

*Канд. физ.-мат. наук Г.П.Сафонов, канд. техн. наук Е.Л.Гринь,
инж. Ю. Ф. Пчеляков, инж. Т.И.Жаринова, инж. Т.А. Жукова,
инж. С.З.Кудряшова, канд. техн. наук С.С. Скворцов*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУЗ АЭС

Одним из показателей надежности СУЗ АЭС является надежность электроизоляционной системы электрооборудования, в частности монтажных проводов, изолированных хлорвиниловым пластиком, как наиболее слабого звена в оборудовании.

Провода используются в электрооборудовании для коммутации сигнальных и токовых систем, а также заземления без их замены на весь срок службы шкафов [1]. Базовая конструкция СУЗ с указанными проводами зарекомендовала себя положительно на многих АЭС России, Чехии, Словакии со сроком службы более 35 лет в условиях кондиционирования помещения при комнатной температуре.

В связи с этим целесообразно было проведение исследовательской работы по оценке остаточного ресурса электроизоляционной системы электрооборудования СУЗ с различным сроком эксплуатации и обоснованию возможности его использования на АЭС в течение не менее 40 лет [2].

Для проведения указанной работы была разработана специальная Программа и отобраны образцы монтажного провода. Программа предусматривала проведение комплекса испытаний монтажных проводов после различных сроков хранения и эксплуатации, а также макета жгута проводов с креплением, позволяющих выявить закономерности их старения при повышенных температурах, существенным образом ускоряющих его (в стадии ускоренных испытаний экспресс - методом) [2].

Ускорение испытаний достигалось путем ужесточения основных факторов воздействия: температуры, влажности, электрического напряжения и концентрацией агрессивной среды. Учитывая то, что СУЗ АЭС работают в условиях отапливаемого помещения с пониженной влажностью без присутствия каких-либо агрессивных паров, воздействие среды и ее относительной влажности не принимаются во внимание при испытаниях.

Испытаниям подвергались следующие виды изделий:

- провод марки МГШВ сечением $1,5 \text{ мм}^2$, образцы 1 (белый) и 2 (желтый) отобраны из жгутов монтажа электрооборудования СУЗ, укомплектованных на АЭС «Моховце», хранящихся около 10 лет (срок хранения в нормальных условиях $80\,000 \text{ ч}$);

- провод марки МГШВ сечением $0,5 \text{ мм}^2$, образцы 3 (желтый, срок хранения $130\,000 \text{ ч}$) и 4 (красный, срок хранения $20\,000 \text{ ч}$) отобраны из бухт, находящихся в режиме хранения в складских условиях;

- провод марки МГШВ, образцы 5 (сечением $0,5 \text{ мм}^2$, срок эксплуатации $250\,000 \text{ ч}$) и 6 (сечением $0,75 \text{ мм}^2$, срок эксплуатации $230\,000 \text{ ч}$). Образцы отобраны из жгутов монтажа оборудования СУЗ, установленного на 1-м энергоблоке АЭС в г. Воронеже, отработавшем в реальных условиях эксплуатации около 30 лет;

- жгут проводов МГШВ сечением $0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 \text{ мм}^2$ и провод ПВ-3 сечением $6,0; 10,0; 50,0; 70,0; 90,0 \text{ мм}^2$, закрепленных на стальной пластине размером $(150 \times 530) \text{ мм}$, аналог реальной конструкции жгутов проводов на панелях СУЗ (провода хранились в складских условиях непродолжительное время).

Ускоренные испытания монтажного провода МГШВ при повышенных температурах проводили двумя способами – по электрическим испытаниям, основанным на установлении в качестве критерия определенного уровня контрольного напряжения, по достижении которого провод считается вышедшим из строя, и косвенным методом по убыли пластификатора, регламентирующего изменение механической прочности. Это позволяет оценить возможность использования провода в течение заданного ресурса при рабочей температуре с учетом времени содержания в условиях хранения. По результатам таких испытаний определяется температура и время ускоренного старения макета жгута проводов, после выдержки которого в этих условиях проводится испытание его стойкости к сейсмическим воздействиям. После проведения этих испытаний предполагалось сделать вывод о возможности эксплуатации их в конструкциях СУЗ АЭС со сроком службы не менее 40 лет.

Перед испытаниями весь испытуемый провод проверялся внешним осмотром с целью выявления видимых дефектов. Затем из него отбирали образцы для определения электрических свойств: сопротивления изоляции и способности выдерживать испытательное напряжение.

