

А.В. Андрианов, инженер ОАО «ВНИИКП»;

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

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

ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КАК КРИТЕРИЙ ГОДНОСТИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

При проведении испытаний на надежность или при определении температурного индекса (ТИ) эмалированных проводов в соответствии с технической документацией основным критерием состояния их изоляции является среднее значение (U_{np}) пробивного напряжения [1, 2, 3]. При этом наблюдаемое на практике монотонное снижение U_{np} трактуется как уменьшение электрической прочности E_{np} изоляции ($U_{np} = E_{np} \cdot \delta$, где δ – толщина изоляции). Вместе с тем опыт показывает, что химические процессы (сшивка и деструкция), которые протекают в эмалевой изоляции в процессе теплового старения, не снижают заметным образом ее электрическую прочность, так как при этом не возрастает концентрация подвижных носителей зарядов, которые являются основным источником роста электропроводности и, как следствие, снижения электрической прочности [4, 7]. Это подтверждается результатами испытаний эмалированных проводов, проведенных в ОАО «ВНИИКП» по методике ОСТ В 16 0.800-441-77. Об этом, в частности, свидетельствует неизменность верхних значений пробивного напряжения в массивах данных, получаемых при старении эмалированных проводов (меняется лишь их доля в массиве), и не возрастание диэлектрических потерь в температурной области, лежащей ниже перехода стеклования. В то же время, начиная с некоторого момента времени, в левой части статистического распределения $F(U_{np})$ образуется «хвост», который тянется вплоть до нулевых значений и указывает на появление дефектов в изоляции, свидетельствующих о ее разрушении. Со временем «вес» этого «хвоста» увеличивается, что видно из табл. 1, подробный комментарий к которой будет дан ниже. Здесь лишь отметим, что при каждой выемке пробивалась вся группа образцов.

Появление «хвоста» распределения $F(U)$ на фоне слабо меняющейся электрической прочности E изоляции наводит на мысль о статистической, а не о физической природе наблюдаемого снижения среднего значения пробивного напряжения. Попробуем показать это на простой модели.

Прежде всего, заметим, что провод является одномерным объектом, статистические показатели качества которого можно охарактеризовать линейной плотностью λ дефектов, которые случайным образом распределены по его длине. Это значит, что вероятность отсутствия дефектов на длине L может быть вычислена по известной формуле [1]

$$p(L) = \exp(-\lambda L) \quad (1).$$

Случайный характер распределения дефектов по длине означает, что испытуемый образец длиной L может содержать дефект с вероятностью $q(L) = 1 - p(L)$, а может и не содержать его с вероятностью $p(L)$. Поскольку в начальный

период старения линейная плотность дефектов λ мала (или отсутствует вовсе, т.е. $\lambda = 0$), то согласно (1) имеется очень малая вероятность того, что мы сможем обнаружить разрушение на ранней стадии, особенно, если контроль ведется на небольшом количестве коротких образцов. Вероятнее всего, что процесс разрушения мы обнаружим на относительно поздних стадиях, когда произведение λL будет приближаться к 1 и в выборке появятся дефектные образцы с низким значением пробивного напряжения.

Представим себе, что пробивное напряжение провода в среднем всюду одинаково и характеризуется значением u . В процессе теплового старения, начиная с какого-то времени, в эмалевой изоляции появляются дефекты в виде дырок или трещин с близким к нулевому значению пробивным напряжением (что зависит от методики испытаний). Эти дефекты появляются в случайные моменты времени, распределены случайным образом по образцам и легко идентифицируются под небольшим напряжением в соленой воде. Это значит, что любой из образцов в случайный момент времени «скачком» может перейти из состояния с пробивным напряжением u в состояние с нулевым значением пробивного напряжения. Со временем число таких образцов будет расти в соответствии с ростом λ . Исходя из этих модельных посылок, легко вычислить среднее значение пробивного напряжения U одиночного провода длиной L :

$$U = u \cdot p + 0 \cdot (1 - p) = u \cdot p = u \cdot \exp(-\lambda L) \quad (2)$$

