

А. А. ДАВИДОВА

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В СРЕДЕ С ВЫСОКОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ И В ВОДЕ

При одновременном воздействии на изоляцию температурного и влажностного полей наряду с поглощением влаги, может иметь место и ее разрушение в связи с вступлением воды в химическую реакцию с некоторыми компонентами полимера (гидролиз). При гидролизе могут образовываться соединения, которые приводят к увеличению электропроводности полимера, так что последний теряет свои основные изоляционные качества. При отсутствии химического распада и изоляция в процессе поглощения влаги наступает состояние равновесия и сопротивление ее остается практически стабильным во времени.

Сопротивление изоляции является одной из основных характеристик изоляционной конструкции машин, предназначенных для работы в условиях высокой относительной влажности или воды. Функциональная зависимость

$$\lg R = f(t) \quad (1)$$

дает возможность судить о качественной и количественной характеристиках влагостойкости изоляционных конструкций и прогнозировать их срок службы путем представления экспериментальных зависимостей типа (1) соответствующими аналитическими выражениями. Зависимости типа (1) можно представить в виде

$$= -a_0 - a_1 \lg R - a_2 \lg^2 R. \quad (2)$$

Коэффициенты этого полинома следует выбирать так, чтобы получить максимальную аппроксимацию опытных кривых.

Из уравнения (2), пользуясь способом наименьших квадратов, получим:

$$\lg R = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - \tau)}}{2a_2}. \quad (3)$$

Первая и вторая производные от $\lg R$ по τ будут характеризовать соответственно скорость и ускорение процесса старения изоляции в любой момент времени:

$$\frac{d \lg R}{d \tau} = \frac{1}{1 - \frac{a_1^2 - 4a_2(a_0 - \tau)}{4a_2^2}} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \lg R}{d \tau^2} = \frac{2a_2}{1 - \frac{a_1^2 - 4a_2(a_0 - \tau)}{4a_2^2}} \quad (5)$$

Знаки в этих выражениях определяются в зависимости от конкретного вида экспериментальной кривой. Формулы (3), (4), (5) позволяют определить изменение сопротивления изоляции, скорости и ускорения

процесса старения в любой момент времени. Область применения этих формул ограничивается условием

$$a_1^2 - 4a_0a_2 - 4a_2^2 > 0$$

$$t = \frac{4a_2t_0 - a_1^2}{4a_2}$$

Ожидаемый срок службы можно рассчитать по уравнению аппроксимированной кривой $\lg R = f(t)$, если известно, что технический ресурс изоляции неограничен, если $\lg R$ достигает заданного, минимального значения своего первоначального значения. Выбор этой величины дискутирующей зависит от требований, предъявляемых к электрическим машинам. В работе рассмотрены анализ уравнений (4), (5), характеризующих кинетику процесса старения изоляционной конструкции. В работе П. Завва [1] приведен подробный анализ уравнения типа (3), где оно используется для уточнения метода расчета при определении класса надежности электрических материалов и конструкций, предусмотренного ГОСТ 10518-63. На основании вышеизложенного по уравнению (3), задавая выбранным критерием величины $\lg R$, можно определить ориентировочный срок службы изоляционных конструкций.

