окисление идет так, что между атомами углерода со свободными валентностями образуется дополнительная силоксановая связь в виде кислородного мостика, соединяющего основные цепи макромолекул. При этом увеличивается молекулярный вес полимера.

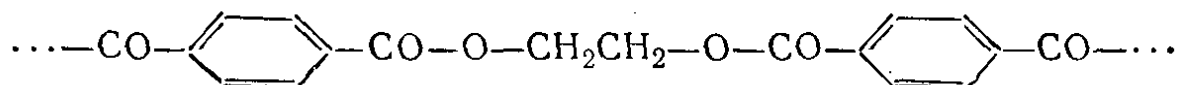
Возникшие в результате окисления кислородные мостики задерживают проникновение кислорода к незатронутым органическим радикалам и защищают их от разрушения. Таким образом, высокая нагревостойкость кремнийорганических полимеров объясняется стойкостью $\text{Si} - \text{O}$ связи основной цепи и тем, что окисление идет в направлении образования дополнительных $\text{Si} - \text{O} -$ связей, при этом структура основной цепи сохраняется. В конечном счете высокая нагревостойкость кремнийорганических полимеров объясняется исключительной стойкостью $\text{Si} - \text{O} -$ связи основной цепи и тем, что

окисление идет в направлении образования дополнительных силоксановых связей. Термическая стойкость кремнийорганических полимеров зависит от природы органических радикалов. Менее чувствительны к окислению фенильные радикалы в силу их большей устойчивости по сравнению с другими радикалами (C_2H_5 ; CH_3 и т.п.)

Чтобы показать связь между химическим строением и стойкостью к нагреву, рассмотрим некоторые полимеры, применяемые при создании материалов для систем изоляции электрических машин, в виде эмалей, пленок, волокон и пропитывающих составов (лаков, компаундов).

Термопластичные полиэфирные смолы.

Полиэтилентерефталат



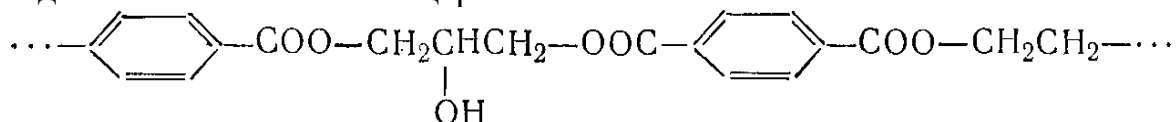
может быть рассмотрен как поли-*n*-фенилен с группой $-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{O}-\text{CO}-$, включенной между ароматическими звеньями. Вследствие этого полимер по нагревостойкости занимает промежуточное положение между циклоцепными и алифатическими полимерами.

Благодаря высокой степени кристаллизации линейные полимеры на основе терефталевой кислоты имеют высокую температуру плавления (265°C) и большую прочность. Это определило их использование для получения нитей и пленок.

Термореактивные полиэфиры терефталевой кислоты.

При поликонденсации терефталевой кислоты с глицерином получаются полимеры, растворимые в полярных растворителях и способные переходить в пространственную структуру. Лаковые покрытия, полученные из таких растворов, хрупки и не имеют практического значения. Для получения полимеров, образующих эластичные покрытия, часть глицерина заменяют этиленгликолем или другим двухатомным спиртом. Такие полиэфиры являются основой эмальлаков для получения нагревостойкой эмалевой изоляции проводов, высоко эластичной и прочной.

Формула полиэфира, в котором остатки терефталевой кислоты соединены с остатками глицерина и этиленгликоля:



Оптимальными свойствами обладает полимер, у которого 40% остатков этиленгликоля замещены звеньями из остатков глицерина.

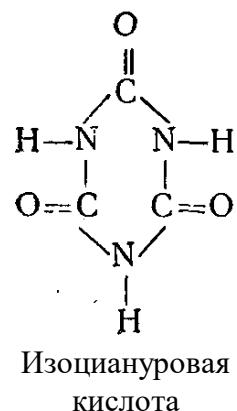
На основе таких полимеров изготавливаются лаки. Провода эмалированные этими лаками имеют нагревостойкость 130°C , ограниченный срок эксплуатации при 200°C . Полиэфирная изоляция

устойчива к воздействию растворителей. Недостаток ее – пониженная устойчивость к тепловому удару.

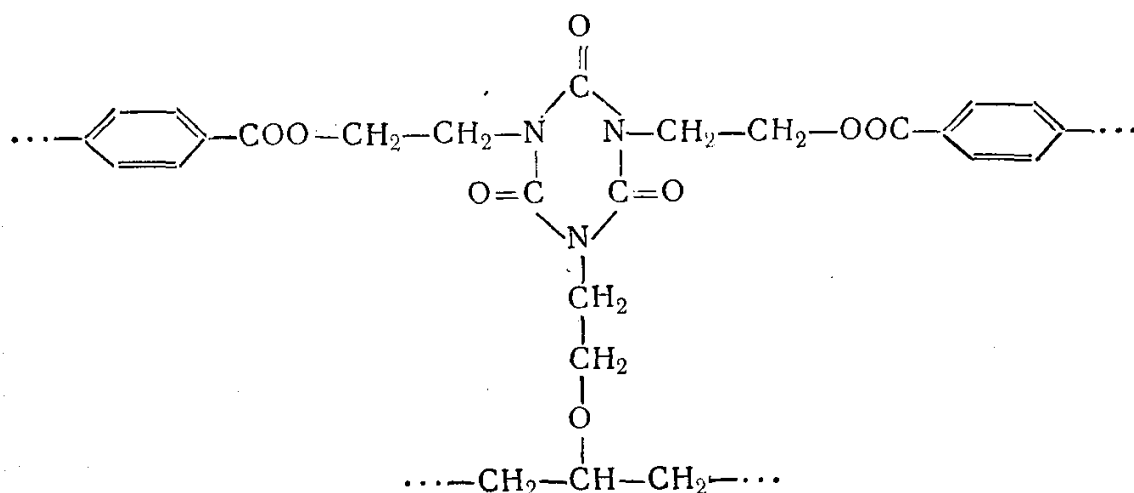
Чувствительность к тепловому удару связана со структурой полимера: близкое расположение цепей и большое число поперечных связей. При такой прочной структуре нагревание растянутой напряженной пленки вызывает дополнительные напряжения на отдельных участках полимера, так как возможность перемещения участков цепей в результате теплового движения сдерживается поперечными связями.

Стойкость к тепловому удару существенно повышается, если поверх изоляции на основе термореактивного полиэфира наложить слой термопластичной полиэфирной изоляции.

Чтобы улучшить некоторые свойства полиэфирной изоляции, главным образом повысить нагревостойкость, полиэфиры модифицируют производными изоциануровой кислоты



При этом образуется при запекании полимер (полиэфирцианурат) пространственной структуры:



Молекула полимера содержит энергетически прочные изоциануратные кольца. Этим можно объяснить повышение нагревостойкости изоляции.

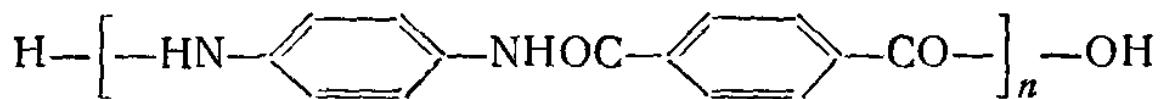
Отечественный полиэфирциануратный лак выпускается под маркой ПЭ – 958. Провода, эмалированные этим лаком, имеют нагревостойкость класса F (155°C).

Циклический полимер стабилизируют фенолом при 60 – 100 °С.

На основе полиэфира терефталевой кислоты изготавливают пропиточные лаки для изоляции электрических машин и аппаратов (марки ПЭ – 933, 934 и др.). Для получения необходимых свойств (температурного индекса, механической прочности, эластичности, температуры отверждения и др.) полиэфиры модифицируют эпоксидными смолами.

Полиамиды.

Это высокомолекулярные соединения, содержащие между углеводородными остатками повторяющиеся амидные группы $CONH$. Один из способов получения ПМА – поликонденсация диаминов с дикарбоновыми кислотами. Полимер имеет линейное строение:



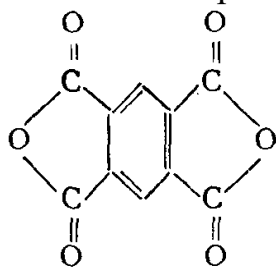
благодаря чему, могут быть получены волокна, используемые для изоляции в зависимости от срока службы при $T=(200-300)^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что в материале типа *Номекс* (фирма) используются волокна фибриды, которые служат связующим, они при расплавлении соединяют короткие волокна – флок.

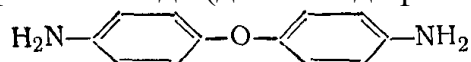
Полиимиды.

Полиимиды – полимерные соединения, содержащие имидные циклы.

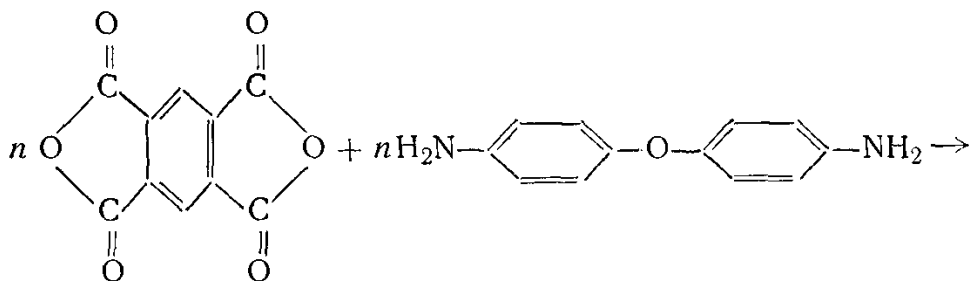
Получение полиимидов основано на реакции поликонденсации диангидридов тетракарбоновых кислот и ароматических диаминов.



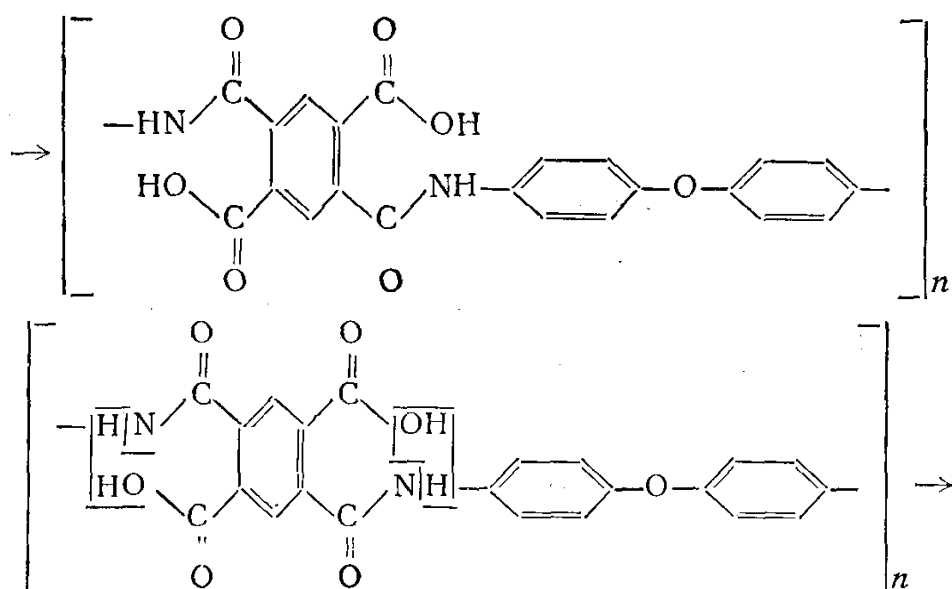
и диаминодифенилоксида (диаминодифенилового эфира)



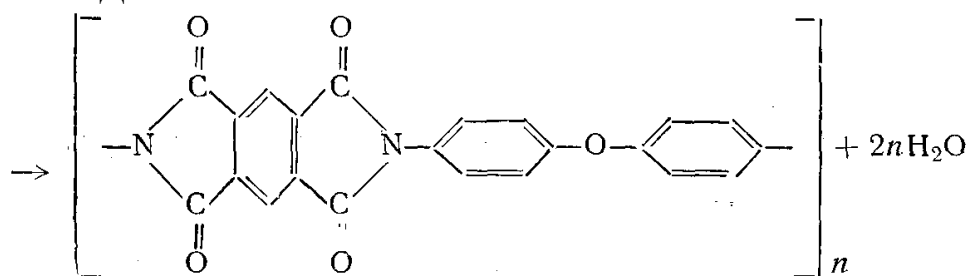
Полиимиды получают в две стадии. Сначала в среде растворителя (диметилформамида, диметилацетамида и др.) получают полиамидокислоту по реакции:



I СТАДИЯ



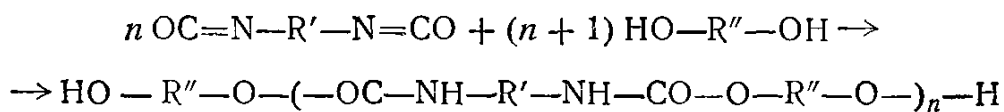
II СТАДИЯ



Полиимиды благодаря циклическому строению отличаются высокой нагревостойкостью, они нерастворимы, для полиимидов найден технологический метод получения покрытий, пленок, лаков благодаря растворимости промежуточных продуктов. ПИ – принят за эталон при определении нагревостойкости материалов с помощью термогравиметрии, его ТГИ – индекс (термогравиметрический индекс) соответствует 240°C. К нагревостойким полимерам относятся также различные модификации полиэфиров, полиамидов и полиимидов. От соотношения “участков” исходных продуктов зависят свойства полученных полимеров; их рабочая температура может варьироваться от 155 до 220 °C. На основе этих полимеров получают эмальлаки, пропиточные лаки и пленки.

Полиуретаны.

Полиуретаны получают взаимодействием диизоцианатов и соединений, содержащих две и более гидроксильные группы:



Как видно из формулы полиуретана, между углеводородными остатками (R' и R'') располагается группа NHCOO. Она характеризует полиуретаны как соединения, близко примыкающие как к полиэфирам, так и к полиамамидам, что видно из следующего сопоставления:

амидная группа NHCO ;

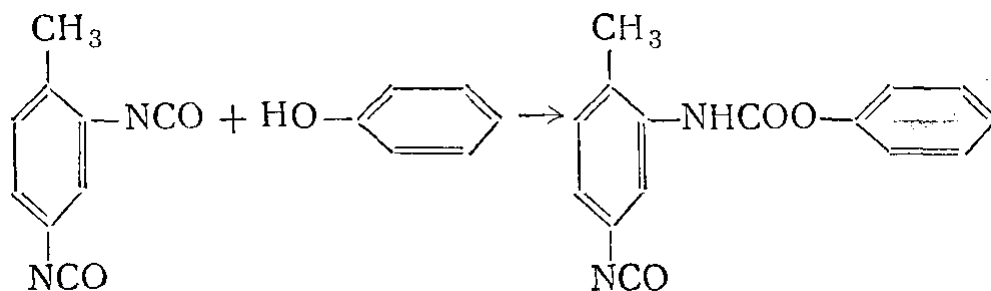
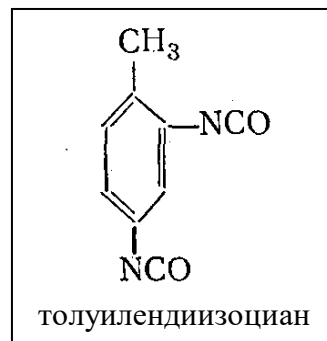
повторяющаяся группа в полиуретане NHCOO ;

эфирная группа COO .

При конденсации диизоцианатов с соединениями, содержащими более двух гидроксильных групп, образуются макромолекулы, способные переходить в пространственную структуру. Сочетая диизоцианаты с трифункциональными соединениями, получают лаки.

Исходными соединениями для получения лаков обычно служат ароматические изоцианаты, например толуилنديизоцианат и полиэфиры, полученные конденсацией двух- и трехатомных спиртов с двухосновными кислотами.

Это достигается реакцией между изоцианатной группой и фенолом:



Основное применение полиуретанов — получение лаков для эмалирования проводов.

Основное преимущество проводов, эмалированных полиуретановым эмальлаком, — способность эмальной пленки облуживаться без зачистки изоляции. Облудить можно, погрузив незачищенный провод в расплавленное олово или в паяльный состав на его основе. Зависимость времени лужения от температуры показана на рис. 1

Это свойство проводов с полиуретановой изоляцией выгодно используют в монтаже электронной, электро- и радиотехнической аппаратуры, когда приходится присоединять большое число тонких проводов к различным токопроводящим частям схем. Примеры: производство мелких двигателей

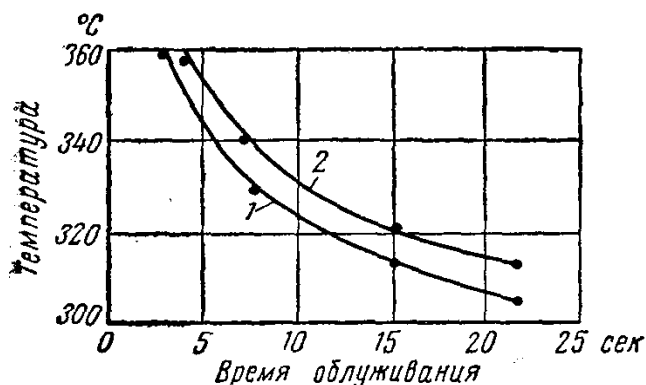


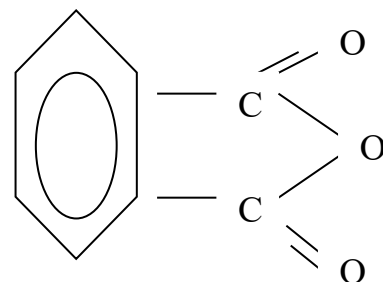
Рис. 1 Зависимость времени облуживания эмальпроводов от температуры:
1 — полиуретановая пленка;
2 — полиуретановая пленка в сочетании с поливинилацеталевой смолой

10

Эпоксигруппы неустойчивы и легко взаимодействуют с соединениями, имеющими подвижный атом водорода. При смешении эпоксидных смол с такими соединениями наступает реакция, приводящая к удлинению молекулы и образованию поперечных связей. В результате получают твердые прочные полимеры. Такое свойство эпоксидных смол используется в заливочных и пропиточных компаундах. Вещества, добавляемые для превращения жидких смол в твердые полимерные соединения, называются **о т в е р д и т е л я м и**. Отвердители реагируют с эпоксидными смолами, не выделяя летучих веществ или выделяя их незначительно.

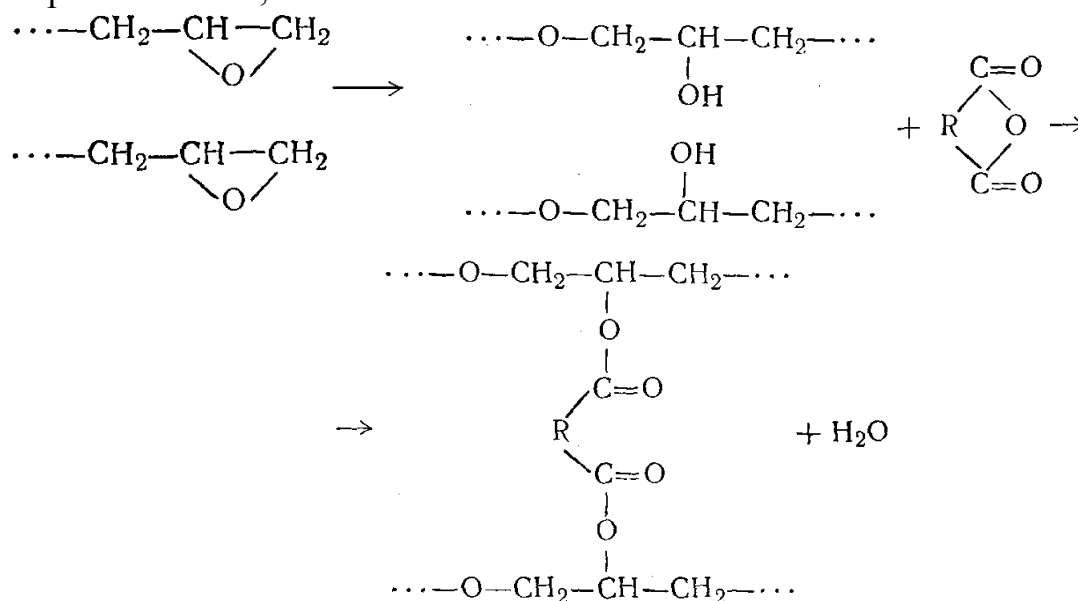
Отвердители подразделяют на два класса: отверждающие на холоду и отверждающие при нагревании. К первым относят в основном амины, ко вторым — кислоты и ангидриды кислот.

Наиболее распространенным в технологии производства ТРИ является отвердитель ангидридного типа:



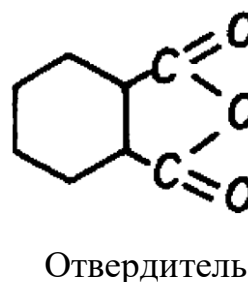
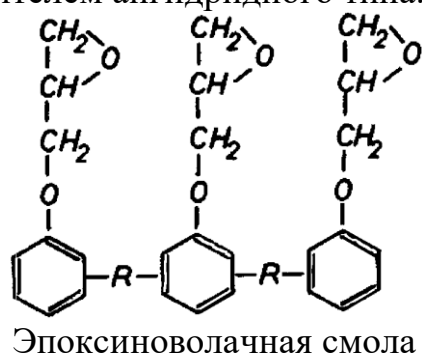
Эпоксидные смолы совмещаются и вступают во взаимодействие с реакционными группами новолачных, резольных, мочевиноформальдегидных, полиэфирных и полиамидных смол.