и дисперсию

$$D = (u - U)^2 \cdot p + (0 - U)^2 \cdot (1 - p) = u^2 \cdot p \cdot (1 - p),$$

где параметр $\lambda(t)$ является неубывающей функцией времени старения провода. Из приведенной формулы следует, что при отсутствии дефектов, когда $\lambda = 0$, среднее значение пробивного напряжения провода по выборке равно исходному значению u . В процессе старения, начиная с некоторого момента t_0 , станут появляться дефекты, обуславливающие рост параметра $\lambda(t - t_0)$. Это в свою очередь приведет согласно (2) к снижению среднего значения пробивного напряжения при неизменном значении u «здоровой» части изоляции образцов. На практике это снижение вызвано ростом доли дефектных образцов.

Аналогичные результаты можно получить и для скруток, если учесть, что в этом случае будут иметь место три уровня пробивного напряжения: $2u$, u , 0 . Эти формулы несколько сложнее, но сути дела они не меняют.

Таким образом, наблюдаемое снижение электрической прочности изоляции является чисто статистическим эффектом

Таблица 1

Изменение статистики пробивного напряжения для провода ПЭВ 0,10 мм в процессе термостарения при 170 °С (образцы в виде скруток)

U _{пр} , кВ	Время старения, сутки													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,4								1			2	1	5	
0,6								3	5	2	6	4	12	
0,8							4	3		2	1	2	3	
1						2		1				3		
1,2								1	2	1		1		
1,5				1	1		1	1	1	1	5	2		
1,7							2	1	1	1		1		
2	1			1	2		4	2	2		1			
2,2	–	1							2	2	1	1	2	
2,5	2		1			2	1		2	1	2		2	
2,8							4	1	1	4	2	1	3	
3		3			1	1	3	2	2	2	4	2		
3,3	1		1				2			2	3	1		
3,5					2	2	3	1						
3,8			1			1	1	3			1			
4		4			4	6	1	3						
4,5	–	2	2		2	1								
4,8	3			6	4									
5	3	4						2						
5,3	–	1	1		1									
5,5	3													
5,8	–	3			2		1							
6,2	2	1	3	3										
6,5	1		2											
6,8	4													
7			3	7		1								
7,2							1							
7,5				2										
7,8					1									
8		1												
8,2			2	1										
9,5			1											
<U>	4,9	4,7	5,9	6,1	4,2	3,6	3,2	2,8	1,6	1,9	2,3	1,4	1,4	0,53
S*	1,7	1,4	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	0,9	1	1	1,1	0,8	0,1

* S – стандартное отклонение

и не связано со снижением электрической прочности изоляции ($u = \text{const}$). Индикатором начала разрушения изоляции могут служить отдельные случаи обнаружения образцов с аномально низкими значениями пробивного напряжения по отношению к исходному значению u . Естественно, чем больше объем L испытываемой выборки (или производство количества образцов на их длины), тем раньше можно обнаружить эти выпадки, т.е. начало разрушения изоляции.

Теперь вернемся к табл. 1. В ней отражены результаты испытаний, полученные на скрутках. Эти результаты на наш взгляд полностью «вписываются» в рамки изложенной статистической модели. Действительно, размеры дефектов малы и располагаются они вдоль образца случайным образом. До появления дефектов все образцы будут пробиваться при напряжении близком к значению $2u$. В нашем случае

это соответствует напряжению 7–8 кВ (для определенности мы ориентируемся на верхние значения в выборке) и ситуация сохраняется примерно до 5 суток (некоторый рост верхнего уровня пробивных напряжений в первое время вызван удалением из изоляции остатков растворителя и низкомолекулярных летучих продуктов полимеризации, что согласуется с приведенной выше аргументацией относительно неизменности электрической прочности в процессе испытаний). Момент появления дефекта на одной из ветвей скрутки приводит примерно к двукратному падению пробивного напряжения. В нашем случае до значения 3–4 кВ, что наблюдается после 6 суток. Когда дефектов становится много и увеличивается их размер, то высока вероятность их совпадения с обеих ветвей скрутки. В этом случае мы получаем образцы с нулевым значением пробив-