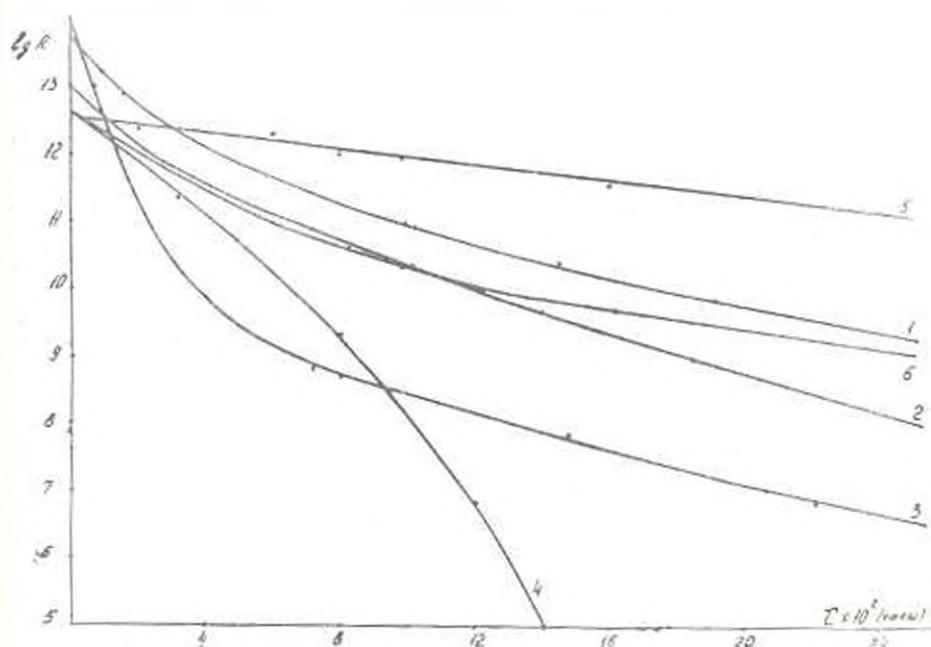


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $\lg R$ от времени: 1, 2 — изоляционная конструкция на основе синтетического каучука (АСПЛА) при температуре воды $t = 20 \pm 5^\circ \text{C}$ и 80°C ; 3, 4 — изоляционная конструкция из микаленты (при $t = 20^\circ \text{C}$ и $7-80^\circ \text{C}$); 5, 6 — провод с фторопластовой изоляцией при $t = 20 \pm 5^\circ \text{C}$ и $t = 80^\circ \text{C}$.

Для проверки методики были проведены испытания макетов различных изоляционных конструкций в пресной воде при $t = 20 \pm 5^\circ \text{C}$ и $t_{\text{вод.}} = 80^\circ \text{C}$. Испытанию подвергались макеты секции обмоток электрических машин следующих изоляционных конструкций:

Микалента АМ 4: изоляция на основе синтетического каучука АСПАА. Обе конструкции проходили компаундировку в битумном компаунде согласно инструкции Армэлектротехзаода (№ ОДВ. 926. 015). Толщина изоляционной конструкции бралась одинаковой для всех макетов и равной 1,3 мм. Для сравнения испытанию подвергался провод с фторопластовой изоляцией (малая влагопоглощаемость). Испытания проводились в специальных баках. В процессе старения изоляции в воде снималась зависимость $K = f(\tau)$. Сопротивление замерялось герамметром. Замеры производились без извлечения макетов из воды. Для определения параметров старения и ожидаемого срока службы, полученные экспериментальные кривые были математически обработаны по методике, предложенной выше.

На рис. 1 показаны зависимости экспериментальных данных $\lg K$ от времени, а в табл. 1 приведены значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 для всех рассматриваемых изоляционных конструкций, а также критический срок службы, подсчитанный на основании критерия $0,5 \lg K$.

Таблица 1

№ макета	Изоляционная конструкция	Коэффициенты уравнения (6)			Срок службы при $0,5 \lg K$ (ч/год)
		a_0	a_1	a_2	
1	Микалента АМ 4				
	а. $t_{\text{вода}} = 20^\circ\text{C}$	11324	-1443	43	3893
	б. $t_{\text{вода}} = 80^\circ\text{C}$	1402	69,8	-11,4	1282
2	Синтетическая изоляция				
	а. $t_{\text{вода}} = 20^\circ\text{C}$	2333	-3323	-120,1	6316
	б. $t_{\text{вода}} = 80^\circ\text{C}$	13055	2135	95	3125
3	Провод с фторопластовой изоляцией				
	а. $t_{\text{вода}} = 20^\circ\text{C}$	30806	-1609	-	10470
	б. $t_{\text{вода}} = 80^\circ\text{C}$	3634	6108	251	5721

Экспериментальные кривые были аппроксимированы согласно уравнению (3), при этом после проверки оказалось, что для всех экспериментальных кривых знак перед радикалом в уравнение (3) должен быть отрицательным. Имея конкретное выражение зависимости $d \lg R = f(\tau)$, путем последовательного дифференцирования были определены значения (4) и (5).