Для получения термореактивных эпоксидных соединений электроизоляционного назначения в основном используют двухосновные кислоты и их ангидриды, вступающие в реакцию конденсации с гидроксильными группами эпоксидных смол, и образуя эфирные поперечные связи;



Создание поперечной связи (переход в ТР-стадию) сопровождается потерей плавкости и растворимости. Температура, соответствующая началу этого процесса — температура начала отверждения ($T_{н.о.}$).

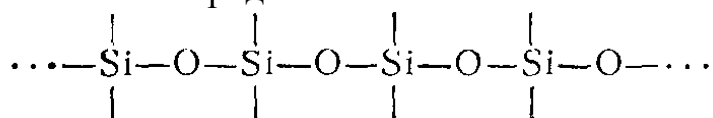
Преимущество эпоксидных смол в отвержденном состоянии — высокая механическая прочность, водостойкость, высокая электрическая прочность, хорошая адгезия к полярным соединениям, металлам, фарфору, слюде и др. Смеси низкомолекулярных смол с отвердителями в исходном состоянии имеют малую начальную вязкость и обладают хорошей пропитывающей способностью. Существенное достоинство эпоксидных смол — малая усадка при переходе в твердое состояние. Она составляет 0,05—2%, тогда как у полиэфирных компаундов достигает 10%. В настоящее время широкое применение для производства материалов систем изоляции электрических машин нашли **эпоксисоволачные смолы** с отвердителем ангидридного типа.



Все эти преимущества определили применение эпоксидных смол в электротехнике и радиоэлектронике в качестве пропиточных и заливочных, клеящих и герметизирующих составов.

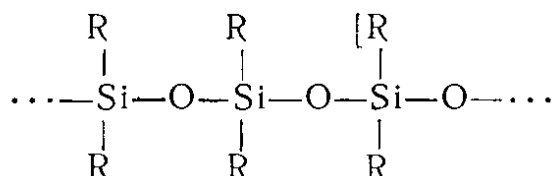
Кремнийорганические полимеры.

Кремнийорганические полимеры — это класс высокомолекулярных соединений, отличающийся от всех ранее рассмотренных тем, что в построении главной цепи полимера участвует атом кремния. Наибольшее практическое применение имеют кремнийорганические полимерные соединения, главная цепь которых построена из атомов кремния, чередующихся с атомами кислорода:



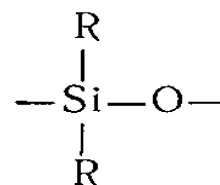
Структура полимерной кремнийорганической макромолекулы может быть линейной и пространственной.

Структура линейного полиорганосилоксана:



где R — органические радикалы: CH₃, C₂H₅, C₆H₅ и др.

Повторяющееся звено в этом полимере:



В пространственной структуре атомы кремния отдельных цепей соединены через кислород (силоксановая связь):

В кремнийорганических полимерах проявляется преимущество силоксановой связи — ее высокая термическая устойчивость. Вместе с тем **углеводородные радикалы**

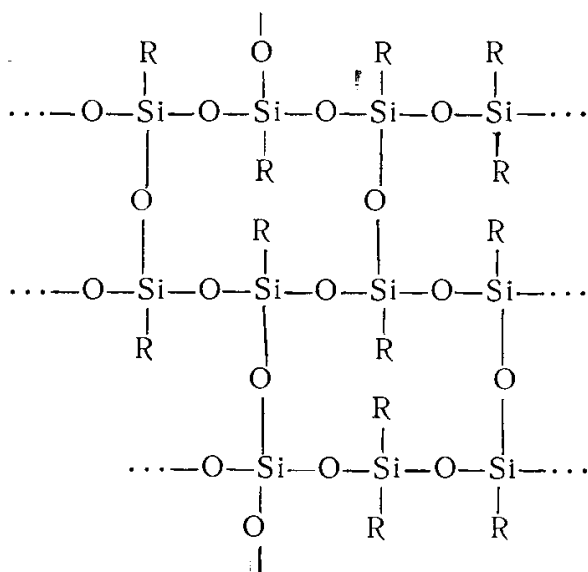
придают полимерам гибкость, эластичность и способность растворяться в органических жидкостях. Чем больше число органических радикалов, приходящихся на один атом кремния, или чем меньше число

поперечных связей, тем выше эластичность полимера. Наиболее эластичны линейные кремнийорганические полимеры, у которых на один атом кремния приходится два органических радикала. В этом случае полимерные цепи связаны между собой только межмолекулярными силами, дающими возможность цепям, в отличие от химических связей, перемещаться друг относительно друга. Поперечные химические связи повышают твердость и прочность кремнийорганических полимерных веществ. Если число поперечных связей невелико и расположены они редко, то соединения более прочны, чем линейные, и в то же время сохраняют высокую гибкость и эластичность, свойственную резинам. Когда образуются пространственные структуры с частыми поперечными связями, получают прочные твердые нерастворимые вещества, обладающие различной степенью эластичности в зависимости от числа поперечных связей.

Многообразие структур и свойств кремнийорганических полимеров определяется не только различием в числе поперечных связей, но и степенью поликонденсации и характером органического радикала.

В связи с различным назначением смол и лаков на их основе существует много типов и марок этих продуктов. Их можно разделить на следующие группы: полиэтилфенилсилоксановые лаки (ЭФ-3, ЭФ-5); полиметилфенилсилоксановые немодифицированные лаки (обозначаются буквой К и цифрой, соответствующей тому или иному лаку, например К-40, К-41); полиметилфенилсилоксановые лаки, модифицированные полиэфирами (К-44, К-47, К-48 и К-54); лаки на основе полиметилфенилсилоксанов и эпоксидных смол.

Лаки на основе кремнийорганических смол применяют в качестве связующих различных электротехнических изделий.



Электроизоляционные материалы, пропитанные кремнийорганическими лаками, могут длительно работать при 180° С (класс изоляции Н). Лаковые пленки из полиорганосилоксанов устойчивы к действию влаги, химически инертны, противостоят длительному действию солнечного света. По сравнению с лаками на основе органических полимеров кремнийорганические лаки высыхают более продолжительное время и при более высоких температурах.

Все электроизоляционные материалы (ЭИМ), используемые в электрических машинах, можно разделить на три группы: обмоточные провода, пропиточные составы и композиционные материалы для витковой и корпусной изоляции.

§ 2. Обмоточные провода

Обмоточные провода разделяются на 4 группы: с эмалевой изоляцией; с пленочной изоляцией; стекловолокнутой и эмалевостекловолокнутой, и слюдосодержащей изоляцией.

2.1 Эмалированные провода

Наиболее распространенной группой обмоточных проводов являются эмалированные провода, которые имеют более тонкую изоляцию, что позволяет увеличить в электрических машинах коэффициент использования паза. К обмоточным проводам предъявляется ряд требований, контролируемых специальными испытаниями.

1. Эластичность – определяется способностью изоляции выдерживать нагрузку на растяжение вплоть до разрыва провода без повреждения (образования трещин) в изоляции. Для проводов с относительно большим диаметром (более 0,4) эластичность проверяется способом навивки провода на стержень определенного (по стандарту для данного провода) диаметра, при этом в изоляции не должны возникать трещины.

2. Стойкость к тепловому удару – оценивается способностью изоляции выдерживать быстрое изменение температуры при одновременном нагружении изоляции на изгиб (обмоточный провод навивают в спираль определенного диаметра).

3. Стойкость изоляции к истиранию и ее адгезия к проводнику.

Первая характеристика определяется на скребковом приборе путем истирания изоляции стальной иглой при ее возвратно-поступательном перемещении по поверхности изоляции. Численно прочность на истирание определяется числом двойных ходов иглы по поверхности эмали до ее полного разрушения – истирания. Адгезия эмали к проводнику выявляется при испытаниях на растяжение провода.

4. Термопластичность изоляции — это характеристика, определяемая только для эмалевой изоляции, представляет собой способность размягчаться при повышенных температурах.

5. Пробивное напряжение—один из важнейших параметров, определяющих работоспособность проводов.

Все перечисленные свойства изоляции обмоточных проводов обусловлены условиями изготовления самой обмотки (изгибами, натяжениями и т.д.) и эксплуатационными воздействиями. Например, определение стойкости к тепловому удару необходимо для оценки работоспособности изоляции в экстремальных условиях; требование стойкости изоляции к истиранию учитывает такие эксплуатационные воздействия, в результате которых проводники смещаются относительно друг друга; оценка термопластичности эмалевой изоляции позволяет исключить размягчение изоляции и как следствие этого — замыкания витков обмотки; уровень пробивного напряжения изоляции обмоточных проводов в машинах со насыпной обмоткой определит их стойкость к коммутационным перенапряжениям.

Для производства эмалей используются смолы, сохраняющие в полимеризованном состоянии эластичность. Они рассмотрены в § 1 и конкретно указаны в табл. 1, где приведены характеристики основных типов эмалированных проводов, используемых для обмоток электрических машин.

С поливинилацеталевой и полиэфирной изоляцией выпускаются также алюминиевые провода ПЭВА и ПЭТВА, их ТИ выше и составляет у ПЭВА — 130°C, у ПЭТВА — 155°C. Повышенная нагревостойкость объясняется большей пассивностью алюминия по отношению к изоляции по сравнению с медью в процессе теплового старения. По электрическим параметрам изоляции провода марки ПЭТВА и ПЭТВ равноценны, однако стойкость к истиранию у алюминиевых проводов ниже.

Для электродвигателей, намотка которых производится механизированным способом, применяются круглые провода марок ПЭТВМ, ПЭТМ с диаметром 0,25 ... 1,4 мм. Они имеют несколько большую толщину изоляции, повышенную механическую прочность и стойкость к тепловому удару. (Свойства обмоточных эмалированных проводов должны быть изучены по учебному пособию [13, с. 279—302].)

Исследование свойств, представленных в этом разделе обмоточных проводов при длительном нагреве показало, что они сохраняют установленное значение пробивного напряжения (или другого параметра) в течение не менее 20000 ч.

Повышение ТИ изоляции обмоточных проводов достигается введением и увеличением в лакооснове числа ароматических и имидных групп, т.е. созданием циклоцепных полимеров с высокой симметричностью структуры. (полиимидов, полиамидимидов). В табл.2 представлены примеры наиболее распространенных обмоточных проводов с эмалевой изоляцией.

Таблица 2

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией

Марка и стандарт	Температурный индекс, °C	Размер, мм	Тип изоляции	Область применения, основные характеристики
ПЭТВ-1	130	0,05-1,6	Полиэфир	Для обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Нагревостойкий, высокая стойкость к трансформаторному маслу. Термопластичность ПЭТВ-1-180°C ПЭТВ-2-200°C
ПЭТВ-2		0,06-2,5		
ПЭТ-155	155	0,06-2,5	Модифицированный полиэфир	Для обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Нагревостойкий, высокая стойкость к трансформаторному маслу. Термопластичность 240°C.
ПЭТМ-155	155	0,05-2,0	Модифицированный полиэфиримид	Для механизированной намотки электродвигателей. Устойчив к высоким термическим и механическим воздействиям. Термопластичность 250°C
ПЭТВМ	130	0,25-1,4	Полиэфир	Для механизированной намотки статоров электродвигателей. Повышенная механическая прочность. Термопластичность 200°C.
ПЭФ-155	155	0,063-1,8	Полиэфир-циануратимид	Для намотки изделий механизированным способом. Нагревостойкий, устойчив против хладагентов и масел. Термопластичность 240°C.
ПЭТД-180	180	0,2-2,0	Модифицированный полиэфиримид+полиамидимид	Для механизированной намотки. Для изделий с максимальными термическими и механическими нагрузками. Нагревостойкий, устойчив против химикатов. Термопластичность 260°C.

2.2 Обмоточные провода с пленочной изоляцией

Обмоточные провода с пленочной изоляцией используются для обмоток электрических машин, работающих в специфических условиях одновременного воздействия нагрева, вибрации, агрессивных сред, влажности и др., погружных двигателей, обмотки подвергаются воздействию жидкой среды.

Условия работы погружного электродвигателя в скважине небольшого диаметра (до 425 мм) определяют особенности его конструкции — малый диаметр при большой длине, полностью закрытый паз. Подобная конструкция паза статора требует изготовления обмотки

методом многократной протяжки провода, поэтому изоляция провода должна иметь высокую механическую прочность.

Один из первых типов обмоточных проводов для таких условий — провод с комбинированной эмалевой и пленочно-волокнутой изоляцией, использованный для обмоток с напряжением 1000 ... 2000 В, ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4. Изоляция этих проводов состоит из слоя полиэтилентерефталатной эмали, трех (четырех) слоев лавсановой пленки и двух слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой полиэфирной смолой. Недостатком этих проводов являются низкая нагревостойкость, их температурный индекс — 120°C. Провода типа ПЭТВПДЛ успешно заменяются нагревостойкими проводами со спеченной пленочной фторопластовой и полиимидно-фторопластовой изоляцией, которые могут эксплуатироваться в водозаполненных электродвигателях на напряжение 380 В, работающих в среде воды и пластовой жидкости при температуре +180°C и давлении до 20 МПа. Некоторые марки нагревостойких обмоточных проводов для погружных, тяговых двигателей, а так же специальных электрических машин, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Провода обмоточные с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией

Марка провода	Температурный индекс (ТИ)	Номинальная толщина изоляции, мм	Эластичность изоляции	Фактическое пробивное напряжение, В, не менее В металлических шариках (* в воде)	Фактическая прочность изоляции к механическим воздействиям. Число двойных ходов иглы
ППИПК-Т прямоугольного сечения	200	удвоенная 0,16	Изгиб вокруг стержня, диаметр которого равен четырем размерам большой стороны провода	4000	>1000
ППИ-У круглого сечения	200	диаметральная 0,40	Навивание на стержень диаметром, трехкратным номинальному диаметру провода	12000 *	>1000

Следует отметить, что из представленных в табл. 3 проводов изготавливаются шаблонные секции, выпечка которых производится при 300...350 °С. При этой температуре происходит расплавление слоя

фторопласта на поверхности пленки, что обеспечивает оклейку проводников и влагозащиту конструкции. Применение незащищенной полиимидной пленки в погружных машинах, где возможно проникновение воды в обмотку, недопустимо из-за низкой гидролитической стойкости полиимида.

Провода ППИПКТ, ППИПК-1, ППИПК-2 - предназначены для изготовления:

- тяговых электродвигателей железнодорожного и городского транспорта;
- электрических машин карьерного оборудования;
- специальных типов электрических машин, обладающих уникальными характеристиками;

а провода ППИ-У, ППИ-УМ - для изготовления погружных электродвигателей нефтедобычи.

2.3. *Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией.*

Для повышения электрической прочности и надежности изоляции проводов относительно больших сечений на них наносится волокнистая оплетка, скрепляемая пропиточным лаком.

В электрических машинах наиболее широко используются провода со стекловолокнистой изоляцией, которые отличаются повышенной нагревостойкостью, электрической и механической прочностью и стойкостью к кратковременному превышению температуры.

Рассмотрим конструкции проводов с волокнистой изоляцией на примере следующих марок: ПСД-1, ПСД-939, ПСДК, ПСДК-Т.

Токопроводящая жила проводов изготовлена из медной проволоки прямоугольного или круглого сечения. На жилу двумя слоями наложена изоляция из стеклянных нитей с пропиткой термореактивным лаком - эпоксидно-полиэфирным (ТИ – 155⁰С) или кремнийорганическим (ТИ – 200⁰С).

Данные по характеристикам проводов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Провода медные со стекловолокнистой изоляцией

Марка провода	ТИ, °С	Номинальная толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение изоляции проводов, В, не менее (после испытания на эластичность)	Прочность изоляции к механическим воздействиям, число двойных ходов иглы, не менее
---------------	--------	----------------------------------	---	--

ПСДКТ; ПСДКТ-Л круглого сечения	200 ⁰ С	диаметральная 0,20-0,27	350-400	100
ПСДКТ; ПСДКТ-Л прямоугольного сечения	200 ⁰ С	удвоенная по сторонам «А-а» 0,26-0,32 «В-в» 0,22-0,30	350-550	150(ПСДКТ) 200(ПСДКТ-Л)
ПСДТ круглого сечения	F(155 ⁰ С)	диаметральная 0,20-0,27	400-450	150
ПСДТ прямоугольного сечения	F(155 ⁰ С)	удвоенная по сторонам «А-а» 0,28-0,40 «В-в» 0,28-0,38	400-450	300
ПСД-1	F(155 ⁰ С)	удвоенная по сторонам «А-а» 0,27-0,40 «В-в» 0,35-0,47	550-650	500
ПСД-Л	F(155 ⁰ С)	удвоенная по сторонам «А-а» 0,33-0,45 «В-в» 0,29-0,42	450-600	270
ПСДК-Л	⁰ С	удвоенная по сторонам «А-а» 0,33-0,45 «В-в» 0,29-0,42	450-600	270
ПСДП-934-П	F(155 ⁰ С)	удвоенная по сторонам «А-а» 0,31-0,35 «В-в» 0,31	600	250

Пробивное напряжение различных обмоточных проводов со стекловолокнистой изоляцией мало отличается, и его минимальное значение находится в пределах 300...600 В. Это объясняется тем, что пробой изоляции происходит по имеющимся воздушным промежуткам при приблизительно одинаковых толщинах изоляции.

Для создания более надежной изоляции обмоточных проводов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (обмотки электроподвижного состава) или рассчитанных на большой ресурс (до 200 000 ч), изготавливаются комбинации из эмалевой и стекловолокнистой изоляции. К ним относится провод ПЭТСД, предназначенный для длительной работы при 155⁰С. Диапазон диаметров круглых проводов 0,85...2,5 мм, диапазоны сечений прямоугольных 2,5...25,2 мм². Двойная толщина изоляции провода составляет 0,35...0,47 мм. Пробивное напряжение изоляции не ниже 800...1000 В.

Таблица 5

Провода медные с эмалево-стекловолокнистой изоляцией

Марка провода	ТИ, °C	Номинальная толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение изоляции проводов, В, не менее (после испытания на эластичность)	Прочность изоляции к механическим воздействиям, число двойных ходов иглы, не менее
круглого сечения ПЭТСД ПЭТВСД	H(180°C) F(155°C)	диаметральная 0,32	до d 1,12 мм- 800 св. 1,12 до 2,5мм - 1000	300
прямоугольного сечения ПЭТСД ПЭТВСД	H(180°C) F(155°C)	удвоенная по сторонам «А-а» 0,48-0,56 «В-в» 0,41-0,47	900	500

2.4 Провода со слюдосодержащей изоляцией.

Для высоковольтных электрических машин (высоковольтные электрические двигатели, турбо- и гидрогенераторы) разработаны провода с изоляцией, устойчивой к коронным частичным разрядам.

Конструкция провода:

ППС, ППС-2 - медная жила, слюдосодержащая лента;

ППЛС - медная жила, полиэтилентерeftалатная пленка, слюдосодержащая лента;

ППСС, ППСС-1 - медная жила, пленкостеклослюдяная лента.

Технические характеристики представлены в табл. 6.

Таблица 6

Провода прямоугольные медные для высоковольтных электрических машин (6-10 кВ) со слюдосодержащей изоляцией

Марка провода	Номинальная толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение изоляции в изогнутом состоянии, В	ТИ, °C
ППС	0,36	2000	155
ППС-2	0,72	6000	155
ППЛС	0,36	3000	155
	0,44	5000	155

§3. Пропиточные составы

3.1 Основные требования к пропиточным составам.

Пропиточные составы применяются для пропитки: материалов, обмоток электрических машин, слоистых пластиков.

От пропиточного состава требуется:

- хорошая пропитывающая способность при максимальном содержании лакоосновы (смолы);
- отсутствие вредного влияния на изоляцию обмоточных проводов и других ЭИМ;
- хорошая цементирующая способность, обеспечивающая отсутствие смещения витков, в особенности для роторных обмоток быстроходных машин;
- приемлемая для технологии серийного производства скорость сушки;
- высокие электрические характеристики при рабочей температуре в течение ресурса.

Лаковая пленка должна быть достаточно эластичной, чтобы допускать расширение и сжатие обмоток при колебании температуры и вибрацию проводника при пуске и остановке электродвигателя. Кроме этих общих требований к отдельным пропитывающим составам предъявляются требования, учитывающие условия эксплуатации: повышенная влагостойкость, повышенная нагревостойкость, химостойкость, хладостойкость и др.

Пропитывающие составы можно разделить на следующие группы:

- лаки, содержащие растворитель от 20 до 70 %;
- компаунды, не содержащие растворитель или содержащие до 10 % растворителя;
- водоэмульсионные лаки, представляющие собой эмульсии лаковых основ в воде.

Кроме этого, по изменению свойств при нагреве пропиточные составы разделяются на термореактивные, твердеющие в результате сшивания молекул (эпоксидные, кремнийорганические и др.), и термопластичные, твердеющие при охлаждении (некоторые полиэфирные и полиамидные и др.). Первые после отверждения при высокой температуре (160-180 °С) приобретают стабильные электрические и механические свойства, мало изменяющиеся при нагревании, у вторых при нагреве изменяется вязкость а, следовательно, и свойства. Так механическая прочность на растяжение (σ_p) с 35-40 Мпа при температуре 20°С снижается до 3,5...5,0 Мпа при 105°С.

В производстве современных электрических машин основное применение нашли термореактивные пропиточные составы, которые благодаря пространственной структуре макромолекулы полимера имеют более высокие и стабильные при нагревании электрические и механические свойства, так σ_p , равная (80÷100) Мпа при 20 °С, снижается всего лишь до (40÷50) Мпа при 130 °С.

Пропитка изоляционных систем и конструкций повышает механическую и электрическую прочности, влагостойкость, теплопроводность и нагревостойкость.

