

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДНЫХ СЕКЦИЙ ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА

О.В. Бондарчук,

доцент каф. энергетики БГАТУ, канд. техн. наук

Ю.Н. Селюк,

ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

А.В. Гуд,

ст. преподаватель каф. моделирования и проектирования БГАТУ

В статье разработана математическая модель прогнозирования срока службы изоляции проводников электродных секций электроактиватора. Предложена методика оценки фактического состояния изоляции по результатам периодических измерений тангенса угла диэлектрических потерь. Внедрение данной модели в систему эксплуатации электрооборудования позволит оптимизировать график ремонтов, предотвратить аварийные ситуации и определить остаточный ресурс изоляции с достаточно высокой точностью.

Ключевые слова: электроактиватор, организация эксплуатации, математическая модель прогнозирования, напряженность электрического поля, электродная секция, изоляция, остаточный ресурс, мощность частичных разрядов, деградация.

This study focuses on the development of a model for predicting the service life of the insulation in the conductors of the electrode sections of an electroactivator. A method for assessing the actual condition of the insulation based on the results of periodic measurements of the dielectric loss tangent is proposed. The implementation of the model into the electrical equipment operation system makes it possible to optimize the maintenance schedule, prevent breakdowns and determine the remaining service life of the insulation with a sufficiently high degree of accuracy.

Keywords: electroactivator, operation organization, prediction model, electric field strength, electrode section, insulation, remaining service life, partial discharge power, degradation.

Введение

Внедрение электроактиватора в технологическую линию солодоращения для интенсификации процесса производства солода обуславливает необходимость рациональной эксплуатации данной установки [1].

Учитывая новизну разработанного электротехнологического оборудования [1], значительную производительность, высокое напряжение, подаваемое на электроды, необходимо обеспечить и достаточный уровень его эксплуатационной надежности. Это достигается в результате своевременного проведения работ по техническому обслуживанию (ТО) и техническому ремонту (ТР), а также контроля технического состояния установки электроактивации ячменя на всех этапах использования. Немаловажным также является сбор и анализ эксплуатационных данных указанного электрооборудования с целью определения остаточного ресурса его элементов.

Вопросы определения ресурса электрической изоляции освещены в работах Г.С. Кучинского, С. Аррениус, С.Н. Журкова, Ж.-П. Крайна, Н. Eyring,

Th. W. Dakin, G.C. Montanari, L. Dissado, S. Whitehead, L. Simoni [2-8]. Ими предложены математические модели старения изоляции, однако ни одна из них не может быть применима к системе электродов установки электроактивации ввиду низкой рабочей температуры и высокого напряжения. Эти модели разработаны для определения ресурса изоляции с учетом термодеструкции химических связей, действия частичных разрядов (ЧР), комбинированного воздействия напряжения, температуры и влажности. В указанных моделях при уменьшении рабочей температуры проводника ресурс изоляции стремится к бесконечности, что в корне неверно. Снижение температуры ниже расчетной не приводит к увеличению срока службы изоляции. Это справедливо и для комбинированных моделей. В электроактиваторе основным фактором износа является электрическое старение изоляции, что отражено в модели Г.С. Кучинского. Однако в ней не в полной мере учтено влияние на остаточный ресурс изоляции увеличения мощности частичных разрядов

и изменение коэффициента деградации в процессе эксплуатации. Поэтому для определения долговечности изоляции электродов в условиях низкой рабочей температуры и высокого напряжения необходимо разработать ее динамическую математическую модель.

Целью данной работы является разработка математической модели ресурса изоляции электродных секций электроактиватора на основе концепции динамической деградации полимера под действием частичных разрядов, что обеспечивает качественную эксплуатацию установок.

Основная часть

Установка для электрообработки зерна ячменя функционирует в поточном технологическом режиме (рис. 1). Ячмень поступает в загрузочное устройство 1, где механизмом дозированной подачи 2 приводит в движение электродвигатель 7 и распределяется в один слой на ленту транспортера 3. Лента движется по диэлектрической пластине 10, в которой на определенном расстоянии друг от друга расположены три секции электродов 4. Зерно, перемещаясь по ленте над электродами, периодически проходит надэлектродную зону с переменным неоднородным электрическим полем высокой напряженности, а затем – зону релаксации (электрическое поле отсутствует). Все элементы устройства смонтированы на раме 13. Приводному барабану 6 сообщается вращающий момент от электродвигателя 8

посредством редуктора 9 и ременной передачи. Натяжной барабан 5 служит для создания необходимого натяжения ленты и обеспечения передачи тягового усилия от барабана к ленте. Лента 3 служит основным грузонесущим и тяговым элементом. Разгрузка происходит пересыпанием через натяжной барабан 5. Отходы сбрасываются щеткой 11 в лоток 12.

