

В.К. Андрианов
В.Т. Пивненко, канд. техн. наук

Исследование свойств электрической изоляции тончайших эмалированных проводов в условиях воздействия механических напряжений и повышенных температур

В процессе изготовления и эксплуатации обмоток электрических машин, аппаратов и приборов, выполненных из эмалированных проводов, провода подвергаются различным воздействиям:

- сжимающие нагрузки, возникающие в изоляции при намотке катушек;
- термомеханические напряжения, возникающие в процессе эксплуатации при токовых перегрузках.

Указанные воздействия в условиях повышенной температуры могут привести к продавливанию эмалевой изоляции, что является причиной появления короткозамкнутых витков обмотки. Следовательно, стойкость эмалевой изоляции к продавливанию в условиях повышенной температуры является одной из определяющих характеристик. Особенно это необходимо учитывать в тончайших проводах, где толщина изоляции измеряется микрометрами.

При механических нагрузках в изоляции появляются как временные (упругие) деформации, исчезающие после снятия нагрузки, так и остаточные (необратимые), остающиеся после прекращения действия нагрузки. Первый вид деформации разделяется на упругую и высокоэластическую. Второй вид деформации - это высоковязкое течение. Полная деформация изоляции провода описывается следующим уравнением [1]:

$$\epsilon = \sigma \frac{1}{G_1} + \sigma \frac{1}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \sigma \frac{1}{\eta_3} f, \quad (1)$$

где

ϵ - полная деформация;

σ - напряжение в изоляции;

G_1 и G_2 - модули упругости в упругом и вязкоэластическом состоянии;

t - время воздействия;

τ - время релаксации;

η_3 - динамическая вяз-

кость.

Реакция полимера на действие механических напряжений может быть представлена моделью, изображенной на рис. 1.

В уравнении (1) первый член описывает мгновенную упругую деформацию полимера. При этой деформации происходит изменение формы молекул и расстояний между ними. Она

определяется величиной модуля G_1 , который достаточно велик и имеет порядок $10^{10} - 10^{11}$ дин/см². Он определяет свойства полимера в области низких температур. Второй член описывает высокоэластическую деформацию, при которой происходит распрямление цепей молекул и их ориентация в направлении главного напряжения. Значение модуля G_2 много меньше G_1 и имеет порядок $10^6 - 10^7$ дин/см², и его величина пропорциональна температуре. Третий член уравнения соответствует высоковязкому течению, при котором происходит перемещение всей молекулы.

При очень высоких температурах полимер проявляет свойства жидкости с вязкостью η_3 . В области низких температур постоянная η_3 настолько велика, что этим членом уравнения можно пренебречь.

Большое значение имеет также время воздействия напряжений. Если оно много меньше времени релаксации, то полностью проявляется только упругая деформация. При достаточно большом времени воздействия напряжений возникает высоковязкая деформация. Если время воздействия соизмеримо с временем релаксации, то преобладает вязкоупругая деформация. Следовательно, величина деформации эмалевой пленки зависит от ряда факторов, а именно - температуры, величины и времени воздействия нагрузки.

В процессе намотки моточных изделий провод дополнительно изгибается, во многих случаях с достаточно малым радиусом изгиба. При этом наружные волокна изоляции деформируются под действием растягивающих нагрузок, а на внутренние слои воздействует проводник, стремящийся продавить изоляцию и сместиться в сторону центра обмотки. Вследствие этого в изоляции возникают сжимающие напряжения, противодействующие жиле. Величина их может быть рассчитана по методике, предложенной в [2]:

$$\sigma = \frac{2F}{\eta d (R + \delta)}, \quad (2)$$

где

σ - сжимающие напряжения в жиле, МПа;

F - величина натяжения провода, Н;

d - номинальный диаметр провода, м;

R - радиус изгиба провода, м;

δ - радиальная толщина изоляции, м.

Анализ приведенного выражения показывает, что величина сжимающих напряжений в основном зависит от величины натяжения и радиуса изгиба провода при намотке и номинального диаметра провода.