Однако, качество пропитанной изоляции зависит от правильности выбора пропиточного состава, способа пропитки и сушки, которые определяются:

- конструкцией изоляции обмотки;
- условиями работы в электрической машине (номинальное напряжение, механические нагрузки, влажность окружающего воздуха и др.)

3.2 Технология пропитки систем изоляции.

3.2.1. Изготовление предварительно пропитанной ленты

Основные компоненты для изготовления ленты:

- стеклоткань;
- слюдяная бумага;
- пропиточный лак.

Основные этапы процесса изготовления стеклослюдяного полотна:

- пропитка стеклоткани лаком и армирование со слюдяной бумагой;
- пропитка слюдяной бумаги;
- сушка;
- намотка стеклослюдяного полотна;
- перематка стеклослюдяного полотна и резка его на требуемую ширину в виде лент.

Изготовление стеклослюдяного полотна производится на горизонтальной пропиточной машине, принципиальная схема которой приведена на рис. 2

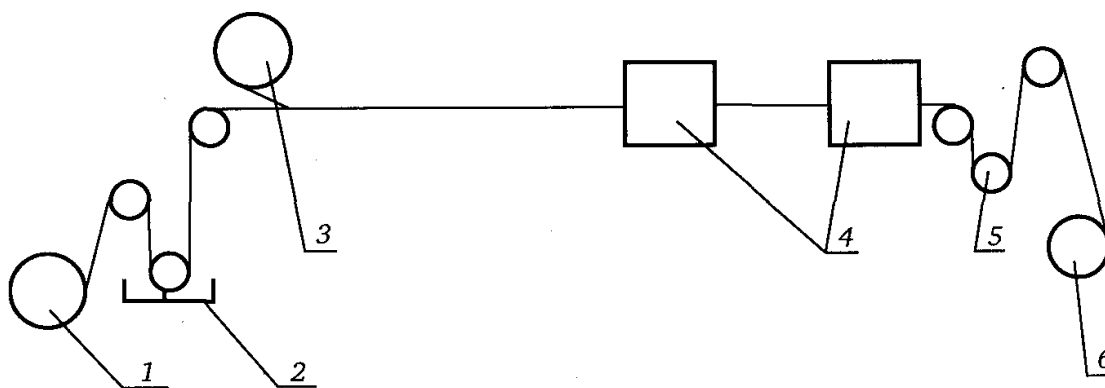


Рис. 2 Технологическая схема изготовления предварительно пропитанной ленты:

- 1 — нижнее отпусковое устройство для размотки стеклоткани;
2 — ванна для раствора лака; 3 — отпусковое устройство для слюдяной бумаги;
4 — сушильные камеры; 5 — тянущий трехвалковый механизм;

Стеклоткань окунается в ванну с пропиточным лаком. На выходе из ванны пропитанная стеклоткань совмещается со слюдяной бумагой и поступает в первую сушильную камеру. Количество связующего, увлекаемого рулонным пористым наполнителем в процессе непрерывной пропитки зависит от скорости движения полотна.

Процентное содержание связующего пропорционально скорости движения слюдяного полотна и составляет (32-40)%. В момент соприкосновения бумажного полотна с пропиточным составом связующее интенсивно впитывается в бумагу и проникает в толщу листа, заполняя открытые поры бумаги. Дальнейшее перераспределение связующего происходит под действием нагрева в сушильных зонах пропиточной машины. После второй сушильной камеры стеклослюдяное полотно наматывается на приемном устройстве.

Отдельно необходимо остановиться на процессе сушки (рис. 2, поз.4). Температура в камерах сушки должна обеспечивать постепенное удаление растворителя при сохранении целостности композиции стеклоткань-слюдобумага, причем уровень $T_{\text{сушки}}$ ниже температуры начала отверждения.

Основным требованием к изготавливаемому материалу является — содержание экстрагируемых (более 97 %).

Стабильность химической структуры связующего (неотвержденность) должна сохраняться до начала изготовления изоляции (намотки ленты), что в процессе хранения контролируется показателем текучести (ГОСТ 26103-84 “Материалы электроизоляционные на основе слюдобумаг”).

В настоящее время основное применение получила лента Элмикатерм 55409 на эпоксиноволачном связующем.

3.2.2. Технология пропитки обмоток

Процесс пропитки обмоток состоит из следующих операций:

- сушка до пропитки;
- пропитка - введение определенного количества лакоосновы;
- сушка после пропитки, состоящая из удаления растворителя и “запечки” (отверждение термореактивной основы лака)

Для каждого типа обмоток и химического состава пропиточного вещества время сушки при выбранной температуре устанавливают опытным путем — получением «кривых сушки» $R_{из}(t)$, определяющих время, в течение которого достигается стабилизация значений сопротивления изоляции. На рис. 3 приведены «кривые сушки» для изоляции - типичные зависимости $R_{из}(t)$ до пропитки (рис. 3, а) и после пропитки (рис. 3, б).

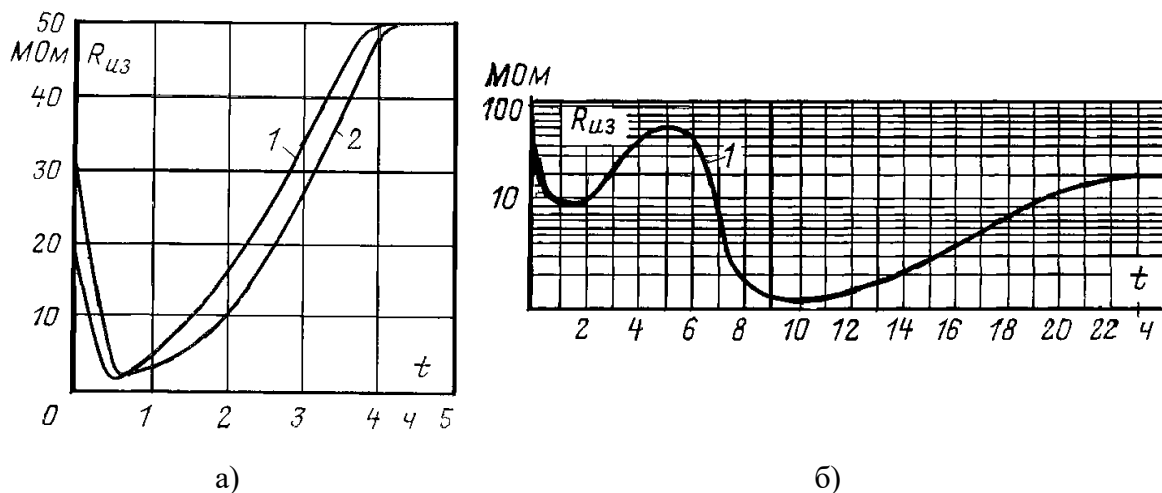


Рис. 3 Зависимость сопротивления от времени сушки:

- а) до пропитки (1. двигатель А-91-6, 2. двигатель А-92-4)
 б) после пропитки (пропитка погружением)

Основные способы пропитки:

Погружение в лак — пропитываемое изделие погружают в ванну с лаком, и лак под действием гидростатического давления и капиллярных сил проникает в обмотку, вытесняя воздух. Сушка пропитанного изделия проводится в две стадии: удаление растворителя и термообработка, необходимая для отверждения смолы.

Струйный способ (или капельный). Статор или якорь подключают к источнику электрического тока, который производит нагрев обмотки. Температура нагрева регулируется. В нагретую обмотку 1 через сопло 2 тонкой струей подается пропиточный состав 3 (рис. 4). При этом пропитываемое изделие находится в наклонном положении и вращается. Пропиточный состав подается на наружную и внутреннюю поверхности лобовой части обмотки и вследствие наклонного положения пропитываемого изделия, а также под действием

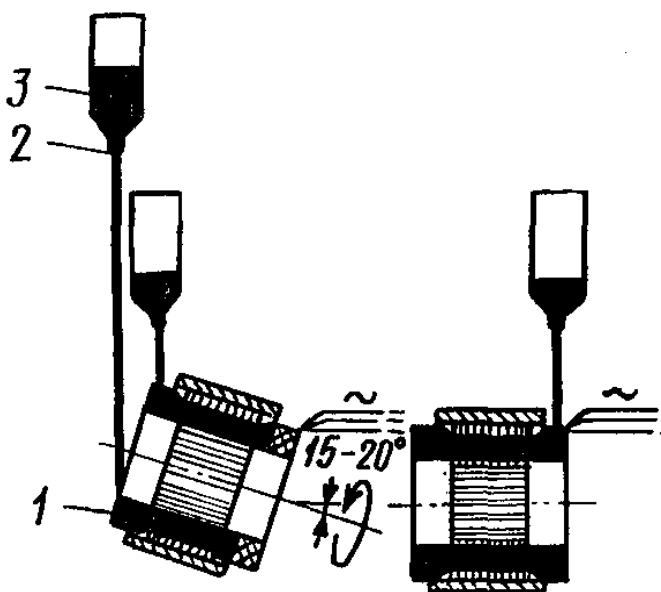


Рис. 4 Струйный способ пропитки

капиллярных сил проникает через пазы между проводниками обмотки в нижнюю лобовую часть. По окончании пропитки статор (или якорь) поворачивается в горизонтальное положение и продолжает вращаться. При этом пропиточный состав равномерно распределяется в лобовых частях обмотки. Температура обмотки начинает повышаться, происходит желатинизация, а затем полное отверждение пропиточного состава.

Вакуум-нагнетательная пропитка лаком (ВНП).

Изделие помещают в автоклав, создают вакуум и, сохраняя его, подают в автоклав лак. Когда уровень лака станет выше изделий, создают давление. После снятия давления еще раз создают вакуум и только после этого извлекают изделия из автоклава. Режим вакуум — давление эффективен. Вакуумная сушка уменьшает время сушки в среднем на 25 ... 50%. Отсутствие воздуха в изделии способствует глубокому проникновению лака в обмотку, усиливается этот процесс при создании давления. Рассмотрим пример применения ВНП при использовании лака ПЭ-933 для изоляции статорных обмоток электрических машин общего назначения.

Перечень последовательных операций:

1. Предварительная сушка
2. Поступление пропитываемых изделий в автоклав (АВ)
3. Герметизация АВ
4. Вакуумирование, остаточное давление (67-5,3) кПа
5. Подача пропиточного лака
6. Создание давления – 200 кПа (нагнетание сжатого азота)
7. Вакуумирование – 67 кПа

8. Создание давления

Далее производят уравнивание давления, выемку изделий из АВ и размещение их в камере сушки.

Для лака ПЭ-933 режим сушки двухступенчатый:

1 - $T=130^{\circ}\text{C}$ - 1 час

2 - $T=(150-160)^{\circ}\text{C}$ - 3 часа

Характер «кривой сушки» соответствует рис. 2, б).

В табл. 7 приведены основные пропиточные составы для обмоток электрических машин и область их применения.

Таблица 7

Марка	Химическая природа лакоосновы	ТИ, $^{\circ}\text{C}$	Область применения
ЛАКИ			
321-Т	Масляно-алкидный	105	Пропитка обмоток статоров и роторов асинхронных двигателей $P \leq 100\text{кВт}$, напряжением до 600 В
ФЛ-98	Феноло-алкидный	130	Пропитка обмоток электрических машин
МЛ- 92	Алкидно-меламиновые	130	Пропитка обмоток электрических машин, аппаратов и трансформаторов. Покрытие электроизоляционных деталей.
ПЭ-933	Полиэфирноэпоксидный	155	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов класса F, в том числе работающих в условиях тропического климата. Пропитка стеклолент для стекловолоконного бандажа тяговых и других электродвигателей (марки Л)
ИД-9152	Полиэфиримидно-изоциануратный	180	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов классов В, F и Н
КО-964	Кремнийорганический	180	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов класса Н повышенной надежности, в том числе морского исполнения. Допускает кратковременную работу при температуре до 250°C .
КО-916К	Кремнийорганический, модифицированный полиэфиром	180	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов классов F и Н нормального, морского и тропического исполнения.
КОМПАУНДЫ			
ЭКД-14	Эпоксидный, модифицированный, отверждаемый амином АМ-14	155	Пропитка преимущественно струйным методом обмоток влагостойкого и тропического исполнения с рабочей температурой от -60 до $+155^{\circ}\text{C}$
110	Эпоксидный модифицированный олигоэфиракрилатом	155	Производство стекло слюдинитовых лент, применяемых при изоляции турбо и гидрогенераторов (изоляция ВЭС-2)
ЭПСК	Эпоксидный модифицированный стиролом	130	Пропитка и промазка стекломикаленты и стеклослюдинитовых лент, применяемых при изоляции турбо- и гидрогенераторов (изоляция ВЭС-1)

ПК-11	Эпоксидные немодифицированные	155	Пропитка стержней высоковольтных электрических машин и других электротехнических изделий класса нагревостойкости F.
ЭПК-101	Эпоксидный, модифицированный полиэфиром	155	Пропитка и заливка деталей, микросхем, кремниевых полупроводниковых приборов, работающих длительно при температуре от -60 до + 130 °С
К-115, К-168, К-201	Эпоксидные модифицированные полиэфиром	155	Заливка и пропитка статорных обмоток погружных двигателей, а также заливка блоков дросселей и резисторов
ЭЗК-8/4	Эпоксидный	155	Заливка статорных обмоток погружных электродвигателей и других электротехнических изделий класса нагревостойкости F.
Б-ИД-9147	Ненасыщенный олигоэфиримидизоциануратный	180	Пропитка струйным методом обмоток машин и аппаратов класса Н с высотой оси вращения до 250 мм, а также обмоток машин общего, тропикостойкого и взрывозащищенного исполнения
К-67, К-67Ф	Кремнийорганические	155	Пропитка обмоток оборудования с длительной рабочей температурой 180 °С. Допускают кратковременную температуру до 250 °С. К-67 - пропитка обмоток электрооборудования с повышенными требованиями к цементации, К-67Ф - к термозластичности

Следует отметить, что основными характеристиками пропиточных составов, определяющими технологию изготовления изоляции, а также свойства пропитанной изоляции, являются вязкость, содержание растворителя, время желатинизации (температура и время гелеобразования), а также цементация - прочность сцепления между проводниками.

Технологические приемы с помощью горячего погружения и струйный способ применяются для обмоток низковольтных электрических машин.

Для обмоток электрических машин высокого напряжения используются технологии “пропитанных лент” и вакуум-нагнетательная пропитка (ВНП), которые будут рассмотрены при анализе изготовления катушечной и стержневой обмоток крупных электрических машин.

В последнее время наметилась тенденция к большому использованию компаундов, что объясняется не только причинами экологического порядка ввиду меньшей токсичности, но и соображениями экономического характера в сочетании с качеством и скоростью обработки составами, не содержащими растворителя.

§ 4. Совместимость материалов

4.1 Основные понятия.

Под совместимостью понимается свойство системы из различных ЭИМ совместно работать в определенных условиях эксплуатации и в определенных конструкциях без взаимного или одностороннего отрицательного воздействия, снижающего качество конструкции в целом.

При выборе материалов для обмоток электрических машин очень важно оценить совместимость изоляции обмоточного провода и пропиточного состава. Разрушение изоляции провода, в частности эмалевой, может произойти на стадии пропитки, термообработки и длительного нагрева. Проанализируем возможные изменения. В процессе пропитки и сушки обмотки эмаль провода по всей поверхности контактирует с пропиточным материалом, находящимся в жидком состоянии, при повышенной температуре. Вследствие взаимодействия растворителей и реакционноспособных компонентов пропиточных материалов могут происходить размягчение и набухание эмали. После термообработки такой системы пробивное напряжение, нагревостойкость и влагостойкость ее могут оказаться ниже, чем у системы непропитанной. Такое же изменение свойств может произойти при длительном нагреве изоляции в процессе эксплуатации в результате растрескивания и расслоения системы “пропиточный состав – эмаль”. Причиной возникновения дефектов являются внутренние напряжения ($\sigma_{вн}$), которые могут быть соизмеримы с когезионной и адгезионной прочностью полимеров, достаточной для их растрескивания и расслоения.

При близком расположении элементарных проводников (например, во всыпной обмотке) возникает эффект взаимного влияния и суммарная кривая 3 напряжений (рис. 5), действующих в полимере в сечении ВС может быть определена как сумма ординат кривых 1 и 2, представляющих распределение $\sigma_{вн}$ одиночного армирования, и увеличивающих при уменьшении расстояния между проводниками. Это свидетельствует о том, что процесс разрушения межвитковой изоляции зависит от таких параметров обмоточных проводов, как коэффициента заполнения паза, диаметра проводника и толщины изоляции.

Основными процессами, определяющими кинетику старения, являются те, которые протекают не в объеме полимера, а на границе сред “проводник – эмаль”.

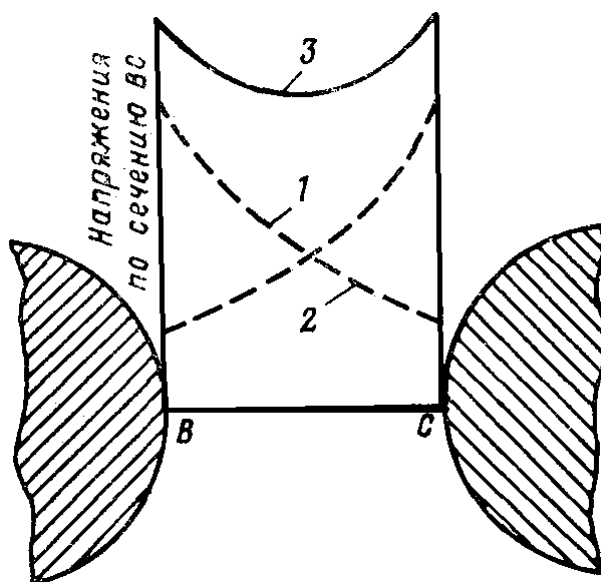


Рис. 5. Эффект взаимного влияния проводников.

- 1 — кривая распределения внутренних напряжений от левого проводника;
- 2 — кривая распределения напряжений от правого проводника;
- 3 — суммарная кривая.

При оценке совместимости системы необходимо учитывать, во-первых, соотношение распределений прочности на растяжение пропитывающего состава σ_p и внутреннего напряжения $\sigma_{вн}$, где $\sigma_{вн}$ для дефектов различных случаев определяется по следующим формулам.

- Для одноосного растяжения (полимер в устройствах продолговатой формы, трубки, пазы и т.п.)

$$\sigma_{\hat{a}i} = -(\alpha_i - \alpha_m) \Delta \dot{O} \cdot \dot{A}, \text{ где } \alpha_m - \text{ТКЛР металла;}$$

α_n и E – ТКЛР и модуль упругости полимерного материала;

ΔT – разность эксплуатационной температуры T_3 и температуры стеклования – T_c .

- Для двухосного растяжения (тонкие слои, нанесенные на твердые подложки – эмаль в лобовых частях, лаковые покрытия

$$\sigma_{\hat{a}i} = -\frac{(\alpha_i - \alpha_i) \Delta \dot{O} \cdot \dot{A}}{1 - \mu}, \text{ где } \mu - \text{коэффициент Пуассона}$$

полимерного материала

- Для трехосного нагружения (толстые слои полимерных материалов)

$$\sigma_{\hat{a}i} = -\frac{(\alpha_i - \alpha_i) \Delta \dot{O} \cdot \dot{A}}{1 - 2\mu}, \text{ где величина } \mu \text{ для}$$

высокоэластичного состояния – 0,45;

для стеклообразного – 0,33.

Дефект образуется, если происходит пересечение функций распределений этих величин ($\sigma_{вн \max} > \sigma_{p \min}$) и вероятность образования дефекта пропорциональна заштрихованной площади под пересекающимися кривыми (рис. 6).

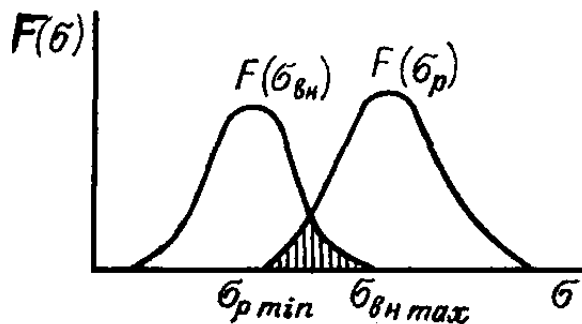


Рис. 6

Во-вторых, должно быть учтено соотношение тангенциальной составляющей

внутреннего напряжения $\tau_{вн}$ и адгезионной прочности эмали τ_a . Отслоение пропиточного материала от эмали произойдет, если $\tau_{вн} \geq \tau_a$.

Наиболее типичные случаи совместимых и несовместимых систем при использовании в качестве пропиточных материалов термореактивных составов, обладающих жесткостью, большей, чем у эмали, т.е. $E_3 < E_c$, где E_3 и E_c – модули упругости эмали и пропиточного состава соответственно.

1) $\sigma_{p \min} > \sigma_{вн \max}$ (нет заштрихованной площади) и $\tau_{вн \max} < \tau_{a \min}$ – совместимая система, не подверженная растрескиванию и расслоению. Для таких систем характерно сохранение высокого уровня пробивного

напряжения (U_{np}) в процессе теплового старения. Это объясняется тем, что, во-первых, эмаль не повреждается и, во-вторых, пропиточный состав обеспечивает высокую цементацию и герметизацию провода.

2) $\sigma_{p \min} < \sigma_{вн \max}$ (есть заштрихованная площадь) и $\tau_{вн \max} < \tau_{a \min}$ - растрескивание происходит, U_{np} снижается.

3) $\sigma_{p \min} < \sigma_{вн \max}$ (есть заштрихованная площадь) и $\tau_{вн \max} > \tau_{a \min}$ - происходит отслоение эмали, U_{np} может не измениться, а цементация витков ухудшается.