Наиболее важной частью процесса эксплуатации рассмотренной установки является выполнение работ по ее обслуживанию и ремонту. Рациональное планирование сроков и объемов проведения этих работ обеспечивает значительное повышение надежности электроактиватора, снижение эксплуатационных затрат, а также ущерб от его отказов. Однако реализация изложенных выше подходов требует наличия достоверной информации о текущем техническом состоянии электрооборудования, а также прогнозе его изменений. Это может быть обеспечено моделированием установки электроактивации биологической системы ячменя.

В упрощенном виде установку электроактивации можно представить в виде совокупности элементов (ленточного транспортера и секций электродов). Информация о принципах и методах моделирования составных частей транспортера, включая электродвигатель, приведена в литературных источниках [9, 10]. В данном случае наибольший интерес представляет моделирование изменения

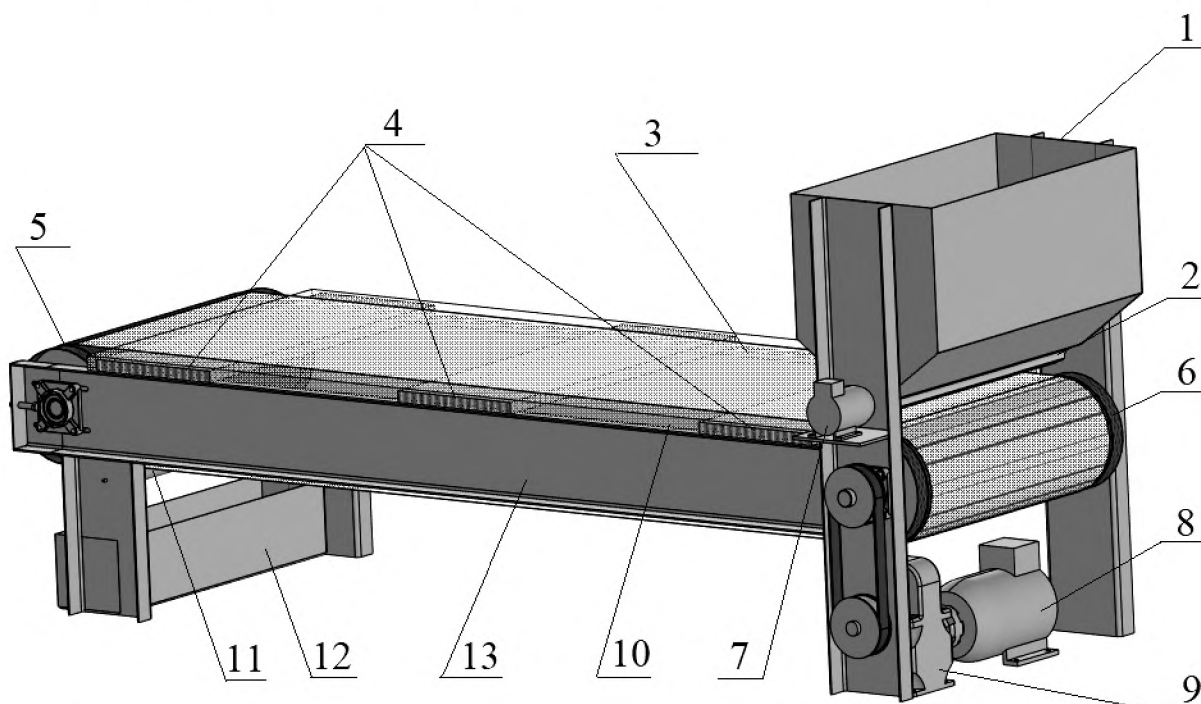


Рисунок 1. Конструктивные элементы электроактиватора: 1 – загрузочный бункер; 2 – валик-дозатор; 3 – лента транспортера; 4 – электродные секции; 5 – натяжной барабан; 6 – приводной барабан; 7 – электродвигатель привода валика-дозатора; 8 – электродвигатель привода барабана; 9 – редуктор; 10 – текстолитовая пластина; 11 – щетка; 12 – емкость для отходов; 13 – рама

параметров изоляции электродов в процессе эксплуатации, так как напряжение, подаваемое на них, значительно превышает стандартное напряжение сети.