В связи с малой толщиной изоляции эмалирован-

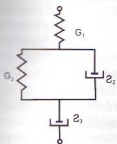


Рис. 1
Модель реакции полимера на действие механических напряжений

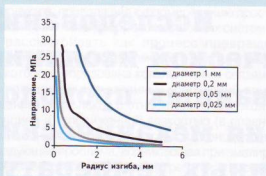


Рис.2. Зависимость механических напряжений в изоляции эмалированных проводов от радиуса изгиба при намотке

ных проводов при расчете сжимающих напряжений ею можно пренебречь. По приведенному выражению проведем расчет напряжений в изоляции. Расчетные значения величин сжимающих напряжений, возникающих в изоляции проводов при изготовлениимоточных изделий, когда провода наматываются на оправки разных диаметров, представлены на рис. 2. Рассматривая полученные зависимости, можно сказать, что с ростом радиуса изгиба ($R \geq 20d$) напряжения уменьшаются и в дальнейшем практически мало изменяются.

При эксплуатации моточных изделий в условиях повышенных температур и воздействия механических нагрузок возможно продавливание изоляции до жилы и образование короткозамкнутых витков. Для оценки стойкости изоляции к продавливанию используется характеристика "термопластичность". В соответствии с принятыми методиками, определение термопластичности [3] проводится по следующему методу: два образца провода, пересекающиеся под прямым углом, помещаются в камеру с повышенной температурой. После прогрева образцов до необходимой температуры в точке их пересечения прикладывается нагрузка, зависящая от диаметра проводов. Если диаметр испытываемых проводов менее 0,2 мм, то два образца помещаются параллельно, а третий пересекает их под прямым углом. В процессе испытания контролируется температура продавливания изоляции, при этом образец считается выдержавшим испытание, если время продавливания изоляции не менее 2 мин. Для фиксирования момента продавливания между жилами испытываемых проводов прикладывается переменное напряжение величиной 100 ± 10 В.

При сдавливании двух проводов одинаковых диаметров, пересекающихся под прямым углом, максимальное напряжение [4] в месте контакта для начального момента времени определяется выражением (3).

$$\sigma_{\max} = 0,388 \sqrt{\frac{4PE^2}{d^2}}, \quad (3)$$

где:

P - величина прикладываемой нагрузки, Н;

E - модуль упругости, МПа;

d - диаметр провода, м.

В большинстве катушечных обмоток, если считать,

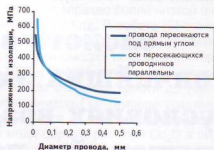


Рис.3. Зависимость величины механических напряжений в изоляции проводов от диаметра провода

что шаг их намотки много меньше диаметра жевитика катушки, оси проводников располагаются практически параллельно друг другу. В этом случае максимальные напряжения в месте контакта проводов двух соседних слоев определяются выражением:

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{\frac{4PE}{ld}}, \quad (4)$$

где:

l - длина рассматриваемого места контакта, м.

Такие же величины напряжений возникают в месте контакта двух проводников и при испытании эмалированных проводов по методике, изложенной в [5], в соответствии с которой определяется прочность склеивания двух соседних проводников обмотки после воздействия повышенной температуры, равной T_1 .

При этом следует иметь в виду, что площадь контакта в зависимости от времени действия нагрузки и температуры меняется, как правило, в сторону увеличения.

Анализ проведенных выражений показывает, что напряжения растут с уменьшением диаметра провода. Для сравнения величин напряжений, возникающих в разных случаях, длину места контакта при параллельном расположении проводников примем равной диаметру провода.

Расчетные величины контактных напряжений, возникающих в изоляции при различных случаях расположения проводников, представлены на рис. 3. Анализ результатов показывает, что условия определения термопластичности достаточно точно воспроизводят реальные термомеханические напряжения, возникающие в обмотках моточных изделий.

