

В.К. Андрианов, канд. техн. наук, зав. отделом ОАО «ВНИИКП»;

О.Б. Бураков, зав. лабораторией ОАО «ВНИИКП»;

Е.В. Быков, канд. физ-мат. наук, технический директор ЗАО «Электронфтемаш»

К ОЦЕНКЕ СТОЙКОСТИ К ИСТИРАНИЮ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

В последнее время наблюдается тенденция повышения уровня технических требований к обмоточным проводам со стороны потребителей. В частности, потребители обмоточных проводов с пленочной изоляцией настаивают на увеличении их механической прочности, оцениваемой по стойкости к истиранию более, чем в 6 раз, доводя тем самым уровень требований до «физического предела» существующих конструкций. В этой ситуации необходимо пересмотреть принятые в технических условиях принципы нормирования и методы испытаний изоляции на механическую прочность, которые были рассчитаны на то, что провода имеют большой «запас прочности» и можно не учитывать некоторые особенности процесса истирания. Теперь, когда этот «запас» ликвидируется, требуется более точный алгоритм нормирования и оценки результатов определения стойкости к истиранию. Оставляя прежний «грубый» подход к нормированию этого показателя, мы тем самым теряем объективность оценки результатов испытаний, что приводит к необоснованным претензиям к качеству проводов и ничем не оправданным материальным потерям производителей. Возникают ненужные проблемы во взаимоотношениях между производителями и потребителями, которые можно устранить путем корректировки требований к механической прочности изоляции.

Речь идет о следующем. Для оценки механической прочности изоляции обмоточных проводов используется метод истирания иглой определенного диаметра, находящейся под заданной нагрузкой (ГОСТ 14340.10–69, ГОСТ 15634.2–70). При этом нормируются три величины:

диаметр иглы d , нагрузка на иглу P и число возвратно-поступательных ходов иглы N . Вместе с тем, опыт показывает, что число возвратно-поступательных ходов иглы N зависит еще и от диаметра провода D , как это показано на рис. 1 на примере круглых проводов с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией. К сожалению, наличие такой зависимости учитывается ГОСТом 14340.10–69 только для эмалированных проводов. Для остальной номенклатуры обмоточных проводов нормирование механической прочности ведется без учета зависимости $N(D)$. В частности, в технических условиях на обмоточные провода с пленочной изоляцией предписывается проведение испытаний по оценке механической прочности (по числу двойных ходов иглы) с одинаковой нагрузкой на иглу, независимо от диаметра провода. Естественно, что это ставит провода разных диаметров в заведомо неравные условия испытаний, не позволяет объективно оценить качество технологии их изготовления и, кроме того, вводит в заблуждение как изготовителей, так и потребителей проводов.

Все вышесказанное убеждает нас в необходимости внести некоторую ясность в рассматриваемый вопрос. В частности, представляется полезным иметь оценочные соотношения (в силу не тривиальности задачи), позволяющие получить ориентиры для нормирования механической прочности изоляции обмоточных проводов и планирования соответствующих экспериментов. Поскольку процесс истирания изоляции иглой достаточно сложен для строгого количественного описания в силу подверженности его воздействию множества случайных факторов, то мы ограничимся попыткой получения лишь грубых оценок интересующего нас соотношения между числом двойных ходов иглы N , диаметром провода D , толщиной изоляции δ и условиями проведения испытаний (d, P).

Будем исходить из следующих простых соображений. Предположим, что за один проход игла удаляет (сдирает) слой изоляции, пропорциональный деформации последней, то есть слой, пропорциональный глубине продавливания h . Тогда можно полагать, что число ходов иглы до разрушения изоляции будет зависеть от отношения «оставшейся» толщины $(\delta - h)$ к ее деформации h под действием груза P (рис. 2):