Существуют различные математические модели для расчета остаточного ресурса электрической изоляции (Кучинского, Журкова, Аррениуса, Симони, Дакина и др.), основанные на механизмах ее деградации под действием термоокислительной деструкции и частичных разрядов [2-8], однако их применение в определении ресурса данного оборудования нецелесообразно. Согласно современным представлениям, основной причиной старения полимерной изоляции считают высокую рабочую температуру и воздействие частичных разрядов, которые возникают в дефектах и пустотах. ЧР создают локальные точки перегрева, вызывая химический распад (термоокислительную деструкцию) полимерных связей, что приводит к образованию трещин и эрозии («tracking» или «деструкция по пути ЧР»). Повышенная температура эксплуатации и приложенное напряжение значительно ускоряют процесс старения. Постепенная потеря диэлектрических свойств изоляции, увеличение потерь, накопление дефектов приводят к аварийному пробое.

Для принятой системы электродов, представляющих собой медные провода сечением 2,5 мм² с толщиной изоляции 0,8 мм, при подаче на них напряжения 2500 В, напряженность электрического поля в изоляции составляет 1,56 кВ/мм. Данное значение – усредненное. Вблизи поверхности жилы из-за кривизны поля напряженность может быть незначительно выше, однако для плотно прижатых жил с соизмеримой толщиной изоляции оно является корректным. Амплитудное значение напряженности поля – 2,2 кВ/мм, что близко к порогу ионизации воздуха (≈3 кВ/мм), поэтому ЧР могут возникать только в достаточно крупных порах.

Мощность ЧР определяют как сумму энергий отдельных импульсов за единицу времени [5]

$$P_{\text{ЧР}} = f \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot U, \quad (1)$$

где $f=50$ – частота напряжения, Гц;

q_i – кажущийся заряд каждого импульса, Кл. Для новой ПВХ-изоляции обычно составляет от 10 до 100 пКл [5]. Примем среднее значение $q=50$ пКл ($50 \cdot 10^{-12}$);

U – мгновенное напряжение в момент возникновения разряда, В;

n – число импульсов за один период. Для одиночного дефекта – от 2 до 6. Примем $n=4$ [5].

Подставив значения в формулу, получим:

$$P_{\text{ЧР}} = 50 \cdot 4 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 2500 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Таким образом, мощность частичных разрядов от одного дефекта составляет около 25 мкВт.

Суммарный ток утечки ($I_{\text{ут}}$) для изоляции электродов представляет собой векторную сумму активной и реактивной (емкостной) составляющих:

$$I_{\text{ут}} = I_a + I_p = I_p \cdot \text{tg}\delta + I_p, \quad (2)$$

где I_a – активная составляющая тока утечки, А;
 I_p – реактивная составляющая тока утечки, А;
 $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Активная составляющая тока утечки значительно меньше реактивной составляющей (емкостного тока), так как величина $\text{tg}\delta$ для новой ПВХ-изоляции не превышает 0,05 [11].

$$I_p = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U, \quad (3)$$

где C – емкость для провода (от 100 до 500 пФ) [11].

$$I_p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 500 \cdot 10^{-12} \cdot 2500 = 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

$$I_{\text{ут}} = 3,93 \cdot 10^{-4} \cdot 0,02 + 3,93 \cdot 10^{-4} \approx 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

При протекании тока менее $1 \cdot 10^{-3}$ А проводник нагревается незначительно. Поэтому для расчета ресурса изоляции температурное старение в математической модели не учитываем, в качестве механизма деградации рассматриваем электрическое старение за счет ЧР.

Старение ПВХ-изоляции электродных секций обусловлено частичным разрушением молекул полимера под действием комплекса внешних факторов, основным из которых являются частичные разряды. Следовательно, степень старения изоляции может быть оценена по количеству разрушенных молекул.