Во втором и третьем случаях создаются условия для интенсификации процессов теплового старения.

Необходимо отметить, что при использовании эластичных пропиточных составов, т.е. при условии $E_э > E_c$, наблюдается повсеместное отслоение пропиточного материала от эмали. Взаимодействие материала с эмалью в данных системах характеризуется условиями $\sigma_{вн \max} > \sigma_{p \min}$ и $\tau_{вн \max} \geq \tau_{a \min}$.

Аналитический срок службы по адгезии определяется известным выражением (формула Журкова) [] $\tau = \tau_0 \exp(u_0 - \gamma\sigma)$,

где τ - срок службы при заданной температуре; $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-13}$ с - константа; u_0 - энергия активации разрушения адгезионной связи, Дж/моль; γ - безразмерная величина, зависящая от граничного слоя полимера, прилегающего к субстрату, и толщины полимерной пленки; σ - внутренние напряжения в полимере, МПа.

После пропитки с увеличением толщины слоя полимера на проводнике внутренние напряжения в эмалевой пленке могут возрасти. В этом случае согласно можно ожидать снижения срока службы по адгезии, причем снижение будет тем больше, чем толще и жестче пленка состава.

С другой стороны, срок службы эмалевой изоляции после пропитки пропиточным материалом зависит от энергии активации разрушения адгезионной связи эмалевой пленки к проволоке. Чем выше энергия активации, тем больше адгезионная способность эмали к проволоке и тем больше может быть срок службы.

Оценка совместимости в процессе теплового старения на системах изоляции требует больших затрат на изготовление образцов-макетов, оборудование и т.д., поэтому для уменьшения объема этих работ используют экспресс-методы предварительной оценки совместимости: оценку твердости (определяется химическая совместимость пропиточных материалов с эмалированными проводами) и оценку при тепловом воздействии с помощью термогравиметрического индекса (ТГМ) исходных материалов и системы изоляции в целом.

4.2 Химическая совместимость пропиточных составов с эмалированными проводами.

Взаимодействие в процессе пропитки.

В процессе пропитки и сушки обмотки эмаль провода по всей поверхности контактирует с пропиточным материалом, находящимся в

жидком состоянии при повышенной температуре. Вследствие взаимодействия растворителей и реакционноспособных компонентов пропиточных материалов могут происходить размягчение и набухание эмали, образование в ней дефектов, которые приводят к ослаблению изоляции.

Воздействие пропиточных материалов и растворителей на пленку эмали характеризуется следующими показателями:

- 1) размягчением эмали;
- 2) изменением пробивного напряжения после запечки пропиточного материала;
- 3) изменением нагревостойкости пропитанных образцов по сравнению с непропитанными.

Воздействие растворителей может иметь или обратимый характер, выражающийся в набухании эмали, или необратимый характер, выражающийся в растрескивании эмали. Такая классификация носит условный характер, так как набухание эмали и последующая ее сушка могут быть причиной таких дефектов, как потеря адгезии и отслоение эмали от меди, которые выявляются лишь в процессе эксплуатации.

Влияние растворителя усиливается при повышении температуры и зависит от механических напряжений в пленке эмали, вызванных растяжениями при намотке, а также в местах изгиба проводов. Растворитель активнее действует на растянутые провода, так как в них эмаль находится в напряженном состоянии.

Оценка стойкости изоляции эмалированных проводов к действию пропиточных материалов и растворителей

Разработаны и применяются методы исследования влияния агрессивных сред, растворителей и пропиточных материалов на механическую прочность эмалевой изоляции. Эти методы позволяют оценить степень размягчения изоляции после воздействия растворителей и пропиточных материалов и судить о химической совместимости эмали с пропиточным материалом.

При исследовании твердости эмалевой изоляция образцы проводов выдерживаются в соответствующей среде при 60°C в течение 30 мин. После извлечения из среды они протираются мягким материалом и испытываются (процарапываются) карандашами с грифелем различной твердости. В соответствии с рекомендациями МЭК 251.1 применяются карандаши твердостью от 6В до 7Н.

Пример на определение химической совместимости представлен в таблице 8.

Таблица 8

Стойкость изоляции эмалированных проводов к растворителям

а	пр	ов	оя	ни	и	(б)	Твердость карандаша* для растворителя
---	----	----	----	----	---	-----	--

		Ацетон	Уайт-спирит	Толуол	Этиловый спирт
ПЭТВ	3Н	2В	3Н	2Н	Н
ПЭТ-155	3Н	3В	3Н	3Н	2Н
ПЭТ-200	7Н	4Н	6Н	6Н	5Н
ПНЭТ-имид	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н

* 7Н – наиболее твердый карандаш, 6В - наиболее мягкий.

Изоляция провода признается совместимой с растворителем, если не происходит снижения ее твердости; как правило, приводящей к изменению механической и электрической прочности.

Таблица 9

Изменение пробивного напряжения изоляции эмалированных проводов при воздействии растворителей

Растворитель	Среднее пробивное напряжение для проводов, кВ	
	ПЭТВ	ПЭТ-155
Без растворителя	8,5	5,1
Толуол	8,4	4,6
Уайт-спирит	8,1	5,3
Ацетон	7,1	4,8

Таблица 10

Стойкость изоляции эмалированных проводов к пропиточным лакам

Марка провода	Твердость карандаша		
	В исходном состоянии	После воздействия пропитывающего состава	
		лак ПЭ-933	компаунд КП-34
ПЭВТ	3Н	НВ	2Н
ПЭТ-155	3Н	3Н	3Н
ПЭТ-200	7Н	7Н	6Н

ПНЭТ- имид	2Н	2Н	2Н
---------------	----	----	----

4.3 Физические методы исследования совместимости

О совместимости можно судить по таким показателям, как прочность на разрыв и адгезионная прочность, изменение цвета, набухание или расслоение и др. Для оценки совместимости могут быть использованы исследования температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и термогравиметрический анализ.

Термогравиметрический анализ широко применяется для изучения свойств отдельных материалов и их сочетаний. Разработаны методы исследования совместимости сочетаний материалов в широком диапазоне температур.

Один из методов применения (использования) термогравиметрического анализа для исследования совместимости основан на использовании термогравиметрического (ТГМ) индекса. По этому методу ТГМ индекс определяется по кривой температурной зависимости потери массы, снятой при подъеме температуры со скоростью 1°С/мин, и характеризует сравнительную нагревостойкость компонентов системы изоляции в отдельности и их сочетаний. В качестве эталона для сравнения принят ТГМ индекс полиимидной пленки, равный 240. Такой прием объясняется тем, что полиимидная пленка имеет более высокий ТГМ индекс по сравнению с большинством других органических полимерных материалов, широко используемых в системах изоляции. Заключение о совместимости делается путем сопоставления ТГМ индексов компонентов системы изоляции и их сочетаний. Если ТГМ индекс системы изоляции, состоящей из эмали провода, покрытой пропиточным материалом, выше меньшего ТГМ индекса (эмали или пропиточного материала), система считается совместимой. Если же ТГМ индекс системы ниже, чем ТГМ индексы каждого из компонентов, это свидетельствует о плохой совместимости пропиточного материала с эмалью провода.

Для примера приводятся данные по оценке совместимости с помощью ТГМ индекса для эмали обмоточных проводов при пропитке различными лаками.

Таблица 11

ТГМ индексы систем эмалированный провод- пропиточный материал
(в скобках показаны ТГМ – индексы пропиточного лака и пленки
эмали обмоточных проводов)

Пропиточный лак	Изоляция обмоточного провода
-----------------	------------------------------

	полиимидная (236)	поли- амидимидная (215)	полиэфирная с амидимидным покрытием (169)	полиэфирная с нейлоновым покрытием (161)
Фенольный (208)	200	200	200	162
Кремнийорганический (195)	177	178	168	163

Видно, что пропиточные составы снижают ТГМ индекс, даже полиимидного эмалированного провода в сочетании с кремнийорганическим лаком.

Становится ясным, что подбор электроизоляционных материалов для систем изоляции сложен, особенно, если учесть неоднозначное изменение физических характеристик (ТКЛР, T_c , E и др.), влияющих на величину $\sigma_{вн}$ в процессе эксплуатации.

Поэтому при выборе материалов чаще всего используется вероятностно-статистический подход с обязательным исследованием физических процессов, приводящих к отказу изоляции.

§ 5. Композиционные материалы для изоляции электрических машин

5.1 Классификация композиционных материалов

Все ЭИМ по стойкости к действию ч.р. разделяются на две группы:

- материалы на основе слюды и слюдобумаг;
- материалы на основе синтетических пленок.

Слюдосодержащие композиционные материалы, благодаря устойчивости к ч.р., обеспечивают требуемую длительную электрическую прочность в системах изоляции высоковольтных электрических машин. Величина “ n ” в уравнении электрического старения $t = A \cdot E^{-n}$, характеризующее это качество, находится для слюдосодержащих материалов в диапазоне 10-14. Тогда, как композиционные материалы на основе полимерных пленок, разрушающихся под действием частичных разрядов, величина “ n ” в зоне электрической напряженности существования частичных разрядов, всего лишь от 2 до 4. Однако, материалы на основе полимерных пленок имеют высокую кратковременную электрическую прочность. Это преимущество реализуется в системе изоляции низковольтных электрических машин, в большинстве не защищенных от коммутационных перенапряжений.

Таким образом, для систем изоляции, работающих при $E_{раб} \geq E_{н.ч.р.}$ ($E_{раб}$ в высоковольтных машинах находится в пределах (2,5-3,0)кВ/мм), применяются только слюдосодержащие материалы, а в низковольтных электрических машинах – композиционные материалы на основе полимерных пленок.

Для систем изоляции, работающих в тяжелых условиях комплексного старения, применяют более сложные композиции, содержащие и слюдяную, и пленочную основу.

В состав композиционных материалов обязательно входит волокнистый материал, обеспечивающий механическую прочность, пропитывающую способность и технологические свойства, и, конечно, связующее.

Рассмотрим основные композиционные материалы для обмоток электрических машин.

5.2 Слюдосодержащие композиционные материалы.

Материалы на основе слюды и слюдобумаг получили широкое распространение благодаря следующим особенностям их основы – слюды: высоким диэлектрическим характеристикам, способности в композиции создавать диэлектрический барьер и, следовательно, устойчивость к частичным разрядам, и высокой нагревостойкости (могут использоваться до рабочих температур 500...700⁰С). Температурный индекс слюдяных композиционных материалов зависит только от ТИ тех компонентов, которые применяются в сочетании со слюдой. Номенклатура материалов на основе слюды разнообразна. Это прежде связано с различием конструкции изоляции, технологии изготовления, а также с учетом требований по электрическим характеристикам.

Отметим ряд различий в конструкции изоляции и использовании соответствующих материалов при их создании:

- непрерывная конструкция (создается намоткой) – ленточные материалы;
- гильзовая конструкция – гибкие листовые материалы;
- прокладочные, коллекторные и формовочные листовые материалы.

В зависимости от технологии, используемой при изготовлении изоляции, материалы разделяются на

- предварительно пропитанные (Risin-Rich) и
- непропитанные (“сухие”) для технологии вакуум-нагнетательной пропитки (ВНП, VIP).

Состав композиционного материала: слюдяная бумага, стеклоткань, связующее вещество, в ряде материалов в состав входят полиэфирная или полиимидная пленка.

Примеры композиционных материалов, применяемых для изготовления изоляции различных технологических исполнений: Элмикапор – ВНП, Элмикатерм – предварительно пропитанные ленты.

Оба материала ленточные.

Слюдаые бумаги

Основой современных слюдосодержащих материалов являются слюдобумаги, получаемые расщеплением слюды термохимическим путем или механическим в среде воды с последующей обработкой, определяющей структуру слюдяной основы.

В настоящее время слюдяные бумаги под маркой Элмика выпускаются 4 типов, являются основой всех слюдосодержащих электроизоляционных материалов, состав и поверхностная плотность представлены в таблицах 12, 13, 14, 15.

Таблица 12

Наименование материала	Тип	Состав	Поверхностная плотность, г/м ²
Элмика	2	Кальцинированный мусковит	45-160
	3	Некальцинированный мусковит	80-250
	4	Некальцинированный флогопит	70-250
	5*	Кальцинированный мусковит	45-160
* Тип бумаги разработан компанией “Элинар”			

Данные таблицы 12 показывают взаимосвязь поверхностной плотности (структуры слюдяной бумаги) с используемым составом (слюда мусковит или флогопит), а так же влияние химической среды (кальцинированная или некальцинированная слюда).

В соответствии с поверхностной плотностью производится выбор слюдяной бумаги для получения материала для различной технологии: предварительно пропитанные ленты, непропитанные – для ВПП.

Ленточные слюдосодержащие материалы

Поскольку в зависимости от типа бумаги, связующего, марки отличаются, поясним обозначение лент Элмикапор, Элмикатерм.

Цифры означают:



		- эпоксидное связующее
		- кремнийорганическое связующее
		- полиуретановое связующее
		- полиакрилатное связующее
		- не модифицированное связующее
		- модифицированное связующее
		- пленка полиэфирная
		- пленка полиимидная
		- стеклоткань

В таблице 13 представлены состав и основные характеристики материалов Элмикапор. Состав их отличается как по типу слюдяной бумаги, так и наличием в материале 523119 полиэфирной пленки, обеспечивающей высокую кратковременную электрическую прочность.

Таблица 13

Непропитанные ленты
для технологии вакуум-нагнетательной пропитки

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение			
		Элмикапор 523119 на основе слюдяной бумаги Элмика тип 2		Элмикапор 53309 на основе слюдяной бумаги Элмика тип 3	
Толщина	мм	0,10±0,02	0,11±0,02	0,12±0,015	0,14±0,02
Поверхностная плотность	г/м ²	130±12	140±14	168±15	190±17
Слюдяная бумага	г/м ²	65±4	65±4	120±13	140±13
Связующее вещество	г/м ²	10,0±3,0	10,0±3,0	8±5	10±6
Стеклоткань	г/м ²	27±3	27±3	38±4	
Полиэфирная пленка	г/м ²	28±3	28±3	-	

Летучие вещества, не более	%	0,5		0,5	
Содержание ускорителя аминного типа*	%	-		(0,3±0,1)	
Пробивное напряжение, не менее	кВ	5,0	5,0	1,5	1,5
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F		F , Н	
*Ленты могут поставляться с ускорителем или без ускорителя					

В таблице 14 даны примеры материалов типа Элмикатерм - предварительно пропитанных, а также для сравнения материалы, используемые для создания эластичной изоляции катушечных обмоток – ЛСЭП-394-ТПл и ЛСУ (табл. 15).

Таблица 14

Предварительно пропитанные ленты

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение			
		Элмикатерм 55409 на основе слюдяной бумаги Элмика тип 2		Элмикатерм 52409 на основе слюдяной бумаги Элмика тип 2	
Толщина	мм	0,14±0,02	0,18±0,02	0,14±0,02	0,18±0,02
Поверхностная плотность	г/м ²	185±25	250±40	195±25	250±25
Слюдяная бумага	г/м ²	85±5	120±6	85±5	120±6
Стеклоткань	г/м ²	38±4	38±4	38±4	38±4
Связующее вещество	г/м ²	62±10	92±20	72±14	92±20
Летучие вещества, не более	%	1,5		1,5	

Средняя электрическая прочность, не менее	кВ/мм	25	25	25	25
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более - при 15-35 ⁰ С - при 155 ⁰ С		0,02 0,25		0,02 0,09	
Текучесть	%	40-70		40-70	
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F		F	
Гарантийный срок хранения - при 15-35 ⁰ С - при 5 ⁰ С	месяц	3 6		3 6	

Таблица 15

Предварительно пропитанные ленты

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение					
		ЛСЭП -934-ТПл на основе слюдяной бумаги Элмика тип 2, с полиэфирной пленкой				ЛСУ на основе слюдяной бумаги Элмика тип 2, с полиэфирной пленкой	
Толщина	мм	0,08±0,01	0,10±0,01	0,11±0,01	0,13±0,01	0,10± 0,01	0,13± 0,02
Поверхностная плотность	г/м ²	110±14	147±20	155±25	184±25	145±30	175±30
Слюдяная бумага	г/м ²	40±2	55±3	60±3	65±4	50±3	50±3
Стеклоткань	г/м ²	27±3	38±4	38±4	38±4	38±4	38±4
Полиэфирная пленка	г/м ²	14±2	14±2	14±2	28±3	14±2	28±3
Связующее вещество	г/м ²	29±7	40±10	43±16	53±14	43±8	59±20
Летучие вещества, не более	%	1,3-4,0				1,5, не более	

Средняя электрическая прочность, не менее	кВ/мм	45	45	45	45	35	45
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более - при 15-35 ⁰ С - при 155 ⁰ С		-				0,02 0,40	
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F				F	
Гарантийный срок хранения - при 15-35 ⁰ С - при 5 ⁰ С	месяц	5 -				12 24	

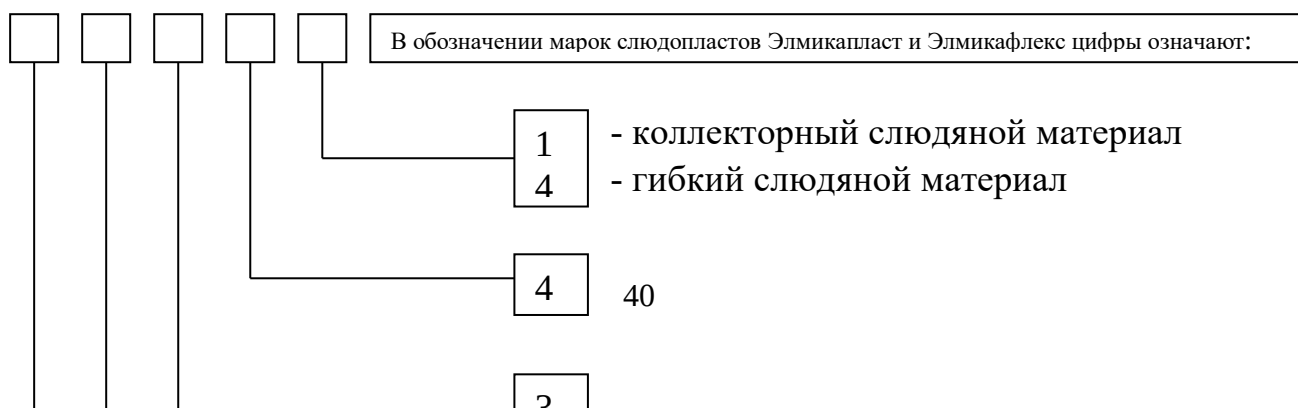
Следует обратить внимание на различие величины $tg\delta$ при рабочей температуре 155 °С Элмикатерм 55409 и 52409. Материал 52409 изготовлен на основе слюдобумаги типа 2 (на кальцинированном мусковите) содержит больше связующего. Требуется пояснения величина текучести – технической характеристики, определяющей химическое состояние термореактивного связующего, при текучести менее 45 % материал становится жестким, не дающим хорошего сцепления между слоями. Ранее это свойство оценивалось путем определения экстрагируемых (растворимых), нормированная величина которых для пропитанного материала – более 97 %.

Приведенные материалы изготовлены на основе лаков, в ряде случаев, например, для якорных обмоток машин постоянного тока и катушек главных и добавочных полюсов применяют материалы, пропитанные компаундом. К ним относятся ЛСК-110ТПл, ЛСКН-160ТТ и другие. Однако, в настоящее время разработаны рекомендации на их замену новыми материалами типа Элмикатерм 524019.

Листовые материалы

а) гибкие (табл. 16)

Для понимания состава этих материалов приведем расшифровку обозначений марок.



- слюдяная бумага тип 4
- полиэфирно-эпоксидное связующее
- эпоксидное связующее
- кремнийорганическое связующее
- не модифицированное связующее
- стеклоткань

Таблица 16

Гибкие листовые материалы

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение			
		Элмика на основе слюдяной бумаги Элмика тип 4		Элмикафлекс на основе слюдяной бумаги Элмика тип 4	
Толщина	мм	0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,43; 0,45; 0,50; 0,60	0,25; 0,32; 0,35; 0,40; 0,43; 0,45; 0,50; 0,60	0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,43; 0,45	0,25; 0,32; 0,35; 0,40; 0,43; 0,45; 0,50; 0,60
Связующее вещество, не более	%	42	30	25	25
Летучие вещества, не более	%	1,5			
Средняя электрическая прочность, не менее	кВ/мм	30	24	22	22
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F	H	F	H
Гарантийный срок хранения - при 15-35 ⁰ С - при 5 ⁰ С	месяц	6 12		6 -	

б) коллекторные (табл. 17)

Таблица 17

Коллекторные слюдопласты на основе слюдяной бумаги Элмика тип 4

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение
-------------------------	----------	----------

		КИФЭ	КИФК
Толщина	мм	0,40-1,50	0,40-1,50
Связующее вещество, не более	%	7,5	8,0
Суммарная усадка, не более	%	12,8 для толщин 0,40-0,70мм 7,0 для толщин 0,80-1,50	7,0
Средняя электрическая прочность, не менее	кВ/мм	22	24
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F	H
Гарантийный срок хранения - при 15-35 ⁰ С	месяц	6	6

в) формовочные (табл. 18)

Таблица 18

Формовочные слюдопласты на основе слюдяной бумаги Элмика тип 4

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение	
		Элмикаформ	
		323 Т	323 Пл
Толщина	мм	0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	
Неорганическая часть, не менее	%	-	70
Электрическая прочность, не менее - средняя - в отдельных точках	кВ/мм	30 25	50 35
Класс нагревостойкости в системе изоляции	-	F	

Гарантийный срок хранения - при 15-35 ⁰ С	месяц	6
---	-------	---

Основное различие в составе листовых материалов относится к содержанию связующего; общим требованием является – малая усадка, однако, только для коллекторных материалов это обеспечено благодаря малому содержанию связующего – от 6,0 до 9,0 %, в остальных же материалах оно может достигать до 40 %, что является необходимым для создания изоляции сложной конфигурации.