С целью исследования возможности применения этих методов оценки работоспособности изоляции тончайших эмалированных проводов в условиях механических нагрузок и повышенных температур были проведены испытания проводов с полиэфиримидной изоляцией. Для этого на эмалирегате типа 2НОРЕ-МФ/12 были изготовлены образцы проводов диаметром 0,05 мм по различным технологическим режимам. Скорость эмалирования менялась от 75 до 250 м/мин (в значительно больших пределах, чем в условиях серийного производства). В процессе эксперимента температура эмалирования не менялась. Постоянные были и остальные параметры процесса эмалиро-

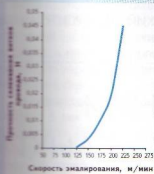


Рис.4а. Зависимость прочности склеивания витков провода от скорости эмалирования

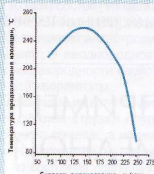


Рис.4б. Зависимость температуры продавливания изоляции от скорости эмалирования

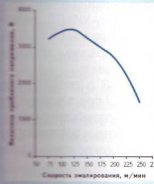


Рис.4в. Зависимость величины пробивного напряжения от скорости эмалирования

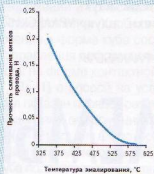


Рис.5а. Зависимость прочности склеивания витков провода от температуры эмалирования

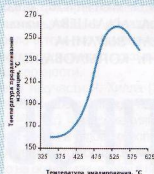


Рис.5б. Зависимость температуры продавливания изоляции от температуры эмалирования

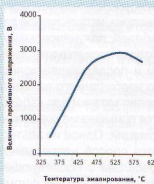


Рис.5в. Зависимость величины пробивного напряжения от температуры эмалирования

вания; положения шиберов, регулирующих тепловые потоки, число проходов и т.д. На полученных образцах были определены температура продавливания изоляции, прочность склеивания витков провода, величина пробивного напряжения. Результаты испытаний представлены на рис. 4. На основании полученных результатов можно оценить, что оптимальные скорости эмалирования лежат в пределах 125 - 175 м/мин.

С целью оценки максимальной производительности оборудования без снижения качества эмалированных проводов были изготовлены образцы проводов при изменении температуры от 350°C до 600°C. Остальные параметры процесса эмалирования в течение всего времени изготовления образцов оставались неизменными. Результаты испытаний полученных образцов проводов, представленные на рис. 5, показывают, что температуры эмалирования должны быть не менее 500°C, т.к. при меньшей температуре провода не выдерживают испытания на термопластичность, резко снижается величина пробивного напряжения и увеличивается прочность склеивания витков провода.

Анализ результатов, полученных в процессе эмалирования, показывает, что температура продавливания изоляции имеет максимум в узком диапазоне температур и скоростей эмалирования, в то время как величина пробивного напряжения остается постоянной в широком диапазоне параметров технологического процесса. Поэтому при обработке технологического процесса эмалирования для контроля качества проводов необходимо использовать, кроме величины пробивного напряжения, показатели термомеханики: температуру продавливания изоляции и прочность склеивания витков провода.

Выводы:

1. При намотке катушек в изоляции проводов возникают сжимающие напряжения, которые зависят от натяжения провода и радиуса изгиба. При радиусе изгиба, равном или более 50-кратного диаметра провода, напряжения в изоляции остаются практически постоянными.
2. При соприкосновении двух проводников в месте контакта возникают контактные напряжения, которые зависят от диаметра провода, прикладываемой нагрузки и взаимного расположения проводников.
3. Способность изоляции эмальпроводов размягчаться и продавливаться в условиях механических воздействий и повышенной температуры зависит от технологических режимов изготовления. При незавершении процесса полимеризации (большая скорость эмалирования или низкая температура в эмальпечи) или длительном воздействии температуры изоляция проводов имеет повышенную склонность к продавливанию.

Список литературы

1. Альфрей Т. Механические свойства высокополимеров. Изд-во И.-Л., М., 1952. 620 с.
2. Дикерман Д.Н., Рывкин Г.А. О расчете стойкости проводов и изолированных жил к продавливанию. Электротехн. пром-ть. Сер. Кабельная техника. 1970. Вып. 69.
3. ГОСТ 14340.11-69. Провода эмальированные круглые. Метод определения термопластичности изоляции.
4. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Изд-во "Наука", 1965. 856 с.
5. Андрианов В.К., Бойко В.И., Парыгин В.С., Филиппова А.А. Новый метод исследования технологии изготовления тончайших эмальированных проводов. Электротехн. пром-ть. Сер. Кабельная техника. 1983. Вып. 6 (220).