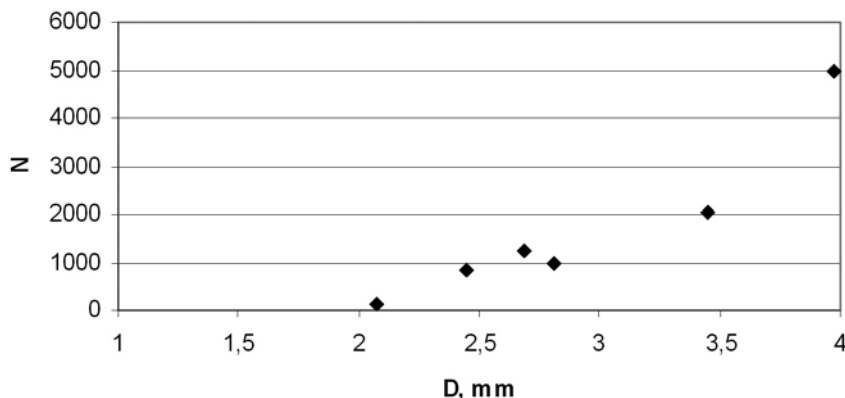


Рис. 1. Пример зависимости среднего числа двойных ходов иглы от диаметра провода типа ППИ-У при постоянной нагрузке 1 кг

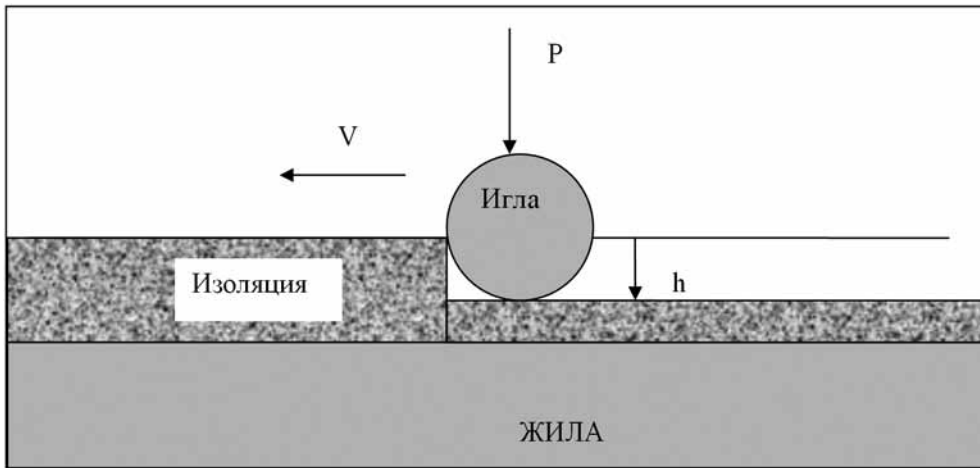


Рис. 2. Схема движения иглы по изоляции провода

$$N = f\left(\frac{\delta - h}{h}\right) = f\left(\frac{\delta}{h} - 1\right). \quad (1)$$

Очевидно, что функция (1) должна удовлетворять следующим предельным условиям: $N \rightarrow 0$ при $\delta/h \rightarrow 1$

(большая нагрузка на иглу) и $N \rightarrow \infty$ при $\delta/h \rightarrow \infty$ (малая нагрузка на иглу). Этим предельным соотношениям удовлетворяет степенная функция, обладающая свой-

ством масштабной инвариантности $f(x) \cdot a^m = f(a \cdot x)$. Таким образом, положим, что

$$N \sim \left(\frac{\delta}{h} - 1\right)^m, \quad (2)$$

где a – коэффициент масштаба; m – показатель степени, значение которого определяется природой изучаемого объекта.

Деформация изоляции h зависит от давления иглы на провод $\sigma \sim \frac{P}{S}$ (S – площадь опоры иглы на проводе)

в общем случае нелинейным образом в силу того, что механический модуль в общем случае зависит от напряжения, то есть

$$\sigma = E(\sigma) \cdot \frac{h}{\delta}, \quad (3)$$

где δ – толщина изоляции.

Поскольку при приближении величины σ к значению, соответствующему разрывной прочности материала σ_p , удлинение резко возрастает, то это означает, что функция $E(\sigma)$ должна стремиться к нулю при $\sigma \rightarrow \sigma_p$. Это позволяет предположить спра-

ведливость следующего соотношения:

$$E(\sigma) \sim \left(\frac{\sigma_p - \sigma}{a}\right)^k, \quad (4)$$

где k – параметр, определяемый экспериментально.