На рис. 2 показаны кривые зависимости $\lg R = f(\tau)$ после аппроксимации по формуле (3), а также кривые абсолютных изменений скоростей и ускорений процесса старения для изоляции на основе синтетического каучука при испытании в воде с $t_{\text{в}} = 80^\circ\text{C}$. Как видно из кривых, в кинетике процесса старения наблюдается постепенное замедление. В этом случае скорость процесса характеризуется

$$\left(\frac{d \lg R}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow \infty} < \left(\frac{d \lg R}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow 0} \quad (6)$$

и ускорение

$$\frac{d^2 \lg R}{d\tau^2} < 0. \quad (7)$$

Такое изменение, очевидно, характерно для изоляционной конструкции с монолитной структурой, а также с асимптотическим харак-

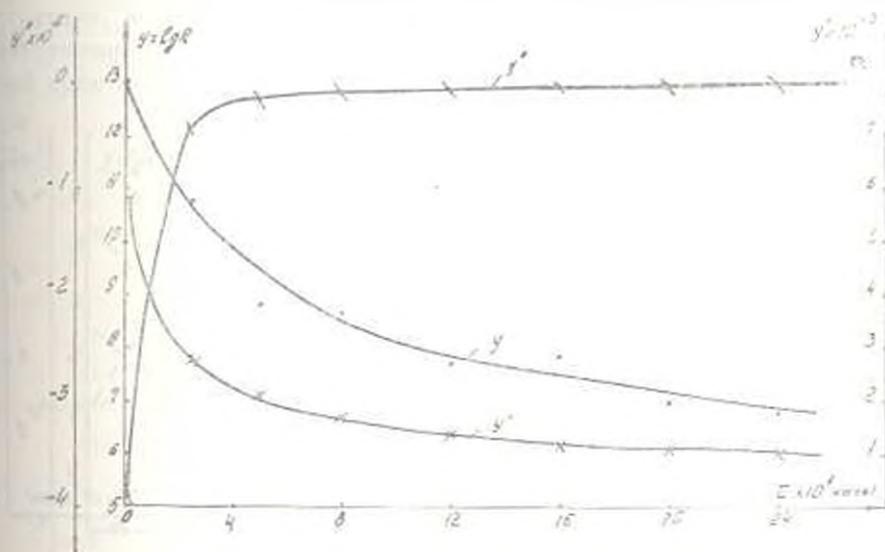


Рис. 2. Кривые кинетики процесса старения изоляционной конструкции на основе синтетического каучука в воде при $t = 80^\circ \text{C}$; $y = \lg R$ $f(\tau)$; y' — скорость процесса старения; y'' — ускорение процесса старения.

тером сорбции, слабо поддающейся гидролизу. Кинетика процесса старения рассматриваемой изоляционной конструкции в воде при $t_{\text{испыт}} = 20 - 5^\circ \text{C}$ по характеру аналогична кинетике процесса при $t_{\text{испыт}} = 80^\circ \text{C}$, но скорость старения меньше (см. табл.).