Определение электрического сопротивления изоляции провода МГШВ проводилось в исходном состоянии и после термостарения при повышенных температурах $120, 130$ и 140°C после выдержки в воде в течение 1 ч при напряжении 100 В . Электрическое сопро-

тивление изоляции провода МГШВ при 20°C должно быть не менее 1000 МОм.

Электрическое сопротивление изоляции всех образцов провода МГШВ в исходном состоянии и после термостарения составило > 1000 МОм на 1 м длины.

Способность изоляции провода МГШВ выдерживать испытательное напряжение 2000 В определяли в воде после выдержки в ней образцов в течение 1 мин.

Испытательное напряжение 2000 В частотой 50 Гц в течение 1 мин в исходном состоянии и после термостарения при температурах 120, 130 и 140°C все образцы (1-6) провода МГШВ выдержали.

Испытания на сохраняемость и срок службы проводили после циклического воздействия факторов старения изоляции провода. Испытательный цикл длительностью 55 ч включает тепловое старение при температурах 120, 130 и 140°C и затем испытание электрическим напряжением. Длительность воздействия при температурах: 120°C - 220 ч; 130°C - 110 ч; 140°C - 55 ч. Максимальная температура 140°C ограничивается термостабильностью поливинилхлоридного пластика, входящего в состав изоляции провода МГШВ.

Пробивное напряжение образцов провода МГШВ до и после термостарения приведено в табл. 1.

Таблица 1

Номер образца провода	Исходное	Пробивное напряжение, кВ					
		после старения, ч					
		55		127		220	
		при температуре, °С					
		140	130	120	130	120	120
1,2	18,5	17,0	17,5	18,0	12,0	14,5	16,0
3,4	20,0	20,0	15,5	17,0	15,5	15,5	15,5
5,6	18,5	14,0	17,5	18,0	15,5	17,0	13,0

После проведения испытаний рассчитывали средний ресурс при каждой испытательной температуре и ожидаемый срок службы провода МГШВ при температуре 20°C в условиях эксплуатации.

Определение электрического сопротивления изоляции проводов макета узла жгута в исходном состоянии и после термостарения при 140°C в течение 68 ч, моделирующее эксплуатацию жгута проводов при нормальных условиях в течение не менее 40 лет, проводили после выдержки в воде в течение 1 ч. Измеряли элек-

трическое сопротивление между жилами проводов, между жилой и заземленной стальной пластиной. Значение электрического сопротивления должно быть не менее 1000 МОм при температуре 20°C.

Определение стойкости к испытательному напряжению макета узла жгута проводов в исходном состоянии и после термостарения при температуре 140°C в течение 68 ч проводили в воде после выдержки в ней жгута в течение 1 ч. Испытательное напряжение 2000 В частотой 50 Гц прикладывали между жилой и стальной пластиной и выдерживали в течение 1 мин.

Проводили также определение электрических свойств проводов жгута после испытания на сейсмостойкость.

Результаты испытаний электрических свойств макета узла жгута проводов МГШВ в исходном состоянии, после термостарения и после испытания на сейсмостойкость приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование контролируемого параметра	Исходное состояние		После старения при 140°C в течение 68 ч и выдержке в воде в течение 1 ч	После воздействия сейсмичности и вибрации и выдержки в воде в течение 1 ч
	До выдержки в воде	После выдержки в воде		
Электрическое сопротивление изоляции, МОм	>10 ⁴	>10 ⁴	>10 ⁴	>10 ⁴
Стойкость к испытательному напряжению 2000 В частотой 50 Гц в течение 1 мин	выдержал	выдержал	выдержал	выдержал

Определение срока службы провода МГШВ проведено также косвенным методом по содержанию пластификатора в изоляции из поливинилхлоридного пластиката.

Срок службы, срок сохраняемости и минимальную наработку изделия определяют исходя из кинетики процесса десорбции пластификатора при отсутствии деградации полимерной матрицы материала изоляции провода при старении.

Константа скорости процесса десорбции K для ПВХ пластиката изоляции проводов в диапазоне рабочих температур от -60 до +70°C определяют по экспериментально установленному соотношению:

$$K = \tau^{-1} \left(\ln \frac{G_0}{G_1} \right)^{8/5}, \text{ с}^{-1},$$

где G_0 - исходная масса, мг; G_1 - масса после старения, мг; τ - время старения, с.

Зависимость K от температуры определяют по закону Аррениуса:

$$K = K_0 \exp \frac{-E}{R(T + 273)},$$

где K_0 - константа скорости при $T = -273^\circ\text{C}$, с^{-1} ; E - энергия активации, кДж/ моль; R - газовая постоянная, кДж/ моль·град; T - температура, $^\circ\text{C}$.