Из соотношений (2) и (3) следует

$$\sigma \sim \left(\frac{\sigma_p - \sigma}{a}\right)^k \frac{h}{\delta}. \quad (5)$$

Если мы работаем в области далекой от разрушения изоляции, то есть $\sigma < \sigma_p$, то можно попытаться воспользоваться линейным приближением:

$$\sigma \sim \left(\frac{\sigma_p}{a}\right)^k \cdot \left(1 - k \frac{\sigma}{\sigma_p}\right) \cdot \frac{h}{\delta}, \quad \sigma < \sigma_p, \quad (6)$$

которое позволяет вычислить искомое отношение δ/h из (2). Для вычисления зависимости σ от нагрузки P и площади сечения S обратимся к рис. 3. Площадь S давления иглы на круглый провод в соответствии с рис. 3 имеет вид прямоугольника со сторонами (хордами) $2x$ и $2y$, то есть $S = 2x \cdot 2y$, где хорда $2x$ относится к проводу, а хорда $2y$ – к игле. Из рис. 2 легко выразить хорды и площадь через деформацию h изоляции:

$$x^2 = h(D - h), y^2 = h(d - h). \quad (7)$$

С учетом малости h по отношению к d и D приблизительно получаем:

$$S \approx 4h \cdot \sqrt{Dd}, \quad (8)$$

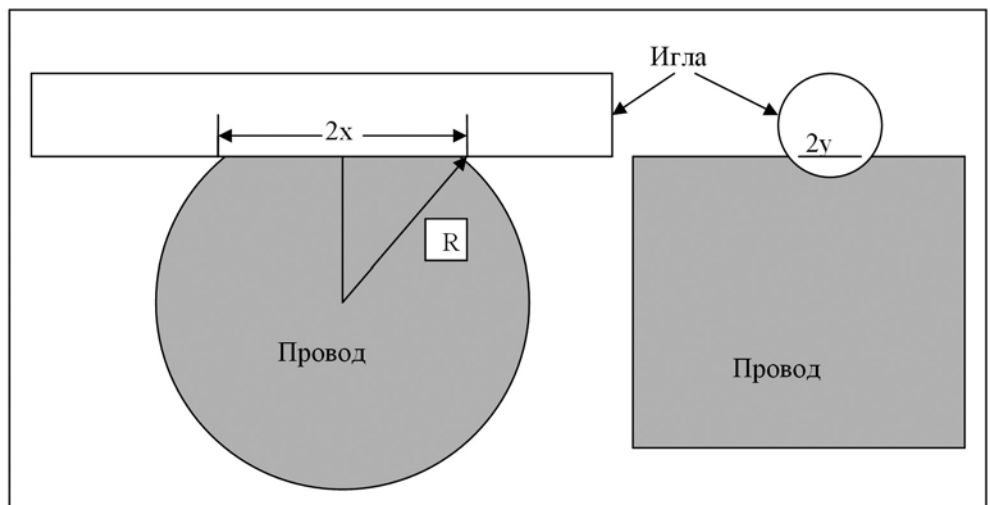


Рис. 3. Схема для расчета давления иглы на провод

где D и d – диаметры провода и иглы соответственно. Отсюда, в соответствии с соотношениями (6) и (8) получаем следующее выражение для деформации (в линейном приближении)

$$\frac{h}{\delta} \sim \frac{1}{\sqrt{\delta}} \left(\frac{a}{\sigma_p} \right)^k \sqrt{\frac{P}{4\sqrt{Dd}}} \quad (9)$$

Подстановка (9) в соотношение (2) приводит к искомому результату:

$$N \sim \left(2 \left(\frac{\sigma_p}{a} \right)^{k/2} \sqrt{\frac{\delta}{P}} \cdot (Dd)^{1/4} - 1 \right)^m \quad (10)$$

где диаметр провода D равен сумме диаметра жилы D_0 и удвоенной толщины изоляции 2δ :

$$D = D_0 + 2 \cdot \delta \quad (11)$$

В случае, когда $N \gg 1$, то единиц в правой части (10) можно пренебречь, переписав это соотношение в более простой форме

$$N \sim \left(2 \left(\frac{\sigma_p}{a} \right)^{k/2} \sqrt{\frac{\delta}{P}} \cdot (Dd)^{1/4} \right)^m \quad (12)$$