На рис. 3 изображена кинетика процесса старения изоляционной конструкции из микалента в воде при $t_{\text{испыт}} = 80^\circ \text{C}$. Как видно из кривых, при этом имеет место неравенство

$$\left(\frac{d \lg R}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow \infty} = \left(\frac{d \lg R}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow 0}$$

и ускорение

$$\frac{d^2 \lg R}{d\tau^2} > 0.$$

Действительно, все макеты после 1500 часов испытания вышли из строя. Этот случай характерен для изоляционной конструкции с неоднородной структурой, когда в процессе термического старения увеличивается количество трещин и пор по всему сечению изоляции, которые, заполняемые водой, ускоряют процесс гидролиза. При испытании в воде при $t = 20 - 5^\circ \text{C}$, хотя образцы за испытательное время не вышли из строя, разрушение их изоляции шло с большой скоростью.

На рис. 4, 5 показана кинетика старения изоляционной конструкции (фторопласт), которая обладает малой влагопоглощаемостью.

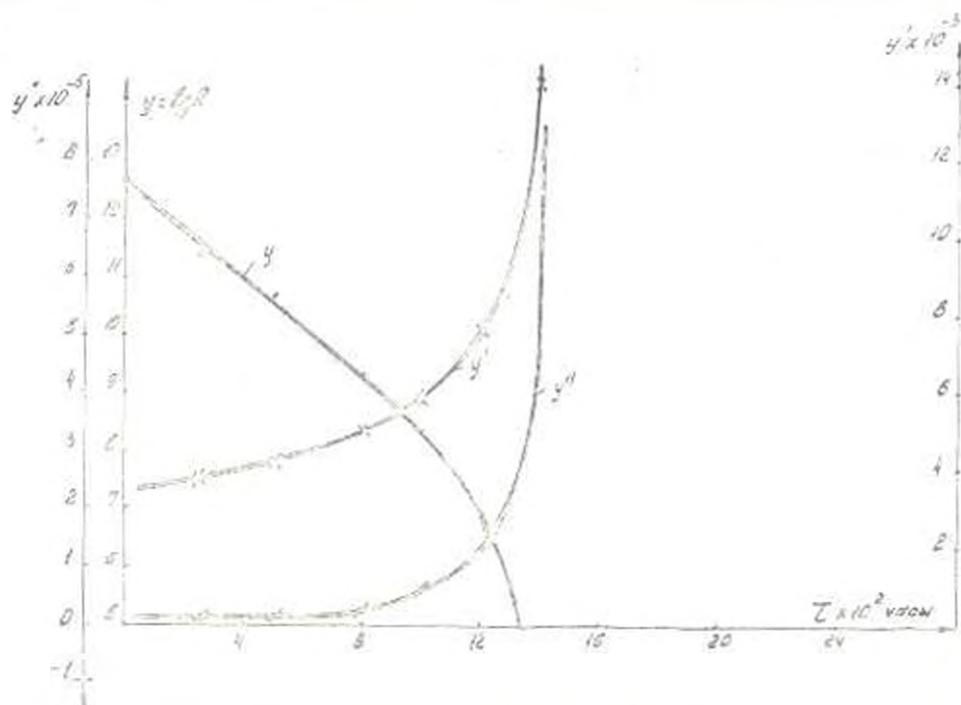


Рис. 3. Кривые кинетики процесса старения изоляционной конструкции из mica в воде при $t = 80^\circ \text{C}$.