Количество разрушенных молекул за период времени t определяют по формуле [4]:

$$\Delta N = N_0 \cdot (1 - \exp(-K \cdot P_{\text{чр}} \cdot t)), \quad (4)$$

где N_0 – начальная концентрация молекул, м⁻³;
 K – коэффициент деструкции. Для новой ПВХ-изоляции значение $b = K \cdot P_{\text{чр}} = 10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ [4];
 t – время эксплуатации, с.

Начальная концентрация молекул [4]:

$$N_0 = \frac{\rho \cdot N_A}{M}, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала изоляции, равная 1400 кг/м³;

N_A – число Авогадро ($6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹);

M – молярная масса, г/моль.

Для ПВХ-изоляции одного звена винилхлорида $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ молярная масса составляет приблизительно 62,5 г/моль, для полимерного ПВХ: $M_{\text{ПВХ}} = 62,5 \cdot N$,

где N – степень полимеризации (для провода ПВ-3 составляет 1000-1500).

Начальная концентрация молекул:

$$N_0 = \frac{1400 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{0,0625 \cdot 1000} = 1,35 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

При рабочих параметрах (напряжении 2500 В, температуре окружающей среды не более 40 °С) и времени эксплуатации 1 год ($3,15 \cdot 10^7$ с) количество разрушенных молекул составит:

$$\begin{aligned} \Delta N &= 1,35 \cdot 10^{25} \cdot (1 - \exp(-10^{-9} \cdot 3,15 \cdot 10^7)) = \\ &= 1,35 \cdot 10^{25} \cdot 0,031 = 4,18 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \end{aligned}$$

Коэффициент деградации по количеству молекул:

$$\alpha_N = \frac{\Delta N}{N_0} \quad (6)$$

Подставим значение:

$$\alpha_N = \frac{4,18 \cdot 10^{23}}{1,35 \cdot 10^{25}} = 0,031$$

Доля разрушенных молекул составляет 3,1 % в год. Критическим значением является $\alpha_{N_{кр}} = 0,355$, то есть 35,5 % [12].

При моделировании целесообразнее определить количество неразрушенных молекул. Предполагая, что зависимость $N(t)$ экспоненциальная, необходимо вычислить эмпирическую функцию [4]:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-b \cdot t} \quad (7)$$

Величина b может быть определена по формуле:

$$b = K \cdot P_{\text{чр}} \quad (8)$$

Предельная доля оставшихся молекул составит

$$\frac{N_t}{N_0} = 1 - \alpha_{N_{кр}} = 1 - 0,355 = 0,645.$$

С учетом формулы (7):

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-K \cdot P_{\text{чр}} \cdot t} \quad (9)$$

Логарифмируя формулу (9), получим:

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -K \cdot P_{\text{чр}} \cdot t \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что остаточный ресурс изоляции составит, с:

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)}{K \cdot P_{\text{чр}}} \quad (11)$$

Подставив значения в формулу (11), получим:

$$t = -\frac{-0,4385}{10^{-9}} = 4,385 \cdot 10^8 \text{ с, что составляет}$$

13,9 лет.

При разрушении одного звена ПВХ выделяется одна молекула HCl. Следовательно, молярная масса HCl в полимерной молекуле ПВХ составит $N \cdot M_{\text{HCl}}$.

Определим потерю вещества в объеме изоляции через 1 год [13]:

$$\Delta m_V = \frac{\Delta N \cdot N \cdot M_{\text{HCl}}}{N_A} \quad (12)$$

где M_{HCl} – молярная масса HCl (36,46 г/моль).

В пересчете на 1 метр погонный провода ПВ-3 сечением $2,5 \text{ мм}^2$ при диаметре жилы $d=1,78 \text{ мм}$ и толщине изоляции $h=0,8 \text{ мм}$ площадь сечения изоляции составляет:

$$S_{\text{из}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2), \quad (13)$$

где D – диаметр провода с изоляцией, мм.

$$S_{\text{из}} = \frac{3,14}{4} \cdot (3,38^2 - 1,78^2) =$$

$$= 6,48 \text{ мм}^2 = 6,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Объем изоляции на $l=1$ метр погонный:

$$V_{\text{из}} = S_{\text{из}} \cdot l \quad (14)$$

Подставим значения:

$$V_{\text{из}} = 6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 6,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Следовательно, потеря вещества на 1 м провода составит:

$$\Delta m_l = \frac{\Delta N \cdot N \cdot M_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{из}}}{N_A} \quad (15)$$

$$\Delta m_l = \frac{4,18 \cdot 10^{23} \cdot 1000 \cdot 36,46}{6,022 \cdot 10^{23}} \cdot 6,48 \cdot 10^{-6} = 0,164 \text{ г}$$