Энергия активации диффузии пластификатора (дибутилфталата) ПВХ пластиката изоляции провода МГШВ 38,4 кДж/ моль.

На стадии хранения или эксплуатации проводят испытания по прогнозированию допустимого срока эксплуатации.

От изделия, находящегося в эксплуатации, отбирают пробы из зон с наиболее тяжелыми условиями эксплуатации (максимальная температура, максимальные токовые нагрузки и т.д.).

Количество проб отбирают из соотношения:

$$n \geq \frac{ZL^2V_x^2}{\gamma^2},$$

где n - количество проб; ZL - табулированный коэффициент Стьюдента; V_x - коэффициент вариации для результатов измерения; σ - среднеквадратичное отклонение, $V_x = \sigma / \nu$, ν - математическое ожидание результатов измерения; γ - предельная относительная погрешность измерения.

Приближенные значения σ и ν вычисляют по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \nu)^2}{n-1}}; \quad \nu = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k,$$

где x_k - результат измерения величины потери массы; n - количество проб.

Соотношение для определения количества проб принято в предположении, что закон распределения погрешности измерения - нормальный. Значения коэффициента Стьюдента рекомендуется

выбирать для доверительной вероятности 0,9 или 0,95.

При эксплуатации изделия минимальное количество проб устанавливается равным 3.

Каждую пробу изоляции взвешивают в исходном состоянии при комнатной температуре, а затем помещают в термощкаф, нагретый до температуры $350 \pm 5^\circ\text{C}$ и выдерживают в нем в течение 20 ± 5 мин.

После выдержки пробы извлекают из термощкафа и охлаждают до комнатной температуры в эксикаторе над обезвоженным хлористым кальцием в течение 1 ч. Затем пробы взвешивают.

В результате взвешивания определяют относительную потерю массы после эксплуатации:

$$\Delta G_{\text{экс}} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100, \%,$$

где G_1 - масса образца до нагрева, мг; G_2 - масса образца после нагрева до температуры $350 \pm 5^\circ\text{C}$, мг.

Для изделий, хранящихся до ввода в эксплуатацию более полу-года, определяют величину $\Delta G_{\text{хр}}$ по формуле:

$$\Delta G_{\text{хр}} = \exp [\ln (G_o + a \Delta G_{\text{исх}} - \epsilon) - (3,15 \cdot 10^7 K_{\text{хр}} \tau_{\text{хр}})^{0,625}],$$

где $\Delta G_{\text{исх}}$ - минимальное значение, указанное в нормативно-технической документации для соответствующей марки материала изоляции, %; G_o , a , ϵ - параметры данной марки пластиката; $K_{\text{хр}}$ - константа скорости десорбции данной марки пластиката, с^{-1} ; $\tau_{\text{хр}}$ - время хранения, лет.

Константу скорости десорбции пластификатора при эксплуатации рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{экс}} = \frac{1}{3,15 \cdot 10^7 \cdot \tau_{\text{экс}}} \left(\ln \frac{G_o + a \cdot \Delta G_{\text{исх}} - \epsilon - \Delta G_{\text{хр}}}{G_o + a \cdot \Delta G_{\text{экс}} - \epsilon} \right)^{1,6},$$

где $\tau_{\text{экс}}$ - время эксплуатации, лет.

В случае, если изделие до ввода в эксплуатацию хранилось менее полугода, то $\Delta G_{\text{хр}}$ принималось равным нулю.

Для определения величины $\Delta G_{\text{доп}}$, задаются допустимой величиной любого или комбинацией следующих параметров изоляции провода: холодоустойчивостью, относительным удлинением при разрыве, удельным электрическим сопротивлением, тангенсом угла диэлектрических потерь и другими - и с помощью корреляционных зависимостей находят $\Delta G_{\text{доп}}$.

Корреляционные зависимости между параметрами изоляции провода и величиной ΔG устанавливают на стадии разработки из-

делий.

Если величина $\Delta G_{\text{доп}}$ окажется больше $\Delta G_{\text{экс}}$, то дальнейшая эксплуатация изделия не допускается.