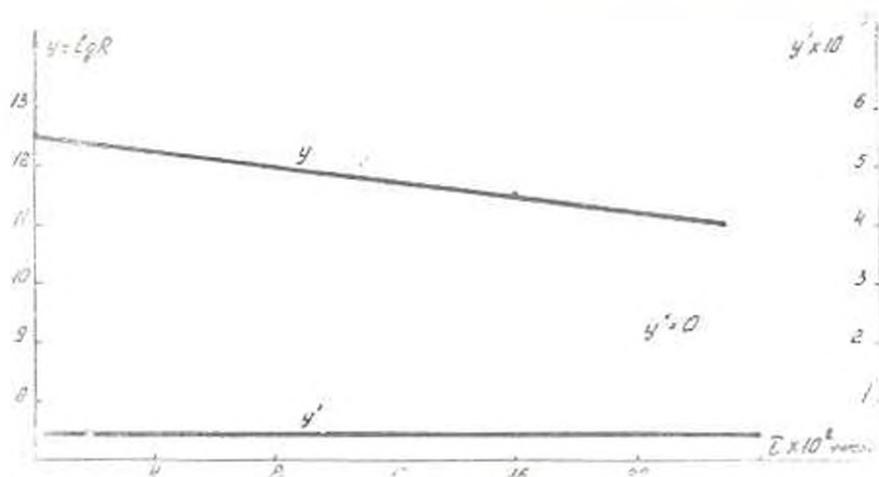


Рис. 4. Кривые кинетики процесса старения провода на фторопластовой изоляции в воде при $t = 20 \pm 5^\circ \text{C}$.

Кривые на рис. 4 характеризуют процесс старения в воде при $t = 20^\circ \text{C}$, в этом случае зависимость $\lg R = f(t)$ выражается уравнением

$$\lg R = C_0 + C_1 t,$$

$$\frac{d \lg R}{dt} = \text{const.}, \text{ а } \frac{d^2 \lg R}{dt^2} = 0.$$

Кинетика процесса характеризуется абсолютной величиной скорости, и чем меньше последняя, тем медленнее идет процесс старения. На рис. 5 показаны кривые кинетики старения той же изоляционной конструкции, но при $t_{\text{исп}} = 80^\circ \text{C}$. Как видно из кривых, в этом случае разрушение изоляции идет быстрее, но вычисленный ориентировочный срок службы достаточно велик (см. табл. 1).

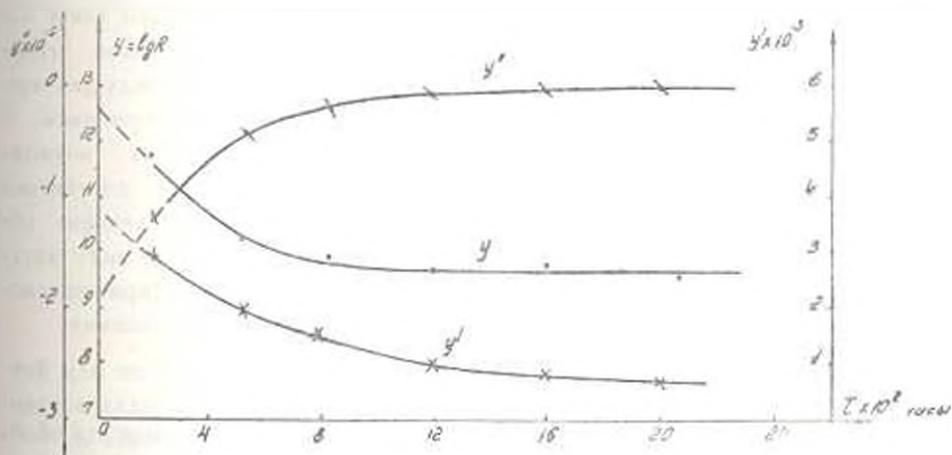


Рис. 5. Кривые кинетики процесса старения провода из фторопластовой изоляции в воде при $t = 80^\circ \text{C}$

Резюмируя отметим, что предлагаемый метод математической обработки экспериментальной кривой сопротивления изоляции при ускоренных испытаниях (при $t = \text{const}$) позволит ориентировочно определить срок службы изоляционной конструкции в заданных условиях. По характеру изменения кривых скорости и ускорения процесса старения можно прогнозировать возможность применения изоляционной конструкции для заданных условий эксплуатации.

ВНИИЭМ (Ереванское отделение)

Пастушак 21.II.1971.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Зава Н. Расчет нагретостойких и электроизоляционных материалов и конструкций. "Электромеханическая промышленность", вып. 2, 1970.