Таким образом, слюдосодержащие композиционные материалы имеют широкий спектр по составу, конструктивным особенностям, технологии изготовления изоляции, нагревостойкость их зависит от температурного индекса связующего и включает все классы (от В до С, 130->180 ⁰С).

5.3 Композиционные материалы на основе полимерных пленок

Для изоляции низковольтных электрических машин широко используются материалы на основе полимерных пленок. Они представляют собой сочетание пленок с различными гибкими ЭИМ на основе целлюлозных, синтетических и стеклянных волокон. Компоненты связаны между собой клеящими составами. Полимерные пленки имеют высокую кратковременную электрическую прочность, благодаря этому композиционная система изоляции в целом устойчива к перенапряжениям. Волокнистые компоненты выполняют функции армирующего материала, обеспечивающего технологические свойства композиции — хорошую пропитываемость, упругость, стойкость к механическим воздействиям и др. В качестве гильзы сердечника волокнистые материалы обеспечивают надежную связь между поверхностью катушки обмотки и сердечником за счет лучшей смачиваемости волокнистых материалов пропиточными составами по сравнению со смачиваемостью синтетических пленок. Отметим основные компоненты композиционных материалов.

Пленки — полиэтилентерефталатная (ПЭТФ) и полиимидная (ПИ). *Волокнистые подложки* — целлюлозные, полиэфирные, арамидные, стекловолоконные. *Клеящие составы* выбираются с учетом ТИ сочетаемых компонентов. Основные композиционные материалы на основе полимерных пленок представлены в табл. 19.

В последнее время созданы композиции на основе полиимидной пленки, на поверхность которой с одной или двух сторон наносятся суспензия сополимера политетрафторэтилена Ф-4МБ (обозначение материалов ПМФ-351 и ПМФ-352 соответственно), а также низкомолекулярный кремнийорганический каучук (синтофлекс Н). После изготовления конструкции изоляции из таких материалов производится

спекание ее при температуре 300...350 °С, таким образом исключается процесс пропитки.

В целом применение композиционных материалов на полимерных пленках взамен слюдяных в низковольтных электрических машинах позволяет снизить толщину изоляции. Так, замена mica-ленты ЛФК в якорных обмотках машин постоянного тока класса «Н» на стеклополиимидный материал позволила снизить толщину изоляции на 20...30%.

Системы изоляции на основе полиимидной пленки могут длительно работать при высоких температурах (у ПМ-пленки ТИ составляет 240 °С), однако необходимо помнить, что эксплуатация системы ПМ-изоляции в течение 20 000 ч при $T = 240$ °С возможна при условии отсутствия ч. р., так как полимерные пленки не устойчивы к ч. р.

Следует отметить, что ПМ-пленка подвержена гидролизу, поэтому в состав композиционных материалов на основе ПМ-пленок для влагостойких систем изоляции вводится герметик (на основе силиконового связующего), а в обозначении марки добавляется буква - Г - гидролитически стойкий.

Таблица 19

Электроизоляционные материалы
для систем изоляции низковольтных электродвигателей
общепромышленного и специального исполнения

Тип изоляции	Наименование материала	Композиционный состав	Класс нагревостойкости
Пазовая изоляция низковольтных электрических машин для ручной изолировки	Изофлекс 191 Имидофлекс 292 Имидофлекс 929	ПЭТ*+стеклоткань+ПЭТ ПМ**+стеклоткань+ПМ Стеклоткань+ПМ+стеклоткань	F H H
Пазовая изоляция, крышечки, межслойные прокладки электрических машин малой мощности для механизированной изолировки статоров	Синтофлекс 141 Синтофлекс 41	ПЭТ+электрокартон+ПЭТ Электрокартон+ПЭТ	B E
Пазовая изоляция, крышечки, междуослойная изоляция	Синтофлекс 515	Полиэфирная бумага+ПЭТ+полиэфирная бумага	B, F F
	Синтофлекс 515П	Полиэфирная бумага+ПЭТ	F
	Синтофлекс 61	с двусторонней пропиткой смолой	F
	Синтофлекс 818	Полиэфирно-арамидная бумага + ПЭТ	F
	Синтофлекс 81	Арамидная бумага+ПЭТ+арамидная бумага +ПЭТ	F

Пазовая, межфазная изоляция, изоляция полюсных катушек Пригоден для ручной изолировки статоров Гидролитически стойкая изоляция	Синтофлекс 82	Арамидная бумага+ПМ	Н
	Синтофлекс 82Г	Арамидная бумага+герметик+ПМ+герметик	Н
Межфазная, межслойная изоляция, изоляция межкатушечных соединений	Синтофлекс 515Ф	Полиэфирная бумага+ПЭТ+полиэфирная бумага	В
Межфазная, межслойная изоляция, изоляция межкатушечных соединений	Синтофлекс 616Ф	Полиэфирно-арамидная бумага+ПЭТ+полиэфирно-арамидная бумага	Г
	Синтофлекс 818Ф	Арамидная бумага+ПЭТ+арамидная бумага	Г
Пазовая изоляция стержневых обмоток	Синтофол 61	Полиэфирно-арамидная бумага+лакированная ПЭТ	Г
*ПЭТ – полиэтилентерефталатная пленка **ПМ - полиимидная пленка			

В обозначении марок пленкосодержащих материалов цифры и буквы означают:

Х Х Х А

--	--	--

Г – гидролитически стойкий;
П – пропитанный;
Ф – межфазная изоляция

- 1** – пленка полиэтилентерефталатная;
2 – пленка полиимидная;
4 – электроизоляционный картон;
5 – бумага полиэфирная;
6 – бумага из смеси полиэфирных и арамидных волокон
8 – бумага арамидная;
9 – ткань из стеклянного волокна.

ГЛАВА II

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

§ 6. Основные понятия

При создании конструкции изоляции ставится задача при минимальной толщине изоляции обеспечить высокую электрическую и механическую прочность и малую повреждаемость в процессе изготовления и во время эксплуатации машины. Для количественной оценки соотношения активных материалов в электрической машине (проводника токоведущей части и стали сердечника) и изоляции используется коэффициент заполнения паза $f = q_{\text{ис}} n / S$, где q – сечение проводника, мм²; n – число проводников в пазу; S – сечение паза, мм². Чем выше будет величина f , тем больше удельная мощность (кВт/кг) и к.п.д. машины. Увеличение f достигается в низковольтных машинах применением высокопрочных и однородных по прочности тонких полимерных материалов, а в высоковольтных машинах – применением термореактивного связующего и однородных слюдобумаг. Величина f ограничивается «сверху» технологическими факторами – при увеличении f затрудняется укладка обмоток и возрастает вероятность повреждения изоляции.

Применение тонких изоляционных материалов (синтофлексов, имидофлексов и др.) и высокопрочных эмалированных проводов (ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭТ-200 и др.) дает возможность повысить мощность машин на 15 ... 20%.

Вторым путем увеличения удельной мощности электрических машин является применение изоляции с более высокой нагревостойкостью, хотя повышение температуры обмотки может привести к некоторому снижению к.п.д. машины.

При конструировании изоляции обмоток необходимо учитывать условия окружающей среды, в которых машина будет длительно эксплуатироваться. Поэтому для разных климатических районов машины имеют различные исполнения, обозначаемые в соответствии с ГОСТами. Например, исполнение машин, эксплуатируемых на суше в районах с

умеренным климатом — У, с холодным — Хл, с влажным тропическим — ТВ, с сухим тропическим — ТС.

Для машин, установленных на судах, исполнения обозначаются: М — плавание в районах с умеренным холодным климатом; ТМ — тропическим, ОМ — для неограниченного района плавания.

§7. Основные виды конструкций корпусной изоляции и способы ее нанесения

В зависимости от мощности и напряжения машины, формы паза и условий эксплуатации корпусная изоляция может либо укладываться в пазы сердечника до внесения обмотки (обычно в машинах низкого напряжения), либо наноситься на обмотку до ее укладки в сердечник.

7.1. Изоляция, укладываемая в пазы сердечника

В этом случае корпусная изоляция выполняется в виде гильзы (короба), укладываемой в сердечник (гильза сердечника ГС). Для насыпных якорных и статорных обмоток асинхронных двигателей из круглого провода и шаблонных обмоток из прямоугольного провода ГС набирается из нескольких слоев изоляционного материала (табл. 16), в этом случае используют еще термин «выкладка паза».

Для роторных обмоток турбогенераторов и других высокооборотных (неявнополюсных) машин используется заранее формуемая твердая гильза (роторная) или короб. Она прессуется из пропитанной термореактивным связующим стеклоткани в пресс-формах и отверждается при высоких температурах (160... 180° С) и давлении.

7.2 Изоляция, наносимая на обмотку

Изоляция выполняется двумя основными вариантами — гильзовым и непрерывным.

а) Гильзовый вариант (гильза катушки ГК). «Мягкая» гильза катушки создается наложением широкой полосы изоляционного материала на прямолинейную часть катушки; лобовая часть изолируется лентой. «Мягкая» гильза применяется для изоляции якорных и статорных обмоток низкого напряжения с длиной пазовой части не более 500 мм. Ограничение

в длине обусловлено тем, что при изготовлении такой гильзы на больших длинах образуются морщины, складки. Катушки после изолирования обязательно пропитываются.

«Твердая» гильза катушки в отличие от «мягкой» изготавливается из материала, пропитанного термореактивным связующим (табл. 7, 8). После намотки и термопрессования такая конструкция не требует дополнительной пропитки. В этом ее технологическое преимущество. «Твердая» гильза используется для обмоток высокого напряжения до 10 кВ. Ограничение области применения такой конструкции по напряжению обусловлено пониженной электрической прочностью изоляции места соединения «твердой» гильзы с ленточной изоляцией лобовой части (рис. 7). При этом большую электрическую прочность имеет изоляция, при создании которой используется соединение гильзы с ленточной намоткой в виде обратного конуса (рис. 7).

б) Непрерывная изоляция создается при изолировании токоведущей части лентой. Намотка основной ленты осуществляется обычно вполнахлеста, а верхний защитный слой стеклоленты накладывается встык.

Технологический процесс наложения ленты на прямолинейный участок механизирован.

Непрерывная изоляция имеет несколько меньшую электрическую прочность в пазовой части по сравнению с гильзой, однако она незаменима в машинах с $U_n \geq 6$ кВ.

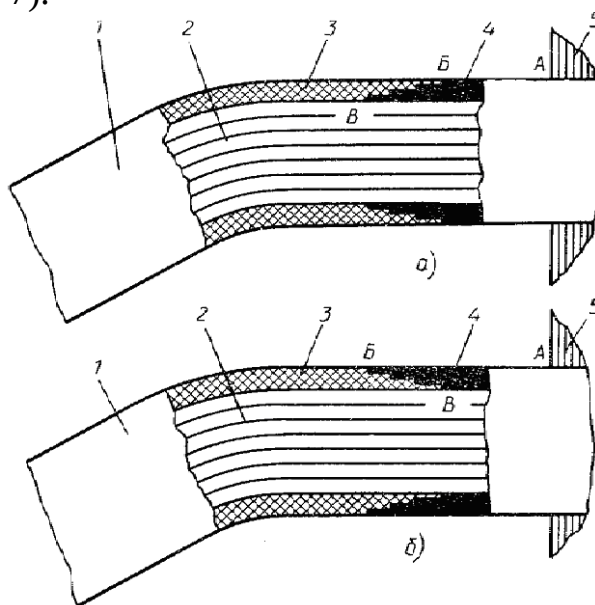


Рис. 7 Виды выполнения стыков гильзовой и непрерывной изоляции:

- а) прямой конус,
- б) обратный конус

1 – лобовая часть катушки, 2 – проводники обмотки,
3 – непрерывная изоляция уголков, 4 – гильза,
5 – зубец статора
А – Б – В – путь возможного электрического разряда
(проводники обмотки – сердечник) при прямом
и обратном конусе

§ 8. Технология изготовления обмоток

В зависимости от номинального напряжения и мощности электрических машин применяются статорные обмотки различных типов:

- при $P_n \leq 60$ кВт, $U_n \leq 660$ В из круглого провода, т.е. “всыпные”;
- при $P_n \leq 60-80$ кВт, $U_n \leq 660$ В или $P \leq 400$ кВт, $U \geq 3000$ В шаблонные из прямоугольного изолированного провода;
- крупные синхροэлектромашины (турбо- и гидрогенераторы) – стержневые обмотки

8.1. Технология изготовления обмоток из круглого провода (всыпная обмотка)

Электрические машины небольшой мощности (менее 100 кВт) обычно изготавливают на напряжение до 660 В. При этом в паз укладывается большое число витков из круглого провода. Паз сердечника обычно полузакрытый, т. е. имеет шлиц минимальной ширины, позволяющий провести через него без повреждения провод. Пазовая изоляция — гильза сердечника (ГС) устанавливается до укладки катушек, витковой изоляцией служит изоляция провода. Витки в пазу располагаются хаотически, и вероятность межвиткового замыкания по сравнению с обмотками из прямоугольного провода выше.

Типовая технология включает следующие операции: изолировку паза сердечника, укладку катушки, заклинивание и осадку катушек в пазах, формование и бандажирование лобовых частей, соединение схемы и пропитку.

Материал ГС должен быть упругим, стойким к надрыву, расслоению, плотно прилегать к стенкам паза и не слипаться при укладке обмотки.

Этим требованиям наиболее удовлетворяют композиционные материалы на основе полимерных пленок (табл. 16).

Рассмотрим один из способов механизированного изготовления и укладки ГС (рис. 8).

Полоса изоляционного материала 1 механизмом прерывистого действия 3 протягивается через профильные направляющие 2, посредством которых отгибаются манжеты. В момент прекращения подачи ленты нож 4 отрезает заготовку 5 требуемой длины. Затем пуансон 6 подает

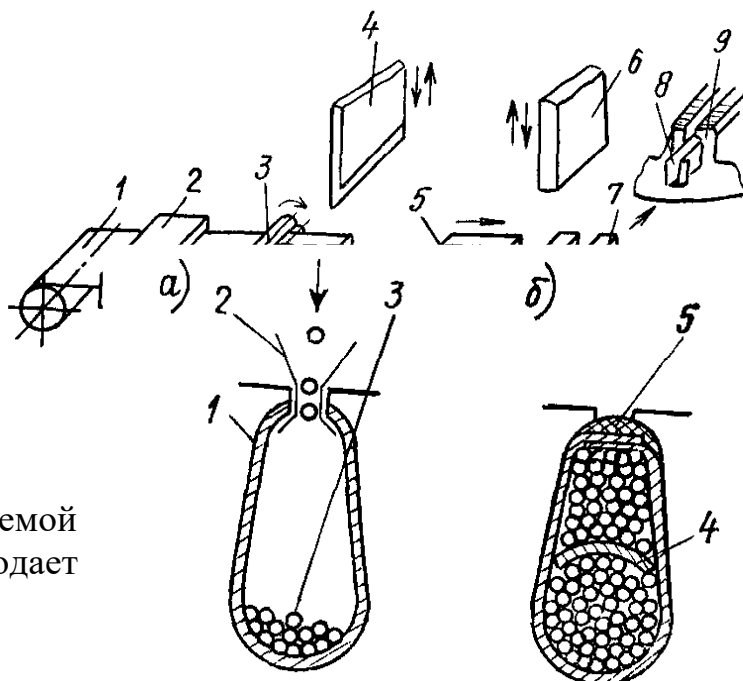


Рис. 9

заготовку в формующую матрицу 7, которая одновременно служит направляющим желобом для передачи отформованного короба 8 в паз статора 9. После укладки обмотки в изолированный паз производится его механизированное заклинивание. Форма пазовой крышки трапецевидная, изготавливается из того же материала, что и ГС, только большей толщины.

Последовательность укладки сыпной обмотки показана на рис. 9; сначала во все пазы укладывают корпусную изоляцию ГС 1, затем устанавливают технологические картонные прокладки 2 для предохранения изоляции провода от повреждения исыпают витки нижней катушки 3, изолируют ее прокладкой 4 исыпают витки верхней катушки. После этого производят отгиб краев корпусной изоляции (заворачивают ГС) и устанавливают клин 5.

8.2 Технология изготовления катушечных (шаблонных) обмоток из прямоугольного провода

С увеличением мощности машин уменьшается число эффективных проводов в пазу и увеличивается их сечение; при мощности машин более 100 кВт применение круглых проводов для получения необходимого сечения эффективного проводника (параллельное соединение большого числа проводов) становится технически и экономически невыгодным и обмотку выполняют из прямоугольного провода.

Катушки изготавливают, наматывая провода ровными рядами, что обеспечивает большую надежность витковой изоляции, которая при необходимости усиливается дополнительными прокладками. В низковольтных машинах ($U_n \leq 660$ В), пазовую изоляцию ГС устанавливают в сердечник до начала укладки катушек, а катушки не изолируют.

Это позволяет разделить каждую катушку по ширине на две полукатушки и укладывать в паз не всю катушку сразу, а каждую полукатушку отдельно.

При этом паз делают полуоткрытым, т.е. шлиц паза имеет ширину, несколько большую, чем ширина полукатушки.

При изготовлении катушки последовательно осуществляются следующие операции: намотка лодочки, растяжка лодочки в катушку, рихтовка катушки, крепление и изоляция выводных концов и лобовых частей. Последовательность операций при изготовлении обмоток без корпусной изоляции показана на рис. 10, где 1, 3, 4 – прокладки изоляционные; 2 – гильза сердечника. Укладывая в паз катушки I и II, осаживают их подбойкой и молотком и устанавливают междуфазовую изоляционную прокладку 3, затем укладывают катушки III и IV и загибают концы корпусной изоляции. На загнутые концы корпусной изоляции ставят прокладку под клин 4 и забивают с торца клин 5.

Многовитковая статорная обмотка из прямоугольного провода показана на рис 11. Катушка имеет пазовую часть 3 и лобовую часть, состоящую из прямолинейного участка 2 и головки 1. На лобовой части расположены два выводных конца 4. Одна сторона пазовой части катушки укладывается в низ паза статора 5, а вторая в верх паза 6. Пазовые части развернуты на угол α° и расположены на разных

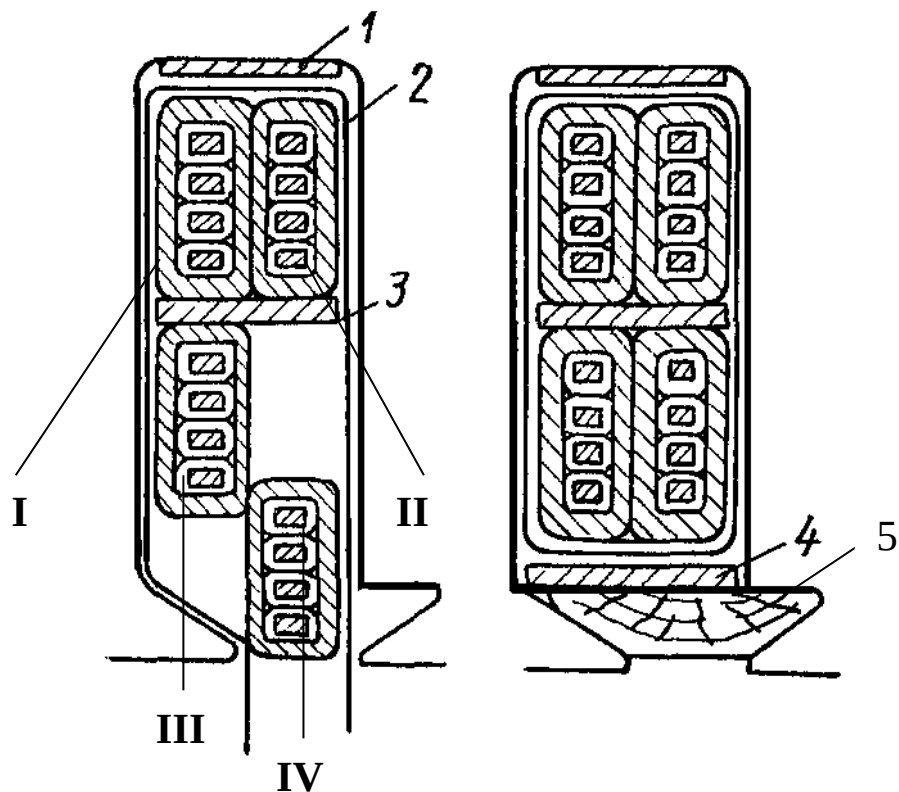


Рис. 10 Последовательность заведения катушек в полуоткрытые пазы.

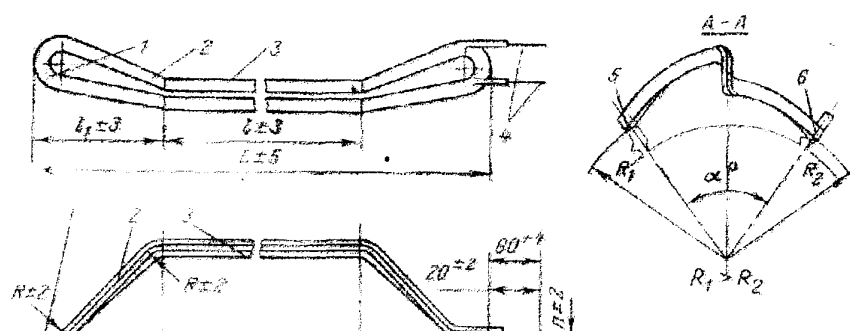


Рис. 11. Многовитковая статорная катушка из прямоугольного провода.