которая после логарифмирования становится удобной для анализа функций

$$\ln(N) \sim \text{const} + \frac{m}{2} \ln \left(\frac{\delta}{P} \sqrt{(D_0 + 2\delta)d} \right) \quad (13)$$

линейно зависящей от одной комбинированной переменной $\ln \left(\frac{\delta}{P} \sqrt{(D_0 + 2\delta)d} \right)$. В формуле (13) введено

обозначение $\text{const} = m \cdot \ln \left(2 \left(\frac{\sigma_p}{a} \right)^{k/2} \right)$. Для плоского случая вместо \sqrt{D} следует подставлять размер провода по широкой стороне, по которой движется игла.

Из полученного соотношения (13) видно, что число ходов иглы сильнее зависит от толщины изоляции δ и нагрузки на нее P , нежели от диаметров иглы и провода.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные, полученные для круглых проводов разных диаметров с эмалевой (ПЭТВ-2) и с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией разной толщины. В эксперименте варьировались: для эмалированных проводов – толщина изоляции от 0,017 до 0,019 мм, диаметр провода от 0,28 до 0,4 мм, диаметр иглы от 0,23 до 0,6 мм, нагрузка от 200 до 540 г; для проводов с пленочной изоляцией – толщина изоляции от 0,1 до 0,32 мм, диаметр жилы от 1,4 до 3,52 мм, нагрузка на иглу от 0,5 до 1,2 кг при неизменном диаметре

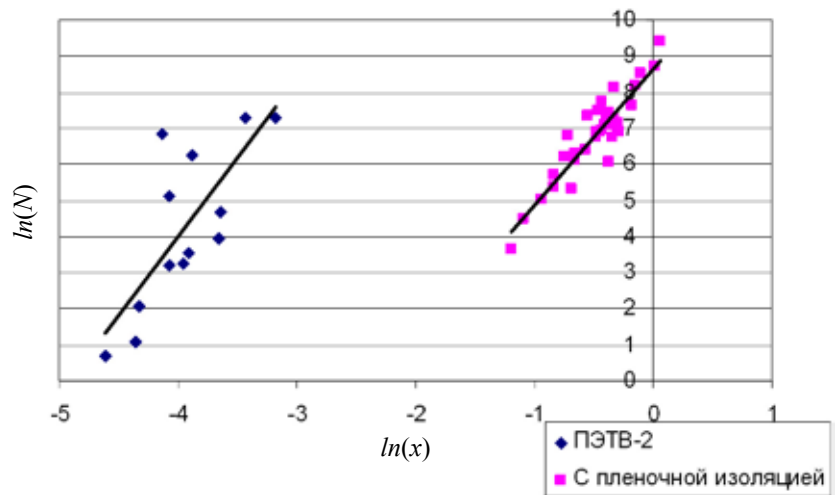


Рис. 4. График функции (13) для круглых проводов с пленочной и эмалевой изоляцией, где $x = \ln \left(\frac{\delta}{P} \sqrt{(D_0 + 2\delta)d} \right)$

иглы 0,63 мм. Несмотря на большой разброс данных, характерных для этого метода испытаний, рис. 4 свидетельствует о том, что в целом соотношение (13) представляется правдоподобным. При этом значения наклона прямых для обоих типов проводов оказываются достаточно близкими: для эмалированных проводов $\frac{m}{2} = 4,4$, для проводов с пленочной изоляцией $\frac{m}{2} = 3,8$.