Истончение изоляции составит:

$$\Delta h = R - \sqrt{R^2 - \frac{\Delta m_l}{\rho \cdot \pi \cdot l}}, \quad (16)$$

где R – радиус провода с изоляцией, мм.

$$\Delta h = 1,692 - \sqrt{1,692^2 - \frac{0,164}{0,0014 \cdot 3,14 \cdot 1000}} =$$

$$= 1,692 - 1,680 = 0,012 \text{ мм}$$

Толщина изоляции составит:

$$h_{\text{final}} = h - \Delta h \quad (17)$$

$$h_{\text{final}} = 0,8 - 0,012 = 0,788 \text{ мм}$$

В таблице 1 представлен расчет приведенных характеристик по годам до момента выхода проводника из строя (табл. 1).

К моменту достижения порога деградации 35,5% (13,9 лет) потеря массы изоляции составит около 2 г на метр погонный. С учетом того, что общая масса изоляции на 1 метр составляет около 9,07 г, величина потери будет ~20 % от веса полимера. Суммарное истончение достигает 0,131 мм (или 16,4 % от исходной толщины). К этому времени структура изоляции практически на 20 % будет состоять из микропор, за счет чего электрическая прочность уменьшится значительно быстрее, чем толщина изоляции, а, следовательно, увеличится мощность ЧР. Указанный эффект не учтен в формуле (11), поэтому она требует корректировки с учетом результатов периодического диагностирования изоляции.

Для определения фактической степени деградации при диагностировании целесообразно измерять тангенс угла диэлектрических потерь. В отличие от измерения сопротивления ($R_{\text{из}}$), результаты которого сильно зависят от влажности и температуры, $\text{tg}\delta$ отражает объемные изменения в структуре изоляции. Данный параметр характеризует процесс ионизации в микропорах, вызванной высоким напряжением.

Таблица 1. Изменение параметров изоляции в процессе эксплуатации

Время эксплуатации, год	Количество разрушенных молекул ΔN , m^{-3}	Доля разрушенных молекул α_N , %	Потеря вещества на 1 м.п провода Δm_l , г	Толщина изоляции h_{final} , мм
1	$4,18 \cdot 10^{23}$	3,1	0,164	0,788
2	$8,25 \cdot 10^{23}$	6,11	0,324	0,777
3	$1,22 \cdot 10^{24}$	9,3	0,479	0,767
4	$1,598 \cdot 10^{24}$	11,9	0,628	0,756
5	$1,968 \cdot 10^{24}$	14,6	0,773	0,746
6	$2,35 \cdot 10^{24}$	17,2	0,914	0,736
7	$2,67 \cdot 10^{24}$	19,8	1,047	0,727
8	$3,01 \cdot 10^{24}$	22,3	1,181	0,718
9	$3,33 \cdot 10^{24}$	24,7	1,306	0,709
10	$3,65 \cdot 10^{24}$	27,1	1,432	0,701
11	$3,96 \cdot 10^{24}$	29,32	1,553	0,692
12	$4,25 \cdot 10^{24}$	31,53	1,667	0,684
13	$4,54 \cdot 10^{24}$	33,67	1,781	0,676
13,9	$4,79 \cdot 10^{24}$	35,5	1,879	0,669

Тогда коэффициент деградации α_t в момент времени t (совпадает с моментом диагностирования при измерении тангенса угла диэлектрических потерь) можно рассчитать по формуле [12]:

$$\alpha_t = \frac{\ln\left(\frac{\text{tg}\delta_{\text{изм}}}{\text{tg}\delta_0}\right)}{B}, \quad (18)$$

где $\text{tg}\delta_0 = 0,05$ – начальное значение тангенса угла диэлектрических потерь для нового ПВХ (при 50 Гц) [14];

$\text{tg}\delta_{\text{изм}}$ – измеренное значение тангенса угла диэлектрических потерь в момент времени t . За год эксплуатации высоковольтного кабеля оно составляет приблизительно 0,0585. Для расчетов примем данное значение;

B – коэффициент, отражающий рост дипольных потерь и проводимости. Для ПВХ – $B=3,0...5,5$. В первоначальных расчетах принимаем: $B=5$ [14].