радиусах от центра, катушка имеет достаточно сложную геометрическую форму. Многовитковая катушка с корпусной изоляцией по форме соответствует катушке без корпусной изоляции, но не разделена на две полукатушки, так как на нее нанесена корпусная изоляция.

8.3 Технология изготовления шаблонных катушек с корпусной изоляцией

Наиболее надежны в эксплуатации обмотки, в которых корпусная изоляция полностью наносится на секции до укладки их в сердечник. Эти обмотки укладывают в статоры с открытыми пазами. Этот вариант изготовления изоляции широко применяется в машинах мощностью свыше 400 кВт на напряжение 3000 В и выше. Технология изготовления шаблонных катушек с корпусной изоляцией определяется видом принятой изоляции.

Возможны следующие варианты:

I - из предварительно пропитанных материалов:

- а) в виде твердой гильзы в пазовой части и ленточной намотки в лобовой части ($U_{ном} \leq 6,0$ кВ);
- б) непрерывной конструкции – ленточной намотки по всей длине катушки;

II - из непропитанных (“сухих”) ленточных материалов с последующей ВМП (VPI) в конструкции:

- а) на отдельных катушках (Single VPI);

На схеме технологического процесса (рис. 12) показана последовательность основных операций при изготовлении катушек с различной изоляцией непрерывной конструкции:

Связующие в пропитанных лентах на основе модифицированных эпоксисинтетических лаков, класс нагревостойкости – 155 °С.

Пропитка изоляции типа монолит осуществляется в зависимости от класса нагревостойкости эпоксидным компаундом ПК-11 (класс нагревостойкости - 155 °С) или компаундом на основе полиэфиримидных или кремнийорганических смол (класс нагревостойкости - 180 °С)



Рис. 12 Схема технологического процесса

Остановимся на особенностях укладки катушек в статоре.

1. Катушки с изоляцией из пропитанных лент.

При укладке катушек в кольцевой сердечник верхние стороны нескольких последних катушек (их число равно шагу обмотки) должны быть вынуты из пазов и отведены вверх для заводки в эти пазы нижних сторон соответствующих катушек по схеме обмотки. Это обстоятельство, а также возможность отклонений формы секций от расчетной, обуславливают важнейшие требования к катушечной обмотке — гибкость и эластичность при укладочных операциях. Эластичность, как правило, обеспечивается использованием в качестве связующего специальных высокомолекулярных смол, обладающих большой гибкостью при температуре 80 ... 100 °С, и укладка обмотки производится при этой температуре. Как правило, в этом случае для изоляции пазовых и лобовых частей применяют различные материалы (см. табл.)

2. Катушки с изоляцией типа монолит.

В этом случае различаются три способа укладки обмотки в сердечник:

А – изоляция после пропитки не отверждается и катушки, имеющие достаточную гибкость, легко укладываются в статор и в нем отверждаются при нагреве проводников током. Такой вариант обычно используется в ремонтных организациях, не имеющих оборудования для пропитки статора целиком.

Б – формирование изолированной катушки и термоотверждение изоляции производится после пропитки. Затем, по специальной технологии (без отгиба шага обмотки для установки последней катушки) производится укладка. Этот вариант применяется при изготовлении крупных машин, например, - гидрогенераторов с большим шагом обмотки.

В – вариант (Gloubi VPI), самый эффективный с точки зрения производительности, когда катушки с непропитанной изоляцией, имеющие достаточно большую гибкость, укладываются в сердечник, и вся обмотка целиком пропитывается, а после выемки из пропиточного котла – термоотверждается.

8.4 Технология изготовления стержневых обмоток

Стержневые обмотки применяются в статорах крупных машин, роторах асинхронных машин с фазным ротором, якорях крупных машин постоянного тока.

Большинство обмоток стержневого типа двухслойные (два стержня по высоте в пазу). На рис. 13 показано расположение стержней в пазу сердечника. По форме стержни выполняются с выгибом лобовых частей в одну сторону (петлевая обмотка для турбогенератора) или в разные стороны (волновая обмотка для гидрогенератора). Длина стержня крупного турбогенератора достигает 7000 мм при массе до 140 кг, а гидрогенератора – 2000...3000 мм при массе до 70 кг.

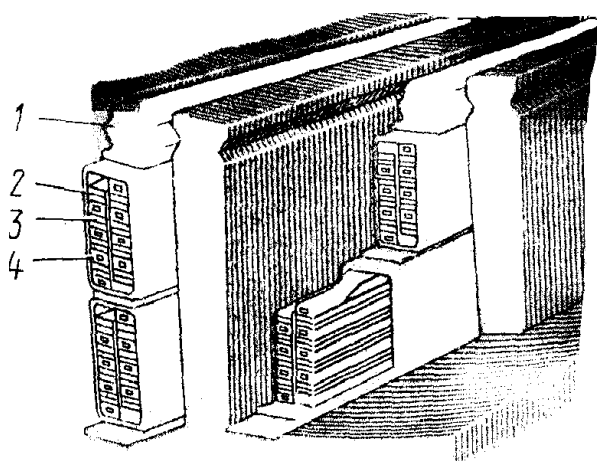


Рис. 13 Стержни обмотки в пазах статора машины переменного тока большой мощности:

1. пазовый клин статора,
2. корпусная изоляция стержней обмотки,
3. сплошные проводники стержня,
4. полые проводники стержня.

Рассмотрим технологию изготовления стержней статоров крупных генераторов с непосредственным охлаждением (полые проводники). Перед изготовлением стержня полые проводники испытывают на проходимость канала и механическую прочность, при первом испытании подают воду от гидравлического насоса в один конец бухты и наблюдают за ее вытеканием из другого конца, а для второго – один конец проводника закрывают, давление воды поднимают до 7 МПа и выдерживают в течение 1 мин.

Отметим основные операции изготовления стержня. Как правило, стержень состоит из двух полустержней, набираемых из сплошных и полых элементарных проводников (ЭП). ЭП транспонируют так, чтобы разместить их в пазовой части в одинаковых условиях относительно поперечного магнитного потока в пазу.

При подготовке ЭП для транспонирования используется штамп – рис.14.

Принцип плетения (транспонирования) стержня представлен на рис. 15. Проследим за изменением положения ЭП на разных участках по длине стержня (позиция “а”). В лобовой части (участок АВ) все ЭП располагаются параллельно друг другу. Проводник I,

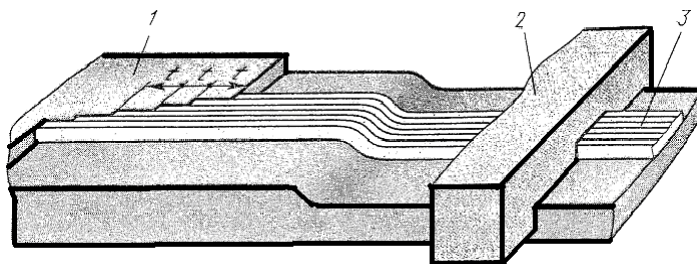


Рис. 14 Штамп для выгибания элементарных проводников

находящийся наверху участка АВ, в начале пазовой части стержня (сечение В), изгибается и переходит в другой ряд стержня – позиция “б” и постепенно переходит вниз стержня (участок ВС).

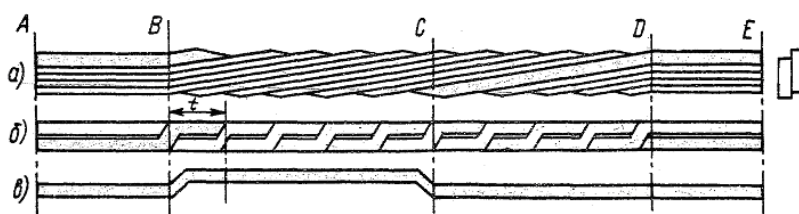


Рис. 15 Транспонированный стержень без корпусной изоляции

Через расстояние “*t*” на его место по высоте стержня поднимается ЭП, находящийся в лобовой части ниже проводника I. В конце участка ВС проводник I снова изгибается, как показано на позиции “в” и опять переходит в первый ряд. На участке СД он постепенно поднимается до своего первоначального положения. В другой лобовой части (справа) стержня все ЭП опять располагаются параллельно друг другу (участок ДЕ). Таким образом, ЭП в пазовой части транспонированного стержня делает как бы один полный оборот вокруг оси стержня. Все остальные ЭП переплетаются таким же образом.

На рис. 16 показан разрез пазовой части стержня турбогенератора с непосредственным водяным охлаждением. Стержень состоит из сплошных 1 и полых 2 проводников. Между рядами устанавливается стеклоткань 3, прокладки, пропитанные термореактивным составом. На транспозиционных переходах ЭП подкладываются пластинки гибкого миканита 6, и места переходов выравниваются с помощью гибкого слюдосодержащего термореактивного материала 8. До изолирования на проводники стержня наматывают впритык стеклянную ленту 7, пропитанную саженаполненным эпоксидно-фенольным лаком, которая служит полупроводящим покрытием. Все проводники стержня обмотаны в $\frac{1}{2}$ нахлеста в несколько слоев слюдосодержащей лентой 4, а сверху – одним слоем стеклянной ленты 5 впритык.

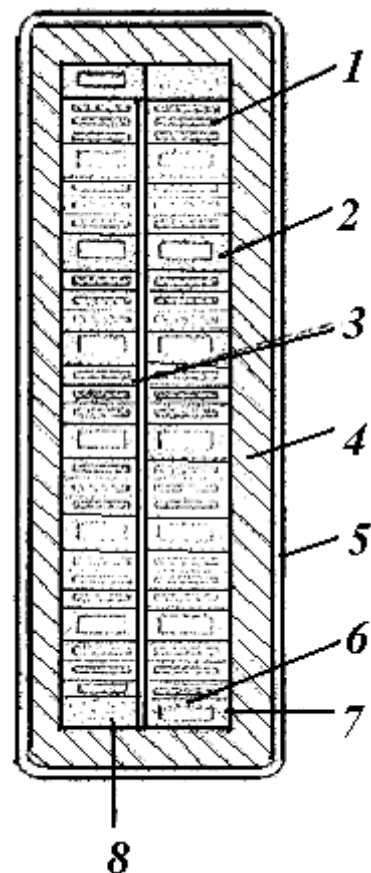


Рис. 16 Разрез пазовой части стержня

На готовый стержень накладывают полупроводящее покрытие из ленты впритык и покрывают полупроводящим лаком.

Затем стержень, состоящий из двух полустержней, рихтуется по всей длине и после нанесения антиадгезивного покрытия прессуется.

Опрессование производят в течение одного часа при постепенной подаче давления

до 20 МПа и температуре 120...130 °С. Затем стержень выравнивают эпоксидной шпатлевкой и производят повторное прессование. После этого напряжением 220 В проверяют изоляцию каждого ЭП относительно всех остальных.

Для придания лобовым частям нужной формы и монолитности их также промазывают и прессуют с последующей запечкой на специальных шаблонах в течение 1...1,5 ч при 150...160 °С. Затем, не снимая с шаблона, концы стержней обрезают по размеру, зачищают, надевают и припаивают на них наконечники. После этого проводят гидравлические испытания, проверяют проходимость полых проводников (по расходу воды при определенном напоре) и отсутствие протечек (по сохранению давления в течение суток после отключения от напорной магистрали).

Изготовление стержневых обмоток заключается в формировании стержня, изготовлении корпусной изоляции (намотка, пропитка, термообработка) и укладке в пазы.

Наложение корпусной изоляции. Как было отмечено ранее, для крупных генераторов используют только непрерывную конструкцию.

Развитие высоковольтной изоляции идет по пути совершенствования термореактивных материалов, содержащих взамен слюды слюдобумаги. Преимущества ТРИ в повышенной механической прочности и ее стабильности при рабочей температуре.

В нашей стране широко используются три системы ТРИ высоковольтных машин, отличающиеся видом связующего и способом введения его в изоляцию; имеется два способа введения связующего в изоляцию:

- на стадии материала (технология «технология пропитанных лент Risin - Rich» и

- на стадии намотанной изоляции, т.е. в конструкции (вакуум-нагнетательная технология Single VPI или Global VPI).

По первой технологии изготавливается изоляция монотерм и элмикатерм. Изоляция монотерм (лента ЛСЭН-526Т) – на эпоксидноволачном связующем. По второй технологии с вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидным компаундом изготавливается изоляция монолит (используется материал типа Элмикапор).

8.4.1 Технология изготовления корпусной изоляции из предварительно пропитанных лент

Рассмотрим технологию изготовления изоляции Элмикатерм. Материал для изолирования – лента (55409) содержит 45...30 % связующего с 1...3% растворителя, содержание растворимой части связующего (экстрагируемых) более 97 %. Изолировка производится машинным способом на изолировочных станках (изолировка стержней гидрогенераторов) и ЛУС (изолировка стержней турбогенераторов. Основным элемент станка – намоточная изолировочная головка – располагается на каретке, которая передвигается по копиру, имеющему

форму изолируемого стержня. Копир можно настроить на изолирование стержней различной длины, устанавливая сменные вставки.

Схема изолировочной головки показана на рис. 17, ее разрезная шестерня 1 несет на себе два роликотержателя 2. Роликотержатели 2 предназначены для стеклослюдяных лент. Станок работает следующим образом. Стеклослюдяная лента с двух роликов пропускается через нагревательные ролики 3 и закрепляется на стержне. Стеклослюдяная лента, проходя через ролик 3, нагревается до температуры, не превышающей температуру начала отверждения, связующее размягчается, лента становится эластичнее, благодаря чему обеспечивается плотное наложение на стержень. Вращающаяся намоточная головка с помощью каретки движется по шаблону вдоль стержня, а лента сматывается с роликов, вращающихся вокруг стержня, ложится на него с заданным нахлестом (обычно он равен $\frac{1}{2}$).

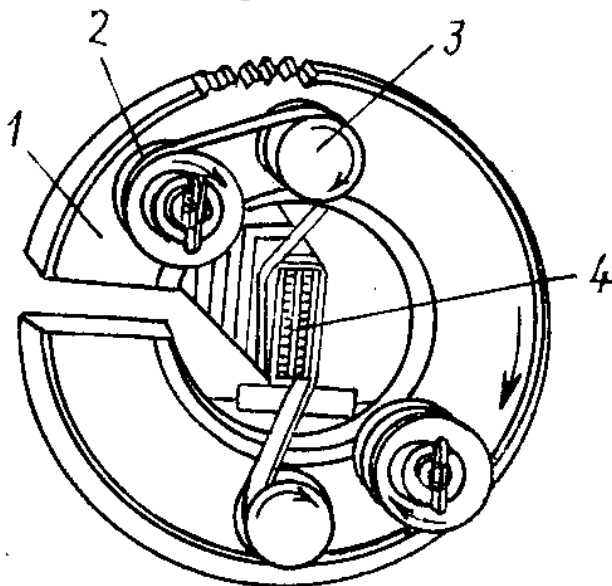


Рис. 17 Схема изолировочной головки

Намоточная головка проходит по прямолинейной и лобовой частям стержня 4. Поворот стержня около наконечника изолируется вручную разогретой в термостате лентой. Корпусная изоляция на станке накладывается с учетом последующего при термопрессовании обжатия изоляции на 30...35 %.

Существуют два способа опрессования:

- механический;
- гидростатический.

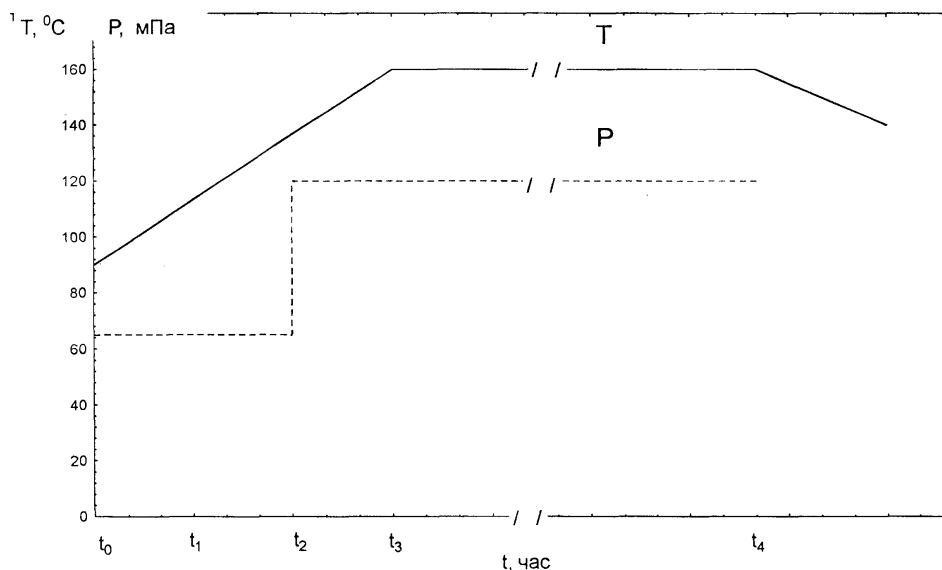
При первом способе опрессования после намотки нужного числа слоев изоляционной ленты накладывается антиадгезионный слой фторопластовой пленки. Последний облегчает отделение отвержденного стержня от рабочих поверхностей пресс-формы.

Механическое опрессование и выпечка (термоотверждение) производятся в специальных пресс-формах, которые изготовлены с большой точностью и механизированы. Рабочие диаграммы этой операции даны на рис. 18, а) для монотерма (ось времени 2). Режим опрессования установлен в соответствии с кинетическими параметрами отверждения (рассматриваемыми в учебном пособии по лабораторным работам по курсу “Изоляция электрических машин”, раб. №4).

Необходимо отметить, что при механическом опрессовании не удастся полностью реализовать возможности слюдосодержащей ТРИ.

Неравномерное распределение давления сложной формы приводит к перепрессовке одних и недопрессовке других.

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РЕЖИМА МЕХАНИЧЕСКОГО ТЕРМООПРЕССОВАНИЯ
(В ПРЕССФОРМАХ)**



Для изоляции ЭЛМИКАТЕРМ:

$t_0 - T_0 = 65^{\circ}\text{C}$; $P = 4 \text{ мПа}$

$t_1 - T_1 = 90^{\circ}\text{C}$; $P = 4 \text{ мПа}$

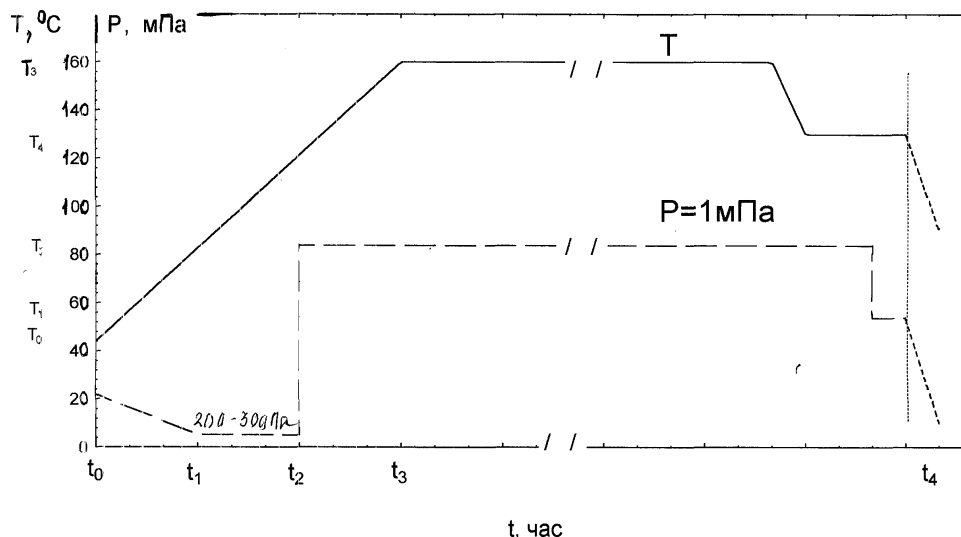
$t_2 - T_2 = 120^{\circ}\text{C}$; $P = 20 \text{ мПа}$

$t_3 - T_3 = 160^{\circ}\text{C}$; $P = 20 \text{ мПа}$ (6 час.)

t_4 – окончание термоопрессования и затем медленное охлаждение

а) При механическом опрессовании в интервале t_0 - t_1 прессформа нагревается до $T=90^{\circ}\text{C}$ при давлении 4 мПа, затем при том же давлении температура повышается до 120°C . Следующий этап соответствует подъему давления до 20 мПа (основной режим опрессования) Конечный этап – отверждение изоляции при $p=20\text{мПа}$ и $T=160^{\circ}\text{C}$ (для изоляции Элмикатерм – 6 час). Затем медленное охлаждение.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РЕЖИМА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ОПРЕССОВАНИЯ



Для изоляции ЭЛМИКАТЕРМ:

$t_0 - T_0 = 44^{\circ}\text{C}$;

$t_1 - T_1 = 56^{\circ}\text{C}$;

$t_2 - T_2 = 84^{\circ}\text{C}$;

$t_3 - T_3 = 160^{\circ}\text{C}$;

$(t_1 - t_2)$ - вакуумирование

При T_1 - запуск компаунда

$(t_3 - t_4)$ - час

t_4 - 7 час

б) При гидроstaticеском опрессовании: 1-сушка в интервале t_1 - t_2 , температура поднимается до $\sim 85^{\circ}\text{C}$ при вакуумировании $p=200\text{-}300 \text{ Па}$ и производится запуск битумного компаунда (обеспечивающее гидроstaticеское давление), затем давление повышается до 1 мПа, а температура до 160°C , в этих условиях происходит отверждение (~ 6 час). Для снижения вероятности образования технологического напряжения (ТМН) снижение температуры и давления производят постепенно.