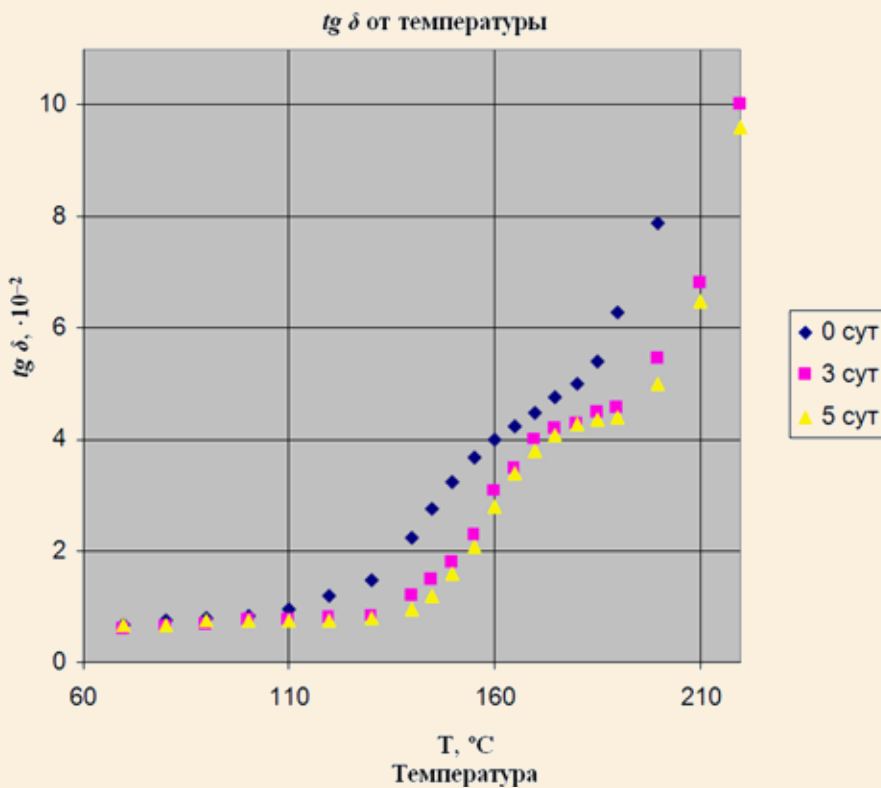


Рис. 1. Изменение положения кривой зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры провода ПЭТВ-2 0,224 в зависимости от времени старения при температуре 180 °С

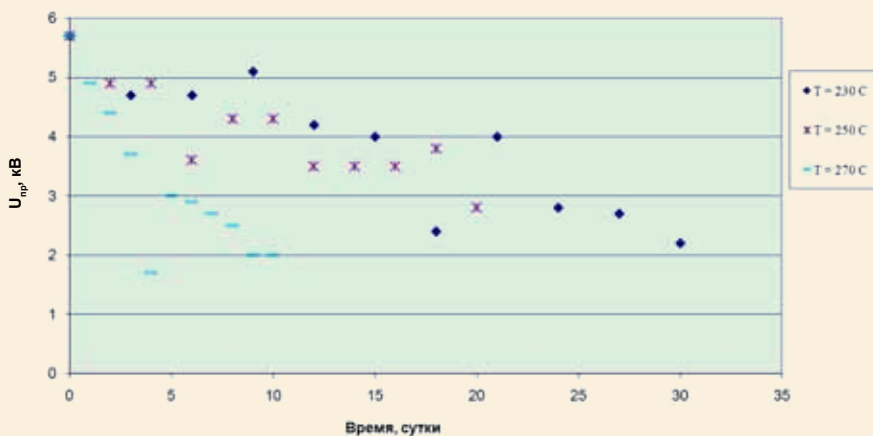


Рис. 2. Изменение средних значений пробивного напряжения проводов ПЭТ-200, 0,20 мм в процессе теплового старения при разных температурах (испытания напряжением в скрутках)