Подставив значения в формулу (18), получим:

$$\alpha_t = \frac{\ln\left(\frac{0,0585}{0,05}\right)}{5} = 0,031$$

Мощность ЧР увеличивается пропорционально объему газовых включений (микропор) и интенсивности ионизации. Для определения скорректированной мощности ЧР в ПВХ-изоляции используем комбинированную эмпирическую формулу. Она связывает геометрические параметры пор и энергию электрических импульсов. Для корректного моделирования изменения технического состояния изоляции электродов необходимо учитывать фактор времени. Мощность частичных разрядов с учетом результатов периодического диагностирования изоляции определим по формуле:

$$P_{\text{ЧР}} = P_{\text{ЧР0}} \cdot (1 + A \cdot \alpha_t^n), \quad (19)$$

где $P_{\text{ЧР0}}$ – начальная мощность ЧР, Вт;
 A – коэффициент интенсивности ионизации (для ПВХ в пористой структуре составляет 300...1000) [11];
 n – показатель степени, отражающий скорость объединения микропор ($n=2,5...3$) [11].

Для расчетов воспользуемся формулой относительного значения мощности ЧР:

$$\frac{P_{\text{ЧР}}}{P_{\text{ЧР0}}} = (1 + A \cdot \alpha_t^n); \quad (20)$$

$$\frac{P_{\text{ЧР}}}{P_{\text{ЧР0}}} = (1 + 950 \cdot 0,031^{2,5}) = 1,17$$

Согласно закону Ома, ток утечки в изоляции определяют по формуле:

$$I_{\text{ут}} = \frac{U}{R_{\text{из}}}. \quad (21)$$

С ростом деградации сопротивление изоляции уменьшается по экспоненциальному закону:

$$R_{\text{из}}(t) = R_0 \cdot e^{-D \cdot \alpha_t}, \quad (22)$$

где R_0 – начальное сопротивление ПВХ изоляции, Ом;

D – коэффициент падения диэлектрических свойств для ПВХ – $D=18...20$ [11]. В расчетах принимаем: $D=18$.

Результаты расчетов по формулам (19) – (22) представлены в таблице 2.

Частичные разряды вызывают локальное разрушение диэлектрика. Поэтому предлагаем использовать вместо коэффициента деградации в момент времени (t) динамический коэффициент деградации изоляции электродов с учетом увеличения мощности ЧР в микропорах по мере

Таблица 2. Зависимость тока утечки от увеличения мощности частичных разрядов

Время эксплуатации, год	Соотношение мощности частичных разрядов ($P_{\text{ЧР}}/P_{\text{ЧР0}}$)	Сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$ МОм/м	Ток утечки, $I_{\text{ут}}$ мА
1	1,17	286,2	0,009
2	1,94	166,5	0,015
3	3,53	93,7	0,027
4	5,74	58,7	0,043
5	8,94	36,1	0,069
6	13,22	22,6	0,111
7	18,59	14,2	0,177
8	24,32	9,0	0,277
9	31,35	5,9	0,426
10	38,93	3,8	0,657
11	47,70	2,6	0,979
12	36,41	1,7	1,458
13	29,49	1,2	2,143
13,9	24,19	0,8	2,979

электрического старения ПВХ. Тогда, преобразуя формулу (18), учитывая результаты периодического диагностирования изоляции, получим динамический коэффициент деградации:

$$\alpha_{\text{дин}} = \frac{\ln\left(\frac{\text{tg}\delta_{\text{изм}}}{\text{tg}\delta_0}\right)}{B} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{чр}}}{P_{\text{чр0}}}} = \alpha_t \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{чр}}}{P_{\text{чр0}}}} \quad (23)$$

где $\sqrt{\frac{P_{\text{чр}}}{P_{\text{чр0}}}}$ – коэффициент изменения мощности ЧР. Позволяет математически корректно перейти от суммы единичных пиковых выбросов энергии (ЧР) к их усредненному, интегральному воздействию на диэлектрик.