Рис. 18 (а, б)

При гидростатическом опрессовании обжатие и нагрев изоляции производят с помощью жидкой среды - разогретого битума. Предварительно на стержень накладываются антиадгезионные пленки, а затем стальные планки, на которые наносят защитный слой антиадгезионной фторопластовой пленки. Гидростатическую прессовку и отверждение ТРИ проводят в автоклавах. На рис. 18, б) представлены рабочие диаграммы этого процесса. После выпечки остывшие стержни вынимают из пресс-форм, снимают защитные ленты, измеряют толщину стержня, калибруют, снимая слой не более 1 мм, если необходимо. Последней операцией при изготовлении стержня является наложение полупроводящих покрытий в пазовой и лобовой частях (рассмотрено ниже). Эти покрытия накладывают вручную и сушат при комнатной температуре не менее суток.

8.4.2 Технология изготовления корпусной изоляции из непротитанных ("сухих") лент (вакуум-нагнетательная технология (ВНП))

Изготовление стержня до нанесения корпусной изоляции рассмотрено выше в § 3.4.1.

Материал для корпусной изоляции – Элмикапор, например, лента 53309, содержащая слюдяную бумагу с поверхностной плотностью (120-140)г/м², стеклоткань и ускоритель отверждения – 0,3%.

Отличие в изолировании стержня заключается в отсутствии нагрева ленты в процессе намотки.

Операция ВНП может осуществляться на отдельных стержнях (Single VPI) или на конструкции с полностью уложенной обмоткой (Global VPI).

Рассмотрим основные этапы ВНП для варианта – статора с полностью уложенной обмоткой (рис. 19.)

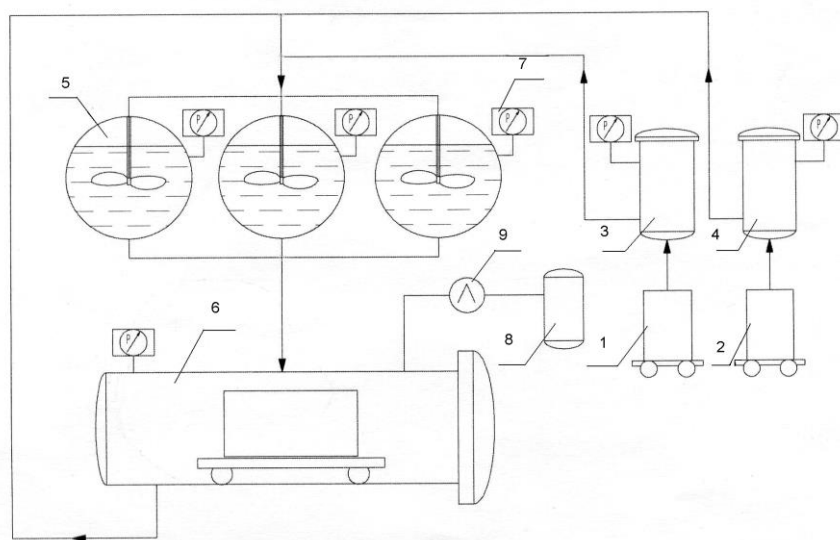


Рис. 19

Упрощенная схема
установки фирмы «Изола-
Майер»
для пропитки в
эпоксидных компаундах:

- 1 – Объем для хранения смолы;
- 2 – Объем для хранения отвердителя;
- 3 – Резервуар для смолы;
- 4 – Резервуар для отвердителя;
- 5 – Смесительный автоклав;
- 6 – Пропиточный автоклав;
- 7 – Вакуумный агрегат;
- 8 – Азотная установка;
- 9 – Компрессор.

1. Подготовка изделий к ВПП

а) Для исключения жесткого сцепления поверхности обмотки со стенкой статора металлические поверхности паза покрываются антиадгезивом.

б) Устанавливаются технологические кольца, необходимые для обеспечения вращения статора при сушке.

в) Предварительная сушка при $T=(95-110)^{\circ}\text{C}$ 6 часов при вращении статора.

г) Охлаждение статора до $T=(50\pm 3)^{\circ}\text{C}$

2. Подготовка пропиточного автоклава (ПА)

а) Нагрев до $T=(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$

б) Загрузка пропитываемых изделий в ПА.

в) Вакуумная сушка при $T=(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $P=20\text{Па}$ в течение 3 час

3. Подготовка пропиточного компаунда (ПК)

Пропиточный компаунд ПК-11 представляет собой смесь диановой смолы ЭД-22 и отвердителя – МТГФА - изометилтетрагидрофтаlevого ангидрида, которые смешиваются в определенном соотношении (100 в.ч. смолы и 80 в.ч. ангидрида).

Основные этапы подготовки ПК

- разогрев смолы и отвердителя до $(45\pm 5)^{\circ}\text{C}$,
- дегазация их при условии $T=(45\pm 5)^{\circ}\text{C}$, $P=(0,5-1,0)\text{кПа}$,
- через дозатор в указанном соотношении смола и отвердитель поступают в смесительный автоклав (СА)

Далее технологический цикл представлен в виде блок-схемы, рис. 20, с указанием конкретных условий: давления, температуры, времени. Важно отметить, что для получения необходимого качества пропитки соблюдается строгий контроль вязкости ПК.

После выгрузки статора из ПА и зачистки выводных концов, изделия закрепляют на поворотных устройствах и проводится окончательная

операция сушки, термоотверждения сначала при $T=100^{\circ}\text{C}$, затем при $T=(145-160)^{\circ}\text{C}$ в течение 12 часов.

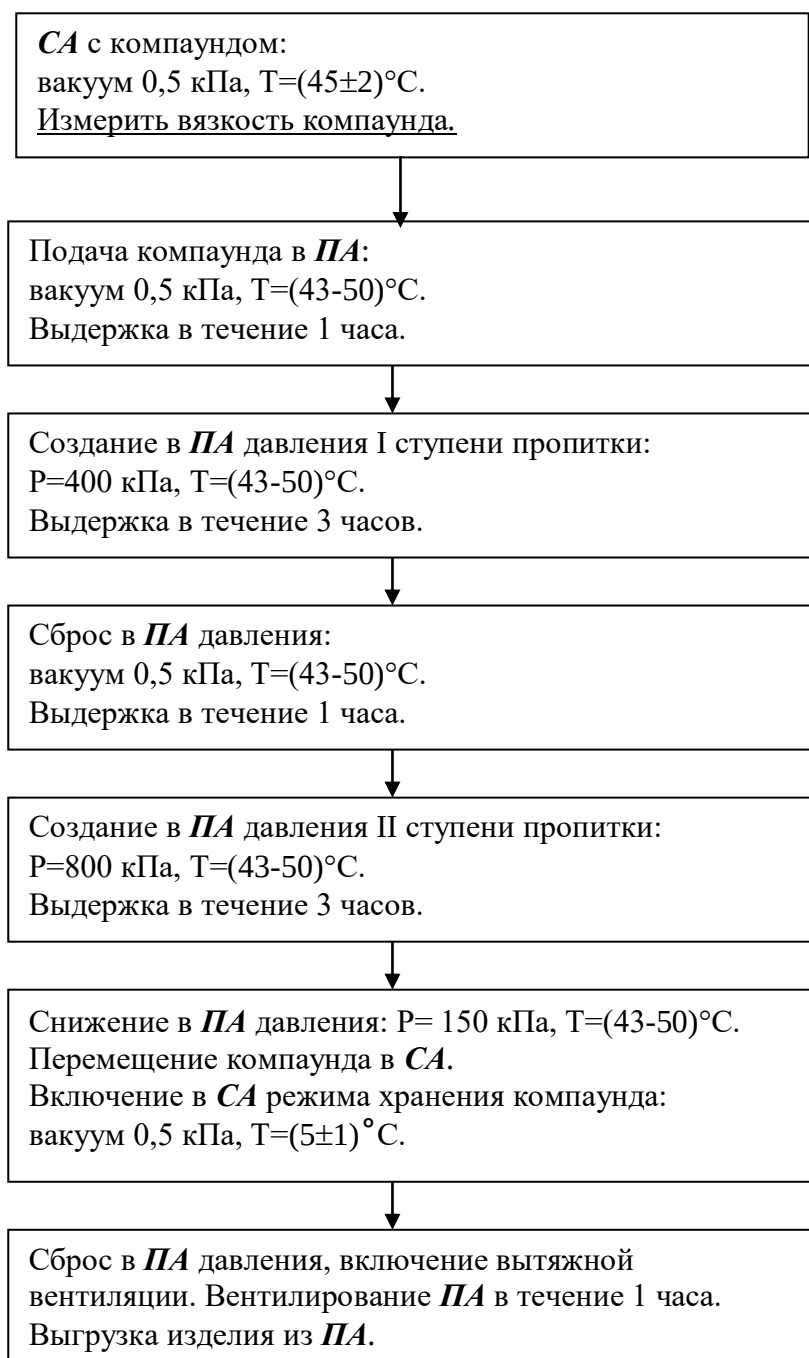


Рис. 20. Блок-схема технологического процесса пропитки статоров турбогенераторов в компаунде ПК-11(ЭД-22) в установке фирмы «Изола-Майер».

8.4.3. Обоснование режимов сушки, пропитки и термоопрессования (отверждения)

Для получения высококачественной ТРИ (монолитной, отвержденной) необходимо: в случае технологии “пропитанных лент” обеспечить условия для своевременного начала образования в связующем пространственной структуры (начала отверждения), согласованного с моментом подачи давления и температурным режимом.

При изготовлении изоляции вакуум-нагнетательным способом из сухих непропитанных лент (монолит) ответственными операциями являются подача в автоклав пропиточного компаунда и пропитка в режиме «вакуум - давление». Эти операции осуществляются при температуре ниже $T_{н.о.}$. Запечка (отверждение) производится после выемки стержней из автоклава в специальных термостатах при температуре, превышающей $T_{н.о.}$. Т.о. важными характеристиками кинетики отверждения связующего являются $T_{н.о.}$ - температура начала интенсивного отверждения и относительная скорость процесса. Определить эти параметры можно с помощью измерения температурно-временной зависимости полной проводимости изоляции Y на низкой частоте (около 100 Гц), весьма чувствительной к процессу отверждения, сопровождающемуся изменением подвижности и числа функциональных групп. Меньшей погрешностью измерения обладает относительная характеристика, позволяющая сравнивать проводимость изоляции в данный момент с проводимостью в окончательно отвержденном состоянии. Исследования частотно-временных зависимостей полной проводимости показали, что при $f \geq 20$ кГц величина практически не зависит от момента измерения и оказывается близкой к Y изоляции полностью отвержденного состояния. Измерение Y при повышенной частоте (100 кГц) позволяет даже в начале реакции отверждения определить значение этого показателя для отвержденного образца при низкой частоте (100 Гц). Поэтому для изучения процесса отверждения используется коэффициент

$$k = \frac{Y_{100\text{Äö}}}{Y_{100\text{êÄö}}} 10^3 - 1.$$

На рис. 21 представлена зависимость коэффициента полной проводимости k от времени нагрева t при линейном подъеме температуры до 160 °С для различных систем (слюдотерм – 1, монотерм – 2). Видно, что системы отличны по процессу отверждения.

Температура максимума k соответствует началу процесса отверждения $T_{н.о.}$, для слюдотерма она составляет 140°С, для монотерма 115°С. Изучение процесса отверждения при различных

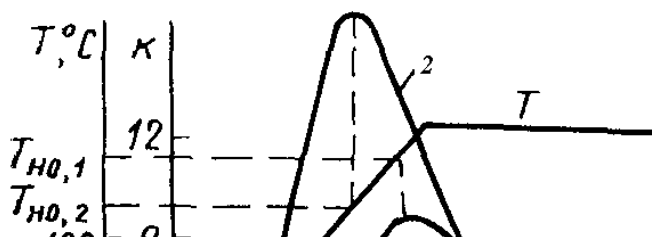


Рис. 21 Зависимость коэффициента полной проводимости k от времени нагрева t при линейном подъеме температуры до 160 °С для различных систем

слюдотерм – 1,
монотерм – 2

уровнях температуры (140, 160, 180 °C) показывает, что отверждение монотерма протекает интенсивно (постоянная времени реакции в 4-5 раз меньше, чем у слюдотерма). Данные о кинетике отверждения ТР связующего позволяют прогнозировать режим сушки, пропитки и термоопрессования изоляции. Так, при выборе режима сушки изоляции, выполненной из пропитанных лент (слюдотерм, ВЭС и др.), необходимо помнить, что температура сушки должна быть ниже $T_{н.о.}$, а достижению этой температуры должно предшествовать установление давления опрессования (рис. 18).

8.5 Крепление обмоток

К изоляционным системам относятся также элементы крепления стержней или катушек в пазовой и лобовой частях.

1. Пазовая часть

Требования к креплению пазовой части стержня в пазу сердечника противоречивы.

С одной стороны, различия рабочих температур проводников стержня и стенок паза (перепад до 40 °C), а также разница коэффициентов линейного расширения медных проводников и стали сердечника ($1,7 \cdot 10^{-5}$ и $1,1 \cdot 10^{-5}$, соответственно) при прочном закреплении пазовой части может привести к образованию напряжений в изоляции, вызывающих ее разрушение под действием циклов изменений нагрузки и пусков-остановок генератора. Поэтому пазовое крепление должно давать определенную свободу осевого перемещения стержней. При этом должен сохраняться постоянный контакт между пазовым полупроводящим покрытием стержня и стенкой паза сердечника для предотвращения наиболее опасного вида разрядных процессов – пазового разряда.

С другой стороны, для снижения температурного перепада требуется максимально плотное заполнение пространства между сердечником и поверхностью изоляции. Конструкция также, должна обеспечивать подавление вибрации стержней, вызываемой рабочими электродинамическими (100 Гц) силами, и выдерживать усилия при аварийных режимах, многократно превышающих рабочие.

Конструктивно система крепления имеет радиальные элементы (клинья, прокладки под ними и между стержнями) и тангенциальное (боковое) заполнение зазора между стержнем и пазом.

Применяемые способы различны для технологий изготовления стержней с изоляцией из “пропитанных лент” и пропитываемых в сердечнике.

Обозначим эти технологические варианты:

А – “пропитанные ленты”

(resin-rich, single VPI)

Б – “сухие ленты” (global VPI)

Вследствие указанных выше сложностей не существует единого конструктивного решения используемого всеми изготовителями.

Известны следующие конструкции:

Радиальное уплотнение

Технология А.

Плоские клинья в “ласточкинском гнезде” паза, предназначенные для удержания обмотки в аварийных режимах (короткое замыкание). Под ними “встречные клинья” для подавления “рабочей” вибрации, далее над верхней гранью стержня устанавливаются амортизирующие прокладки из специального вязко-упругого материала или волнообразного стеклотекстолита для предохранения изоляции от передавливания при заклиновке.

Эти элементы могут применяться в различных сочетаниях в зависимости от расчетных электродинамических сил и мощности машины.

Технология Б.

Плоские клинья, под которыми устанавливают прокладки из специального материала, расширяющегося при пропитке.

Боковое уплотнение.

Технология А.

а) Волнообразные прокладки из полупроводящего стеклотекстолита, сжимаемые при установке в паз до 10% от первоначальной высоты “волны”.

б) Заполнение полупроводящей замазкой, наносимой на стержень или оболочку из полупроводящего материала, накладываемую на стержень до установки в паз.

Технология Б.

Обертывание стержня специальным полупроводящим материалом, обеспечивающим возможность осевого перемещения стержней без повреждения изоляции.

2. Лобовая часть.

В лобовой части устанавливаются прокладки, фиксирующие определенный зазор между стержнями, необходимый для охлаждения и предотвращения разрядов между стержнями, принадлежащими к различным фазам обмотки.

Прокладки композиционные – стеклотекстолит обернутый мягким материалом (фетром), пропитанным до установки эпоксидным составом холодного отверждения (Технология А) или после установки (Технология Б)

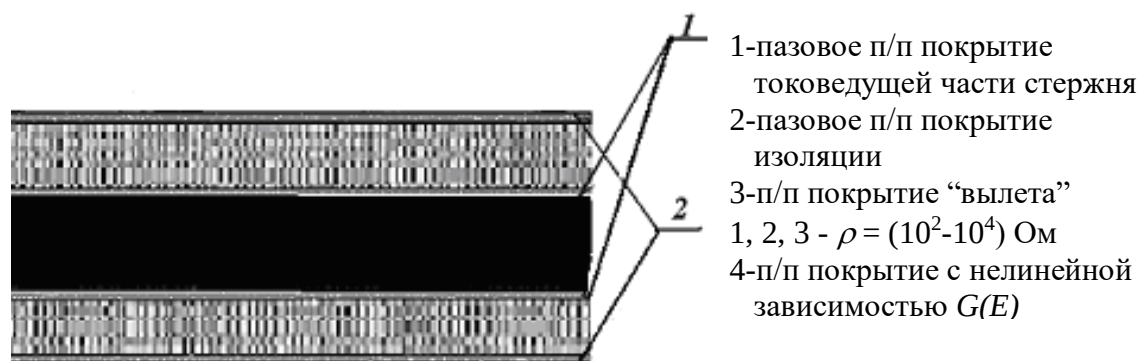
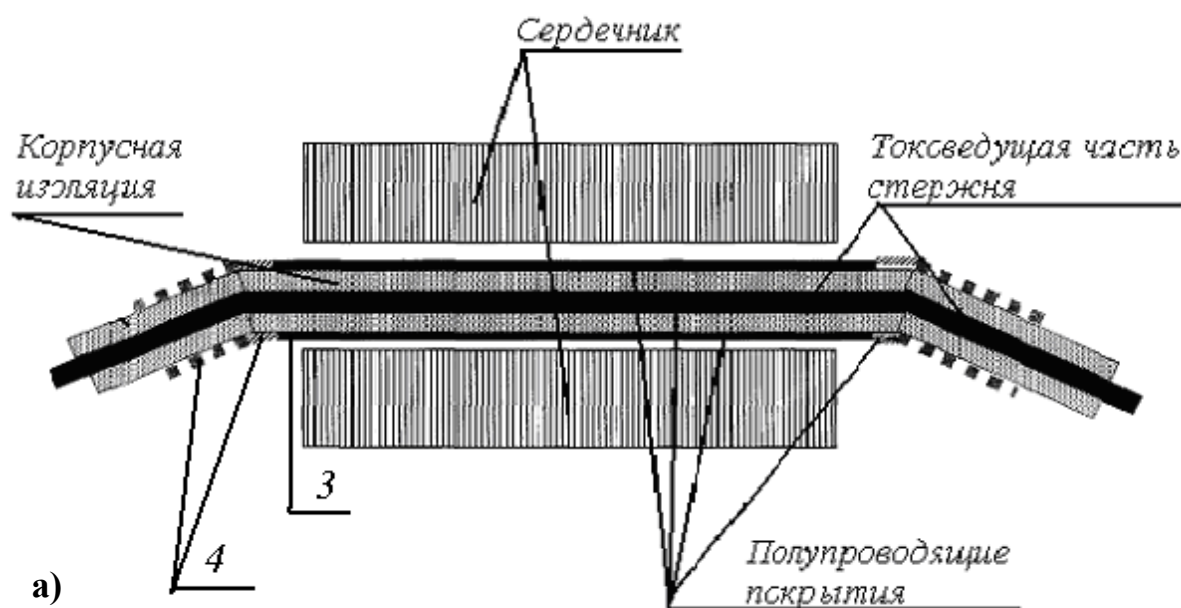
8.6 Изготовление противокоронных полупроводящих покрытий

Особенности конструкции обмоток высоковольтных электрических машин определяют необходимость выполнения противокоронных полупроводящих покрытий (теоретическое обоснование рассмотрено в 1-ой части курса).

Специальные покрытия для предотвращения или ослабления разрядных процессов накладываются в пазовой части стержня и в зоне перехода из пазовой в лобовую часть стержней и катушек. Рис. 22.

1. Пазовая часть.

Покрытие накладывается по всей длине пазовой части (рис. 22, а), 1) с заходом за “вылеты”(рис. 22, а), 3), т.е. практически по всей длине прямолинейной части стержня. Используются материалы – ленты или эмали, обладающие относительно низкой проводимостью (10^2 - 10^4) Ом, толщиной 0,1 ... 0,3 мм. Необходимые электрические свойства достигаются путем введения в связующие эмали и пропиточный состав ленты графита или мелкодисперсной сажи.



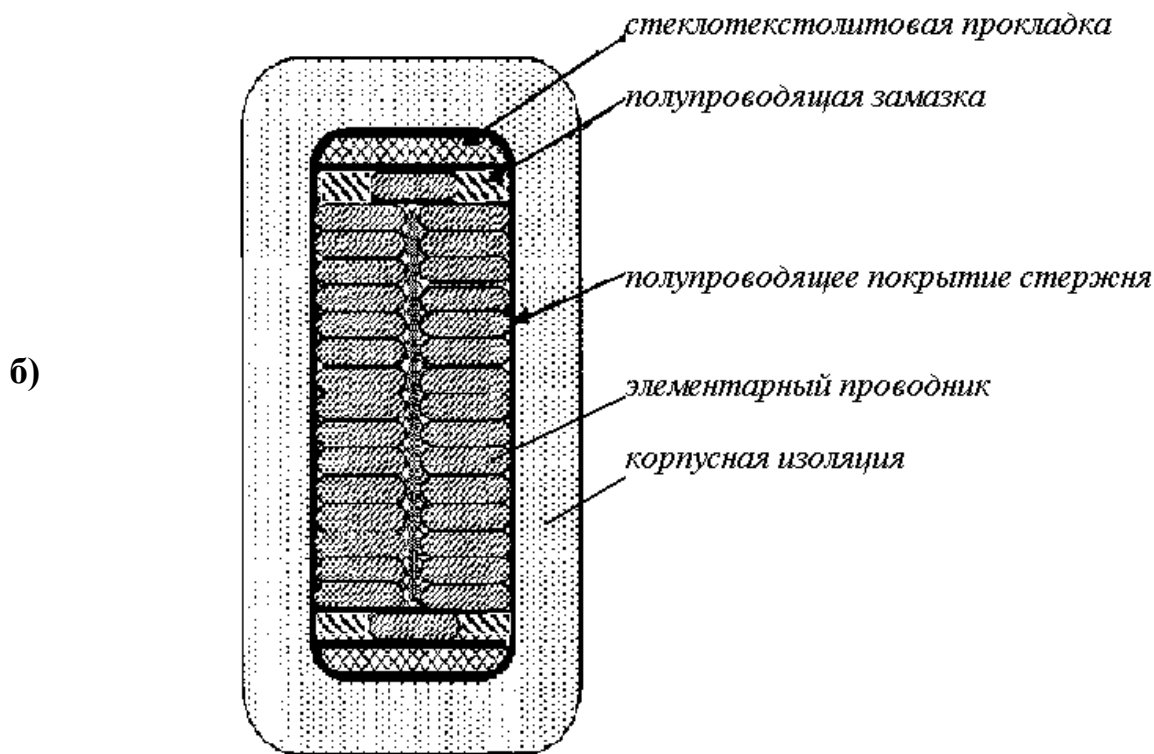


Рис. 22

1.1. Токоведущая часть стержня.