Если величина $\Delta G_{\text{доп}}$ меньше $\Delta G_{\text{экс}}$, то рассчитывают время дальнейшей эксплуатации (оставшийся ресурс). При неизменных условиях эксплуатации допустимое время дальнейшей эксплуатации:

$$\tau = \frac{1}{3600 \cdot K_{\text{экс}}} \left(\ln \frac{G_o - a \cdot \Delta G_{\text{экс}} - \vartheta}{G_o + a \cdot \Delta G_{\text{доп}} - \vartheta} \right)^{1,6}, \text{ ч.}$$

Если известно, что тепловой режим эксплуатации изделия после отбора проб изменен, то вначале определяют константу скорости десорбции пластификатора для новых условий эксплуатации:

$$K'_{\text{экс}} = K_{\text{экс}} \cdot e^{\frac{E}{8,3144} \left(\frac{1}{T_1+273} - \frac{1}{T_2+273} \right)}, \text{ с}^{-1},$$

где T_1 - температура эксплуатации до отбора проб, °С; T_2 - температура эксплуатации после отбора проб, °С.

Затем рассчитывают допустимое время дальнейшей эксплуатации в новых условиях, при этом величину $K_{\text{экс}}$ принимают равной $K'_{\text{экс}}$.

По полученным результатам испытаний дается разрешение на продление срока службы изделия на полученное время дальнейшей эксплуатации.

Относительное содержание пластификатора ΔG в изоляции провода МГШВ в жгутах монтажа электрооборудования СУЗ, упакованных на АЭС «Моховце», после 10 лет хранения, составляет (69 – 72) %. А в жгутах монтажа электрооборудования СУЗ, упакованных на АЭС в г. Воронеже, после эксплуатации около 30 лет, составляет выше 72 %. Допустимое значение ΔG в изоляции провода МГШВ в исходном состоянии должно быть не менее (65 - 70) %.

Предположив, что в исходном состоянии содержание пластификатора ΔG в изоляции провода соответствует минимально допустимому значению 70%, и приняв допустимое значение $\Delta G = 66\%$ (это соответствует снижению относительного удлинения пластика изоляции на 30%), а параметры $G_o=110,5$; $a=4,5$; $\vartheta=270,0$, константа скорости десорбции после 10 лет хранения составит $K_{\text{хр}}=2,54 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$.

Считая, что условия эксплуатации не отличаются от условий хранения на АЭС, т.е. приняв $K_{\text{экс}}=K_{\text{хр}}$, допустимое значение дальнейшей эксплуатации $\tau_{\text{экс}}$ получили равным 43 годам.

Следует отметить, что в составе СУЗ провода занимают небольшой удельный вес. В комплекс входит большое количество электронных блоков, релейно-контактная аппаратура и элементы

защиты. Причем срок службы технических средств, входящих в состав СУЗ, определен не менее 10 лет при непрерывной работе электрооборудования СУЗ не менее 10000 ч. Все эти требования к техническим средствам соблюдаются на всех действующих АЭС России и ряде зарубежных, о чем свидетельствует планово-предупредительные проверки и ремонтные работы. Однако для новых разработок и модификаций электрооборудования важным является определение его ресурса.

Следует, однако, учесть, что при типовых испытаниях комплекса измеряется сопротивление изоляции в исходном состоянии и после увлажнения, а также контрольное напряжение, понижение которого до недопустимого уровня свидетельствует о выходе оборудования из строя. Учитывая это, можно попытаться использовать известные методы ускоренных испытаний. При этом ускорение следует проводить только по температуре, так как в электрооборудовании СУЗ отсутствует электрическое старение из-за его довольно низкого значения.

Анализ литературы [1-3] показывает, что имеются основания для уверенности в идентичном характере химических процессов, протекающих при быстром и медленном старении электроизоляционных материалов, в т.ч. в различных конструкциях. Ясно, что при оценках сроков службы таких материалов в чистом виде и в различных простых и сложных конструкциях, механизм старения и специфические особенности его кинетики должны быть учтены. Несомненно, это относится и к таким сложным электротехническим СУЗ АЭС.

Следовательно, достаточно нагреть электрооборудование до повышенной, по сравнению с рабочей (20°C), температуры и выдерживать в течение времени много меньшим, чем ресурс. Для пересчета можно предложить уравнение Аррениуса в виде

$$\tau_{и} = \tau_0 e^{\frac{E/R}{T_0 - T_{и}}}$$

где $\tau_{и}$ – время испытания; τ_0 – гарантированный минимальный ресурс, равный 10 годам; T_0 , $T_{и}$ – рабочая и испытательная температуры.

Определяющим в этом выражении является величина энергии активации, которая из соображений условий эксплуатации (температура 25°C или 298°K) и нормальной влажности, выбрана 0,8 эВ или ~ 80 кДж/моль, равной энергии активации гидролиза полимерных диэлектриков на основе простых и сложных полиэфиров.