На основании изложенного выше определим динамический коэффициент деградации через 1 год, подставив ранее приведенные результаты вычислений по формулам (18) и (20):

$$\alpha_{\text{дин}} = 0,031 \cdot \sqrt{1,17} = 0,031 \cdot 1,08 = 0,034$$

Результаты расчетов по уточненным данным приведены в таблице 3. На рисунке 2 представлен

Таблица 3. Изменение характеристик ПВХ-изоляции электродных секций с использованием динамического коэффициента

Время эксплуатации, год	Доля разрушенных молекул, %	$P_{\text{чр}}/P_{\text{чр0}}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{чр}}}{P_{\text{чр0}}}}$	Доля разрушенных молекул после уточнения, %	Толщина изоляции h_{final} , мм
1	3,1	1,17	1,08	3,4	0,788
2	6,11	1,94	1,77	8,6	0,769
3	9,3	3,53	2,33	17,2	0,738
4	11,9	5,74	2,98	28,2	0,696
5	14,6	8,94	3,67	43,2	пробой

график изменения толщины ПВХ-изоляции электродов в зависимости от времени эксплуатации под действием частичных разрядов.

Из сопоставления результатов расчетов, представленных в таблицах 1 и 3, следует, что за 4 года изоляция теряет столько же массы и толщины, сколько в обычном режиме теряла бы за 13,9 лет. Это связано с тем, что ЧР в порах при напряжении 2500 В работают как микровзрывы, вытесняя HCl из структуры ПВХ значительно быстрее. Уточненное расчетное значение истончения к моменту отказа составляет 0,130 мм, и этот порог достигается в 3,5 раза быстрее из-за ионизационных процессов.

При прогнозировании остаточного ресурса изоляции авторы предлагают использовать разработанную математическую модель, адаптированную для работы под высоким напряжением при достаточно низких рабочих температурах. Тогда остаточный ресурс изоляции после очередного диагностирования может быть определен по формуле (11) с учетом увеличения

мощности ЧР (19) и динамического коэффициента деградации (23):

$$t = - \frac{\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)}{K \cdot P_{\text{чр0}} \cdot \left(1 + A \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{\text{tg}\delta_{\text{изм}}}{\text{tg}\delta_0}\right)}{B} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{чр}}}{P_{\text{чр0}}}}\right)^n\right)} \quad (24)$$

Разработанная математическая модель позволяет перейти от «календарного» планирования замены электродов в электродной секции электроактиватора к их замене по фактическому состоянию.

Заключение

Прогнозирование ресурса службы изоляции по фактическому состоянию позволяет более точно предсказывать, как долго прослужат электроды в производственных условиях. Согласно [15], диагностирование изоляции производят один раз в год. Исходя из данных таблицы 3, периодичность контроля технического состояния изоляции необходимо производить не менее чем один раз в 3 месяца до значения $\text{tg}\delta=0,2$. При превышении указанного значения тепловыделения в диэлектрике становятся настолько значительными, что деградация переходит в термическую стадию и электрод может загореться даже при отсутствии токовой нагрузки на жилу [14].

Применение предложенной математической модели способствует повышению эксплуатационной надежности, снижает ущерб от внезапных отказов и позволяет планировать ремонты и замены проводников в электродных секциях более эффективно.

Данная математическая модель может быть использована для оптимизации работ по эксплуатации высоковольтного оборудования малой мощности, такого как диэлектрические сепараторы, ионизаторы, маломощные высоковольтные источники питания, коммутационные аппараты, а также другие подобные устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бондарчук, О.В. Методика расчета основных узлов электроактиватора биологической системы ячменя / О.В. Бондарчук // Агропанорама. – 2022. – № 3. – С. 25-28.