Для снижения напряженности электрического поля на ребрах токоведущей части стержня, сплетенного из большого числа элементарных проводников, на узкие грани стержней устанавливаются скругляющие прокладки из стеклотекстолита и стержень обматывается полупроводящей лентой.

Основным требованием к этой ленте, кроме проводимости (см. выше), является обеспечение хорошей адгезии к проводникам и накладываемой поверх полупроводящего слоя основной изоляции. Эта полупроводящая оболочка вокруг проводников служит, также, для устранения разрядов в полостях между ними и основной изоляцией.

1.2. Поверхность изоляции.

Полупроводящее покрытие на поверхности основной изоляции предназначено для устранения разрядов между стенками паза сердечника и поверхностью стержня или катушки. Для реализации этого эффекта необходимо обеспечить надежный контакт между покрытием и сердечником, создаваемый конструкцией крепления пазовой части стержня (катушки).

Покрытие в виде эмали наносится кистью не менее двух раз, толщина слоя около 0,1 мм.

Покрытие в виде ленты наматывается одновременно с наложением основной изоляции и опрессовывается вместе с ней в случае технологии “сухих лент”.

В России используются ленты зарубежных фирм “Извольта” (Австрия), “Изола” (Швейцария) и др.

2. Зона перехода и лобовая часть (лобовое покрытие).

Электрическое поле у конца покрытия, имеющего потенциал сердечника (корпуса), аналогично полю фланца проходного изолятора, т.е. имеет очень большую продольную (вдоль поверхности изоляции) составляющую, и разрядный процесс, если не принять специальных мер по выравниванию электрического поля, может начинаться при напряжении значительно меньшем, чем рабочее.

Наиболее распространенным способом сглаживания (регулирования) продольной составляющей электрического поля является использование покрытия, проводимость (G) которого возрастает при увеличении электрического поля (E), т.е. зависимость $G(E)$ имеет нелинейный характер. Также, как и в случае пазового покрытия, исполнение лобового покрытия может быть эмалевым или ленточным. В обоих вариантах необходимое свойство нелинейной проводимости достигается за счет введения в связующее (эмаль) или пропиточный состав (лента) микропорошка карбида кремния (SiC).

Технология наложения лобового покрытия аналогична пазовому - покраска эмалью готового стержня или пропитка слоя ленты вместе с основной изоляцией. Согласно рекомендациям фирм – изготовителей материалов длина покрытия в см определяется отношением $\ell_n = 0,5U_n$, где U_n – номинальное напряжение в кВ.

Для машин с напряжением 10 кВ и выше используют двухступенчатые покрытия (рис. 22, а), поз. 4), в которых относительно короткая первая ступень, имеющая более высокую проводимость, наносится в зоне перехода из пазового в лобовое покрытие. Для выполнения первой ступени используется специальная эмаль или накладываются параллельные слои ленты.

8.7 *Технология изготовления обмоток якорей*

Общие сведения

К обмоткам якорей относятся обмотки, уложенные в пазы вращающихся частей машин (якоря машин постоянного тока, преобразователей, ротора генераторов и двигателей и т.п.).

Удобно разделить якорные обмотки по способу их изготовления (табл.20)

Таблица 20

Способ изготовления обмотки	Область применения	Тип паза. Конструкция изоляции
Машинная намотка катушек в якоре	Машины малой мощности	Полузакрытый. Напыленная изоляция
Катушечные обмотки из круглого провода	Машины с высотой оси вращения 80 . . . 200 мм	Полузакрытый. Гильза якоря из изофлекса или имидофлекса
Катушечные обмотки из прямоугольного провода	Машины с высотой оси вращения 225 мм и выше Тяговые, крановые машины	Открытый. Твердая гильза катушки
Стержневые обмотки	Крупные машины постоянного тока	Открытый. Твердая гильза стержня

На рис. 23 показана изоляция выпной обмотки ($P < 10\text{кВт}$).

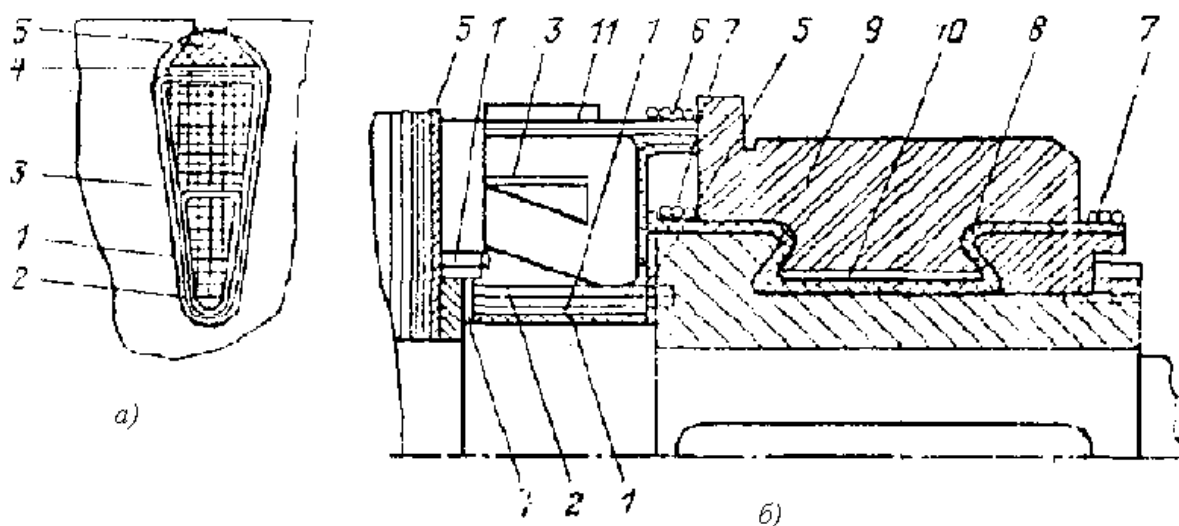


Рис. 23 Изоляция выпных обмоток якорей машин постоянного тока мощностью 0,6 - 9 кВт.

- а) пазовая часть, б) изоляция лобовой части, вала и подбандажная
1, 2, 3, 4 - материалы для корпусной изоляции,
5 - стеклопласт клин, 6, 7 - стеклоткань,
8, 10 - коллекторные манжеты, изолирующий цилиндр,
9 - межламельная изоляция, 11 - стеклобандажная изоляция

На рис. 24 показана изоляция шаблонных обмоток машин $P = 10 - 200\text{ кВт}$

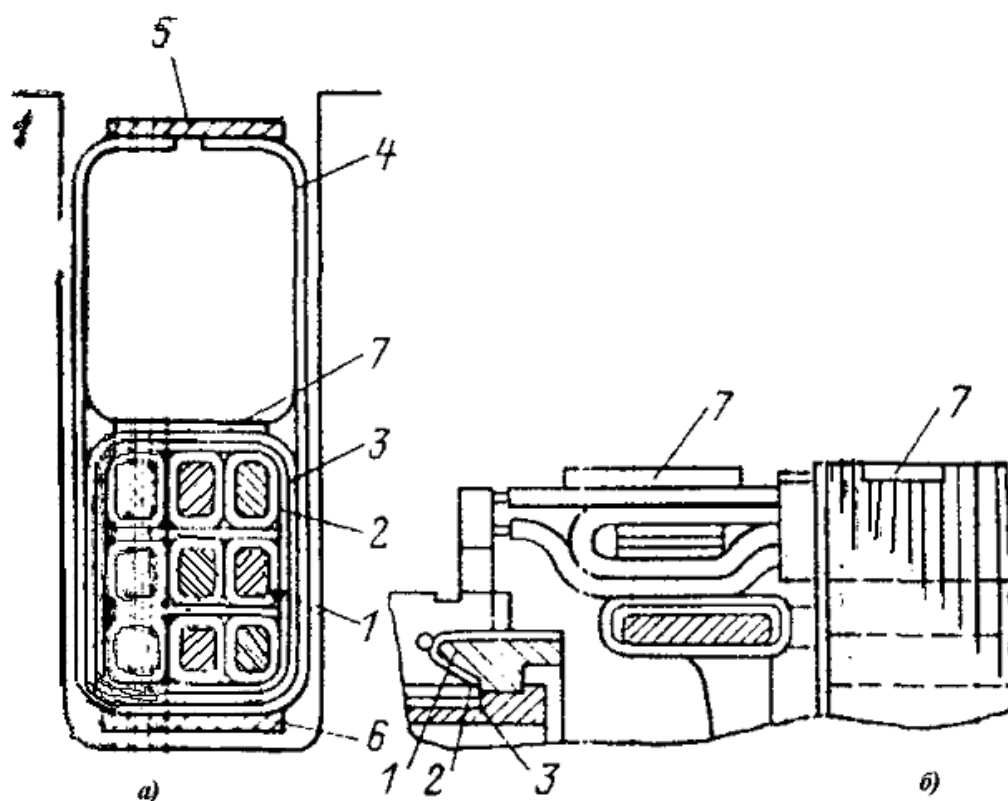


Рис. 24

а) пазовая часть, б) изоляция бандажей коллектора
 1, 2, 3, 4 - материалы корпусной изоляции
 5, 6, 7 - стеклотекстолит

Изолирование обмоток, якоря

Рассмотрим на примере изготовления гильзовой изоляции.

В § 7 отмечены особенности этой конструкции. Соединение гильзовой изоляции (пазовой части) с ленточной изоляцией (лобовой части) осуществляется в виде прямого конуса (при изолировании стержней роторных обмоток асинхронных двигателей) и в виде обратного конуса (при изолировании статорных и якорных обмоток).

Заготовки для гильзовой изоляции выполняют по шаблону в виде трапецевидной «простынки» 1 (рис. 25, а), размер широкой стороны A соответствует опрессовываемой части катушки (стержня), размер узкой стороны A_1 превышает длину якоря (сердечника) на 6...10 мм.

Предварительно изолируют лентой (табл. 15, 16) выводные концы и лобовые части стержня, причем первый слой заходит на прямую часть от уголка на 25... 40 мм, последующие слои накладывают «на конус» (ступеньками). Пазовую часть изолируют «простынкой», покрывают защитной парафинированной бумагой и триацетатной пленкой и устанавливают в обкатное приспособление (рис. 25, б) между нажимными планками 2, имеющими длину, равную длине пазовой части катушки 5. Кольцо 1 вращается вместе с нажимными планками при помощи ролика 4.

Катушка и кольцо 3 неподвижны. После окончания обкатки гильзовую изоляцию подвергают опрессованию, давление поднимают постепенно до 2,5 ... 5,0 МПа. Температура при опрессовании устанавливается в зависимости от состава связующего.

Технологический процесс укладки обмотки и присоединения выводных концов к коллекторным пластинам - сложный и ответственный.

Якорь поступает на укладку с напрессованным обмоткодержателем коллекторной пластиной и пазы сердечника имеют определенное положение относительно друг друга. На дно паза устанавливают стеклотканевую прокладку, корпусная изоляция (ее конструкция должна соответствовать мощности машины) создается из материалов, рекомендуемых в табл. (см. Приложение).

После укладки нижнего ряда, вторые стороны катушек поступают в верхнюю часть паза при уложенной обмотке нижнего ряда, между ними устанавливается межкатушечная изоляция. По мере укладки выводные концы обмотки устанавливаются в шлицы коллекторных пластин.

При укладке стержневой обмотки сначала заполняется верхняя часть, затем на стороне, противоположной коллектору производится соединение верхних и нижних стержней хомутиками.

После укладки обмотки производят припайку концов секций к коллекторным пластинам, наложение бандажей и пропитку. Обмотанные якоря с изоляцией класса нагревостойкости **B** пропитывают компаундами капельным или струйным способами. Якоря с изоляцией класса **F** и **H** подвергают вакуум-нагнетательной пропитке в лаках с растворителями. (Операции пропитки рассмотрены отдельно в §3, п. 3.2.2)

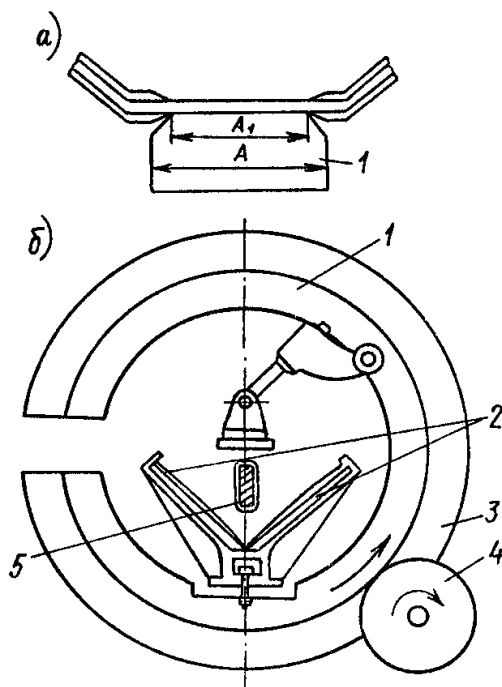


Рис. 25 а), б)

Приложение
Рекомендуемые системы изоляции

Системы изоляции турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электрических машин класса нагревостойкости <i>F</i> .		
Тип изоляции	Технология VPI ВНП	Технология RR производство пропит. ленты
Витковая изоляция (для повышения пробивного напряжения обмоточных проводов)	ЛСУ ЛСЭП®-934-ТПл	ЛСУ ЛСЭП®-934-ТПл
Межслойная изоляция для цементации стержней	Препреги ПСС, ПС-Э	
Корпусная изоляция	Вариант 1 Элмикапор®533099 или ЛСКН-160-ТТ Вариант 2 Элмикапор®53309 или Элмикапор®53319 Вариант 3 Элмикапор®523199	Вариант 1 Элмикатерм®52409 Вариант 2 Элмикатерм®55409 или ЛСЭН-526Т Вариант 3 Элмикатерм®524099

Корпусная изоляция катушек на рабочее напряжение до 10 кВ включительно	Вариант 1 Пазовая часть, лобовая часть и головка: Элмикапор®533019 или Элмикапор®53319	Вариант 1 Пазовая часть: ЛСМ Лобовая часть и головка: ЛСЭП®-934-ТПл или ЛСУ
	Вариант 2 Пазовая часть, лобовая часть и головка: Элмикапор®523199 или ЛСКН-135-СПл	Вариант 2 Пазовая часть, лобовая часть и головка: Элмикатерм®524019 или ЛСУ
Корпусная изоляция катушек на рабочее напряжение свыше 10 кВ	Вариант 1 Пазовая часть: Элмикапор®53309 или Элмикапор®53319 Лобовая часть и головка: Элмикапор®523199	Вариант 1 Пазовая часть: Элмикатерм®52409 Лобовая часть и головка: ЛСЭП®-934-ТПл или ЛСУ
Противокоронная защита	Проводящая лента ЛПП-400(для пазовых частей) Проводящая лента ЛАЛЭ-1 (для лобовых частей)	
Пропитывающие компаунды	Эпоксидно-ангидридные ПК-11, ПК-11(э)	
Изоляция роторов турбо- и гидрогенераторов, синхронных электродвигателей	Препреги П-АКН 1, П-АКН 2, П-АН 2 Коробки пазовые роторов КПТБ, КПТ	
Изоляция полюсных катушек гидрогенераторов	Препреги П-АКН 1, П-АКН 2, П-АН 2	

Системы изоляции тяговых электродвигателей и двигателей постоянного тока				
Тип изоляции	Класс нагревостойкости F		Класс нагревостойкости H	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
Якорная обмотка				
Витковая изоляция (для повышения пробивного напряжения обмоточных проводов)	Элмикатерм®524019	ЛСЭК®-5-ТПл ЛСК-110-ТПл Элмикатерм®524019	Элмикатерм®529029	
Корпусная изоляция катушек		ЛСЭК®-5-ТПл ЛСК-110-ТПл ЛСУ		
Пазовая	Синтофлекс®616	Изофлекс 191	Синтофлекс®818 Н	Имидофлекс®292

изоляция				Имидофлекс®929
Межламельная изоляция коллектора	Элмикапласт®1440 КИФЭ	КИФЭ КИФЭ-А	Элмикапласт®1440	КИФЭ-Н КИФК
Коллекторные манжеты	Элмикаформ 323 Пл Элмикаформ 324 Пл в сочетании с препрегом ПСС или Синтофлекс®515		Элмикаформ 325 Т Элмикаформ 325 ПМ ФИФК-ТПл	
Бандаж	ЛСБЭ-155		ЛСБЭ-180	
Межслойная изоляция	Элмика®423		Элмика®425	
Статорная обмотка				
Катушки главного и добавочного полюсов				
Межвитковая, межслойная изоляция	Элмикафлекс 4430 Элмикафлекс 44309 П-АКН 2		Элмикафлекс 4450 Элмикафлекс 44509 П-АКН 2	
Корпусная изоляция	Элмикатерм®524019	ЛСК-110-ТПл ЛСЭК®-5-ТПл ЛСКН-160-ТТ (для технологии вакуум- нагнетательной пропитки)	Элмикатерм®529029 Элмикатерм®529099	ЛСПМ ЛСК-СС

ЛИТЕРАТУРА

1. Майофис И.М., Химия диэлектриков. М:”Высшая школа,”-1970, 330 с.
2. Справочник по электротехническим материалам. Т.1. /Под редакцией Ю.В. Корицкого и др. М: Энергоатомиздат, 1986,-368 с.
3. Справочник по электротехническим материалам. Т.2. /Под редакцией Ю.В. Корицкого и др. М: Энергоатомиздат, 1987,-457 с.
4. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология пропизводствап электрических машин М: “Энергоиздат”- 1982, 511 с.
5. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. М:”Энергоиздат”,- 1981, 375 с.

6. Галушко А.И. и др. Надежность изоляции электрических машин./ М: "Энергия", 1979,- 176 с.
7. Ваксер Н.М. Изоляция электрических машин. Учебное пособие. ЛПИ, 1985, - 81 с.
8. Ваксер Н.М., Бородулина Л.К., Старовойтенков В.В. Изоляция электрических машин. Лабораторный практикум. ЛПИ, 1994,-72 с.
9. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. М: Энергоатомиздат, 1981, - 256 с.
10. Пак В.М., Трубачев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М: "Энергоатомиздат", 2007,-415 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ГЛАВА I. Электроизоляционные материалы и обмоточные провода	3
§ 1. Основные полимеры, используемые для производства ЭИМ и пропиточных составов.	3
§ 2. Обмоточные провода.	14
2.1 Эмалированные провода	14
2.2 Обмоточные провода с пленочной изоляцией	17
2.3 Обмоточные провода с волокнистой и эмалевоволокнистой изоляцией.	18
2.4 Провода со слюдосодержащей изоляцией.	20
§ 3. Пропиточные составы.	21
3.1 Основные требования к пропиточным составам.	21
3.2 Технология пропитки систем изоляции	22
3.2.1 Изготовление предварительно пропитанной ленты	22
3.2.2 Технология пропитки обмоток	24
§ 4. Совместимость материалов.	27
4.1 Основные понятия.	27

4.2	Химическая совместимость пропиточных составов с эмалированными проводами.	30
		32
4.3	Физические методы исследования совместимости.	
§ 5.	Композиционные материалы для изоляции электрических машин	34
5.1	Классификация композиционных материалов.	35
5.2	Слюдосодержащие композиционные материалы.	43
5.3	Композиционные материалы на основе полимерных пленок	46
ГЛАВА II. Конструкции и технология изоляции обмоток.		46
§ 6.	Основные понятия.	
§ 7.	Основные виды конструкций корпусной изоляции и способы ее нанесения.	47
7.1	Изоляция, укладываемая в пазы сердечника.	47
7.2	Изоляция, наносимая на обмотку.	48
§ 8.	Технология изготовления обмоток.	
8.1	Технология изготовления обмоток из круглого провода (всыпная обмотка)	48
8.2	Технология изготовления катушечных (шаблонных) обмоток из прямоугольного провода.	50
		54
8.3	Технология изготовления катушек с корпусной изоляцией ..	
8.4	Технология изготовления стержневых обмоток	57
8.4.1	Технология изготовления корпусной изоляции из предварительно пропитанных лент	60
		
8.4.2	Технология изготовления корпусной изоляции из непровитанных (“сухих”) лент.	62
	..	65
8.4.3	Обоснование режимов сушки, пропитки и термопрессования (отверждения).	68
		72
8.5	Крепление обмоток.	74
8.6	Изготовление противокоронных покрытий.	
8.7	Технология изготовления обмоток якорей	
Приложения		
Литература		

Школа для электрика - <https://electricalschool.info/>

Электронные книги - <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>

Канал в ТГ - <https://t.me/electricalschool>