Величина испытательной температуры выбиралась из соображения максимально допустимой для элементной базы, которая со-

ставляет 70°C или 343°K. Расчетное время испытания при этом составляет 1500 ч. В течение этого времени такие испытания были проведены в условиях окружающей среды и показано, что после старения в указанных условиях вибрации и сейсмических воздействий работоспособность оборудования сохраняется, сопротивление изоляции сохраняется высоким, на уровне исходного значения, равно не менее 500 МОм.

Разработан Перечень материалов, разрешенных к применению в изделиях НПП ВНИИЭМ для оборудования АЭС [4]. Перечень устанавливает номенклатуру материалов, предназначенных для использования в производстве оборудования или аппаратуры для АЭС, к которым предъявляются повышенные требования по пожаробезопасности.

Материалы, используемые в конструкциях оборудования, должны выбираться и размещаться таким образом, чтобы обеспечивать высокую надежность, исключая возможность энергетической опасности или поражения электрическим током и вероятность возгорания.

Горючие материалы должны использоваться в небольшом количестве в конструкциях элементов и в системах изоляции из негорючих или трудногорючих материалов.

Применение материалов, не распространяющих горение и не выделяющих галогены, обусловлено защитой персонала от воздействия вредных газообразных продуктов повышенной концентрации, образующихся в процессе горения, а также защитой электрических и электронных компонентов оборудования, не вовлеченных в пожар от воздействия образующихся в процессе пожара и высокой влажности при пожаротушении кислотных соединений.

В оборудовании шкафов СУЗ практически исключено возникновение пожарной ситуации вследствие применения в них быстродействующих коммутационных устройств, исключая длительные короткие замыкания, а также наличия проводов с изоляцией, не поддерживающей горение и низким дымовыделением. Даже при внешнем пожаре загорание электроизоляционных систем маловероятно из-за незначительной массы изоляции по сравнению с негорючими компонентами шкафов.

За весь период эксплуатации электрооборудования на блоках АЭС с применением проводов типа МГШВ и ПВ-3 с изоляцией из хлорвинилового пластиката отсутствует информация об отравлении персонала галогеносодержащими продуктами благодаря наличию вентиляции и отсутствию образования продуктов деструкции изоляции.

Выводы

Исследованные образцы провода МГШВ с различным сроком хранения и эксплуатации обладают значительным остаточным ресурсом благодаря высоким электрическим свойствам и отсутствию резкого снижения пробивного напряжения и содержания пластификатора в изоляции после старения в течение 220 ч при 120 °С, 127 ч при 130°С и 55 ч при 140°С при норме 160, 80 и 40 ч соответственно, обеспечивающих остаточный ресурс 40 лет.

Проведенные комплексные испытания проводов МГШВ в виде жгута в исходном состоянии, после термостарения и воздействия сейсмических и вибрационных нагрузок, подтверждают его 40-летний ресурс. Для технических средств комплекса подтвержден гарантийный срок службы 10 лет.

Учитывая состояние электроизоляционных систем АЭС первых станций, расположенных в РФ и приближающихся по сроку эксплуатации к 40 годам, а также отсутствие сбоев в их работе по причине выхода из строя изоляции проводов, кабелей и жгутов шкафов СУЗ, можно считать экстраполирование сроков службы более чем к 40 годам весьма оптимистичным и реальным.

Следует также отметить, что при выработке ресурса и последующих испытаниях на сейсмостойкость в условиях повышенной интенсивности вибраций, свойства проводов находятся на высоком уровне. Это позволяет надеяться, что реальный ресурс составит более 40 лет.

Проведены испытания элементов и самых сложных электромеханических комплексов, например электрооборудования СУЗ АЭС по ускоренной методике при повышенных температурах.

Проведена оценка срока службы по уравнению Аррениуса, вычислена энергия активации (38,4 кДж/моль) старения монтажных проводов и обоснован выбор энергии активации (80 кДж/моль) старения комплекса электрооборудования СУЗ АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Номенклатура кабельных изделий для применения и поставки на АЭС. Приложение к Решению № 1-2002 от 6.03.2002 г. ОАО «ВНИИКП».
2. Квалификация электрооборудования системы управления и защиты АЭС «Тяньвань» по фактору старения. Технический отчет ТАИК 500051.024. М.: НПП ВНИИЭМ. 2002 г.
3. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия. 1973.
4. Перечень материалов, разрешенных к применению в изделиях НПП

ВНИИЭМ для оборудования АЭС. ТАИК 500044.001. М.: НПП ВНИИЭМ.
2000 г.