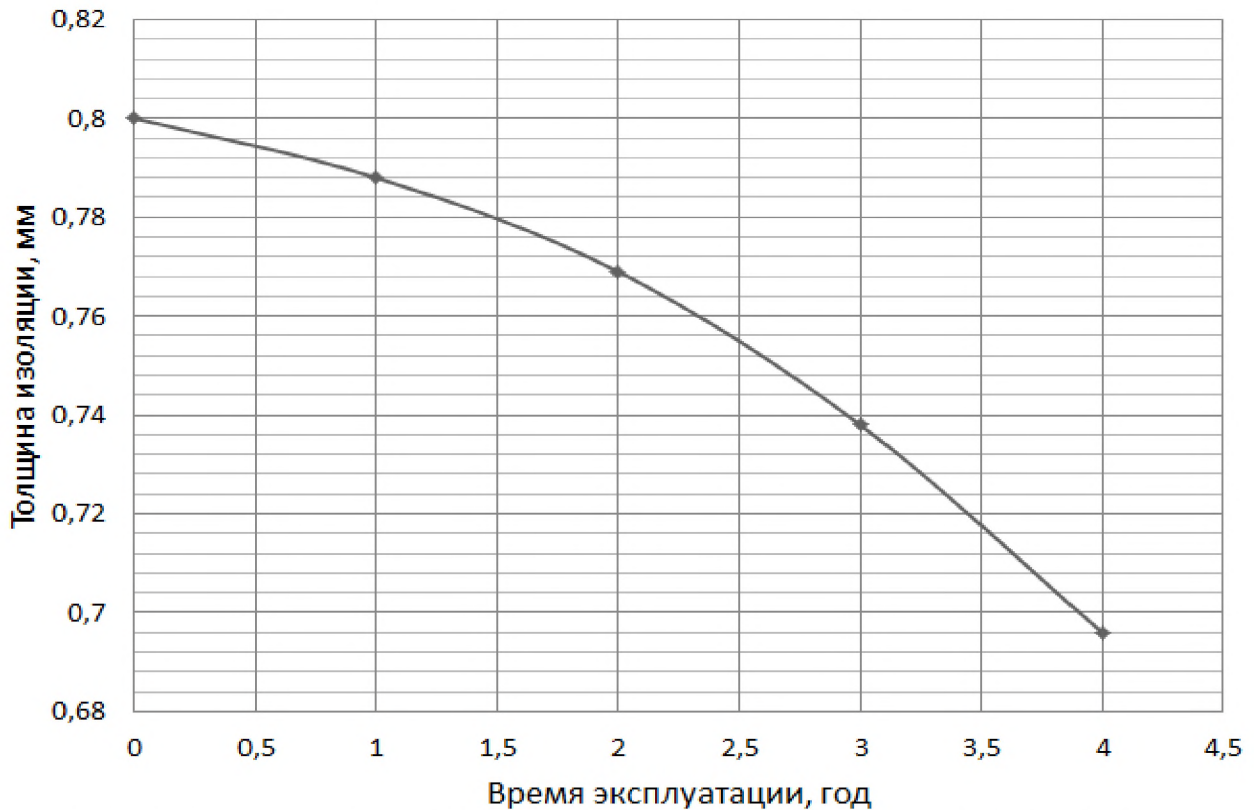


Рисунок 2. Изменение толщины ПВХ изоляции электродов в зависимости от времени эксплуатации под действием частичных разрядов

2. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46-52.
3. Dakin, T.W. Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon / T.W. Dakin // AIEEE Transactions. – 1948. – Vol. 67. – P. 113-122.
4. Кучинский, Г.С. Изоляция установок высокого напряжения: учебник для вузов / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
5. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
6. Dissado, L.A. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers / L.A. Dissado, J.C. Fothergill. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1992. – 601 p.
7. Montanari, G.C. A theoretical outline for selection of the voltage life model / G.C. Montanari // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1994. – Vol. 1, № 6. – P. 1092-1103.
8. Simoni, L. A general approach to the endurance of electrical insulation under combined stress / L. Simoni // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1981. – Vol. EI-16, № 6. – P. 477-489.
9. Дмитриева, В.В. Анализ математических моделей ленточного конвейера при различном числе аппроксимирующих масс / В.В. Дмитриева, П.Е. Сизин // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал). – 2022. – № 1. – С. 34-46.
10. Овчаров, В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – Киев: УСХА, 1990. – 168 с.
11. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
12. Поляков, Д.А. Математическое моделирование срока службы полимерной изоляции кабелей / Д.А. Поляков, М.А. Холмов, Д.И. Плотников // Омский научный вестник. – 2020. – № 6 (174). – С. 69-73.
13. Минскер, К.С. Деструкция и стабилизация поливинилхлорида / К.С. Минскер, Г.Т. Федосеева. – М.: Химия, 1979. – 272 с.
14. Борисова, М.Э. Физика диэлектриков / М.Э. Борисова, С.Н. Койков. – Л.: ЛГУ, 1979. – 240 с.
15. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: ТКП 181-2023. – Введ. 28.02.2025. – Минск: Минэнерго, 2025. – 203 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.04.2026