Если полученные результаты справедливы, то эквивалентность испытаний проводов разных диаметров, определяемая условием постоянства N , сводится к эквивалент-

ному условию $\left(\frac{\delta}{P} \sqrt{(D_0 + 2\delta)d} \right) = \text{const}$. Это условие, с одной стороны, обеспечивает эквивалентность механических испытаний проводов разного диаметра, а с другой – позволяет сравнивать провода разной конструкции и оценить качество технологии, что очень важно при массовом производстве. Кроме того, из указанного условия эквивалентности испытаний следует нелинейная связь между нагрузкой на иглу и диаметром провода ($P \sim \sqrt{D}$), в то время как ГОСТ 14340.10–69 предписывает для эмалированных проводов линейную связь между этими величинами, а технические условия на обмоточные провода с пленочной изоляцией вообще игнорируют эту зависимость. Значимость этой зависимости можно продемонстрировать на простом примере. Если испытания проводов с пленочной изоляцией диаметром 3,0 мм проводятся при нагрузке 1 кг, то эквивалентная нагрузка для проводов диаметром 2,0 мм составит всего $0,7 \text{ кг} \cdot \varepsilon = 1/\sqrt{2}$. Если же нагрузку на иглу не менять, то разница в числе ходов иглы согласно соотношению (13) составит примерно $(1,5)^{1,9} \sim 2,2$ раза. Эта очень большая разница, которая в итоге при росте требований к механической прочности изоляции приведет к неоправданной «выбраковке» качественных проводов с меньшими диаметрами. Такова цена вопроса игнорирования закономерностей процесса истирания.

В заключение необходимо отметить еще одно обстоятельство, которое следует иметь в виду при нормировании

Статистические данные (гистограмма) по механической прочности круглых проводов

Провод с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией $D = 2,12$ мм		Эмалированный провод $D = 2,65$ мм	
число ходов	частота*	число ходов	частота*
497	1	36	1
675	15	92	6
854	16	147	8
1032	13	203	4
1211	13	258	8
1389	7	295	3
1567	7		
1746	3		
1854	4		

* Количество результатов, соответствующих данному числу ходов

механической прочности обмоточных проводов. Речь идет о малой статистической устойчивости данных, то есть метод испытаний дает очень большой разброс результатов в силу его высокой чувствительности к случайным колебаниям условий испытаний (соответствующие данные приведены в таблице): разбросу по диаметру иглы, разбросу по диаметру жилы, аккуратности балансировки коромысла, вибрациям прибора, и даже к направлению вращения эксцентрика, приводящего коромысло с иглой. При этом для каждого конкретного измерения невозможно определить степень влияния на результат собственно образца и методической погрешности. Это связано с большим давлением на изоляцию, делающим сам процесс истирания неустойчивым по отношению к случайным возмущениям, перечисленным выше. Представления о величине разброса дают статистические данные, приведенные в таблице. Из этих данных видно, что для проводов с пленочной изоляцией мы имеем 4-кратный размах данных, а для эмалированных проводов – 8-кратный.

В этой ситуации нормирование минимальных значений механической прочности теряет всякий смысл без указания объема испытаний и вероятности достижения установленной нормы. Связано это с тем, что в этом случае оценка соответствия норме осуществляется по единично-

му минимальному (или максимальному) значению, выбираемому из всей совокупности полученных результатов испытаний. Вместе с тем известно [1–3], что, с одной стороны, единичные измерения в условиях статистического разброса не отличаются устойчивостью и не могут эффективно характеризовать испытываемый объект, а с другой – разность между крайними значениями растет по мере роста объема выборки n : $(x_{max} - x_{min}) \sim n^k$, где $0,5 < k < 1$.

Поэтому нормирование обычно ведется на основе усреднения статистического набора данных, которое отличается устойчивостью, то есть повторяется с небольшими вариациями от выборки к выборке. При этом колебания уменьшаются по мере роста объема выборки. Это обстоятельство особенно важно иметь в виду в условиях, когда нормы приближаются к физическому пределу конструкции (что, вообще говоря, само по себе в инженерной практике не допустимо).

Литература



1. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.
2. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
3. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965

**ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА»
ЧЕРЕЗ РЕДАКЦИЮ на I полугодие 2009 г. (3 номера)**

Стоимость подписки (с учетом НДС – 18%):

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 885 руб.
 для учебных заведений и студентов – 354 руб.
 для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1062 руб.
 для подписчиков других зарубежных стран – € 30

По вопросам подписки обращайтесь

к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу: ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;
 КПП 772201001;
 ОКОНХ 87100
 р/с: 40702810238120102932
 в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва
 «Сбербанк России ОАО», г. Москва,
 к/с: 30101810400000000225
 БИК 044525225; ОКПО 18711078.

Подписной индекс

в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**