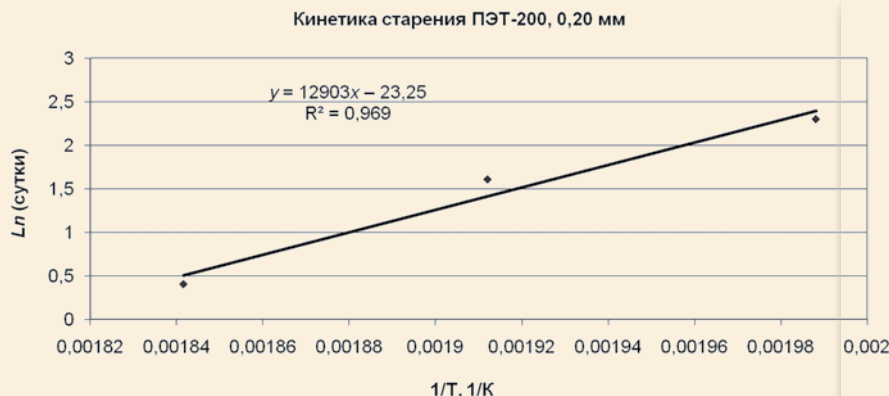


Рис. 3. Зависимость (3), построенная по данным, соответствующим снижению минимальных значений пробивного напряжения

ного напряжения, что и наблюдается после 8 суток, когда уже не остается «здоровых» образцов. В этот период максимальное значение пробивного напряжения не превышает 3,5 кВ, что соответствует пробую скрутки с одной дефектной ветвью.

Естественно, что в силу вариации толщины изоляции, малого объема выборок и возможной деформации эмали при высоких температурах картина получается несколько размытой, но в целом она не противоречит изложенным выше соображениям.

Таким образом, пробивное напряжение реально выполняет роль индикатора типа «да-нет». Оно способно лишь констатировать факт наличия или отсутствия разрушения изоляции и не связано с процессами, приводящими к разрушению изоляции. Поэтому пробивное напряжение не обладает «предсказательными возможностями».

Скачкообразное изменение пробивного напряжения есть следствие механического разрушения изоляции. Не случайно все методики, связанные с определением ресурса полимерных материалов, используют в качестве критериев годности их механические свойства, которые плавно изменяются в течение всего времени испытаний вслед за химическими и физическими процессами, протекающими в материале.

Нам представляется, что для целей прогнозирования времени разрушения изоляции и предсказания ее ресурса необходимо выбирать альтернативные по отношению к пробивному напряжению показатели ее физического состояния. Это отдельная большая тема, которая не является предметом настоящей статьи. Здесь же, как пример, мы лишь отметим в качестве одного из возможных претендентов на роль показателя состояния эмали – положение перехода стеклования эмали, отражающего степень сшивки эмали и которое непрерывно меняется в зависимости от изменения этой величины. За динамикой смещения перехода стеклования можно наблюдать различными способами: с помощью динамического механического анализа, термомеханического анализа [6]), с помощью измерения тангенса угла диэлектрических потерь при сканировании температуры (пример на рис. 1; данные получены в ОАО «ВНИИКП» по методике ГОСТ Р МЭК 60851-5-2002) и т.п.

Напоследок вернемся к формуле (2) и отметим, что из нее все же можно извлечь некоторую пользу. Дело в том, что скорость роста параметра $\lambda(t-t_0)$ по своей природе должна быть связана со

скоростью старения изоляции, так как ею же и обусловлена. Поэтому есть основание полагать, что по кривым $U_{пр}(t)$, построенным для разных температур, удастся вычислить энергию активации процесса старения изоляции. Для этого следует провести стандартные испытания при нескольких температурах, для которых снять соответствующие кривые $U_{пр}(t)$. В частности, на рис. 2 приведены кривые изменения средних значений пробивного напряжения для провода ПЭТ-200 диаметром 0,2 мм в процессе термостарения при температурах 230, 250 и 270 °С. Если в качестве критерия отказа условно принять 50 %-ое снижение среднего значения пробивного напряжения, то по экспериментальным данным мы получим соответствие между испытательной температурой старения T и временем до отказа t при этой температуре. Эти экспериментальные точки должны подчиняться известной аррениусовской зависимости, график которой в полулогарифмических координатах представляет собой прямую линию [5] (рис. 3):

$$\ln(t) = \ln(t_0) + \frac{A}{T}, \quad (3)$$

где t – время (сутки) достижения условно-предельного состояния эмали при заданной температуре старения T , K (в нашем случае для 230, 250 и 270 °С), t_0 – параметр (сутки), $A = E/R$ – отношение энергии активации процесса старения к газовой постоянной ($R = 8,3$ Дж/(моль·град)).

Как следует из рис. 3, экспериментальные данные неплохо согласуются с нашими предположениями. При этом отношение E/R имеет вполне адекватное значение (12900 ± 1900) °К, что соответствует энергии активации $E = 107,1$ кДж/моль или 25,5 ккал/моль.

В заключение сделаем одно замечание к графикам на рис. 2. Дело в том, что тепловые испытания скруток эмалированных проводов проводятся при температурах, превышающих область стеклования полимера, когда изоляция становится пластичной. В этой ситуации изоляция может деформироваться под действием механических напряжений, возникающих при изготовлении скруток. Как следствие – появление «хвостов» пробивного напряжения на отдельных

образцах можно принять за начало разрушения изоляции, хотя на самом деле это не так. Поэтому при проведении ускоренных испытаний картина может оказаться «смазанной» и затруднить анализ экспериментальных данных.

На основании приведенных выше рассуждений и экспериментальных данных, полученных в ОАО «ВНИИКП», можно сделать следующие выводы:

- плавное снижение среднего значения пробивного напряжения в процессе теплового старения эмалированного провода является чисто статистическим эффектом, связанным с усреднением, включая целые образцы и образцы с механическим разрушением изоляции (растрескиванием), доля которых растет со временем;
- пробивное напряжение не отражает тех физических и химических процессов, которые протекают в эмалевой изоляции при старении и определяют ее ресурс; пробивное напряжение является лишь индикатором наличия или отсутствия дефектов в изоляции;
- для построения прогнозирующих моделей следует прибегать к контролю альтернативных характеристик изоляции, адекватно отражающих происходящие в ней изменения (например, плотность сшивки и др.), вместо среднего значения пробивного напряжения.

Литература

1. Надежность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. Л.И. Кранихфельда, И.Б.Пешкова. – М.: Энергия, 1982. – 199 с.
2. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 350 с.
3. Ларина Э.Т., Пешков И.Б., Текаева И.И. Ускоренная методика оценки температурного индекса эмалированных проводов // Кабельная техника. – 1976. – Вып. 9 (139). – С. 7.
4. Электрические свойства полимеров / Под ред. Б.И. Сажина. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
5. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1982. – 359 с.
6. Бартнев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 430 с.
7. Сканава Г.И. Физика диэлектриков. Область сильных полей. – Физматгиз, 1958. – 895 с.

ТОЧКА ЗРЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТА-ПРАКТИКА

Попытка объяснить системное снижение максимального значения пробивного напряжения эмальпроводов при тепловом старении нарастанием вероятности количества механических дефектов заслуживает внимания. Данное явление, безусловно, существует. Но является ли этот процесс единственной причиной снижения пробивного напряжения? Как в этом случае объяснить тот факт, что согласно приведенным в статье данным на начальных этапах теплового старения отсутствуют значения пробивного напряжения менее 1,7 кВ? Возможно, это связано с наличием дефектов (трещин), развившихся не на всю радиальную толщину изоляции? А может быть снижение электрической прочности обусловлено изменением степени сшивки в объеме изоляции на данном участке? Ответов на эти вопросы в статье нет.

Вызывает сомнение интерпретация экспериментальных данных, приведенных в таблице 1. Выдвинутая авторами гипотеза о том, что снижение пробивного напряжения изоляции эмальпроводов при тепловом старении определяется только растрескиванием изоляции без нарастания числа носителей электрических зарядов, недостаточно обоснована. Убедительных доказательств того, что физико-химические процессы, происходящие при старении изоляции, не влияют на электрическую прочность изоляции, в статье не содержится.

Ю.А. Зеленецкий,
исполнительный директор
ОАО «Завод Микропровод»