

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

*Дано обоснование диагностических параметров электропроводки, характеризующих ее изоляционные и токопроводящие свойства. Приведена программа экспериментальных исследований электропроводки. Полученные статистические модели (уравнение регрессии), описывающие динамику изменения диагностических параметров, позволяют оценить остаточный ресурс электропроводки.*

**Ключевые слова:** электропроводка, диагностические параметры, статистические модели, остаточный ресурс.

G.A. Goncharenko

## THE MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTRIC WIRING TECHNICAL CONDITION OF AGRICULTURAL OBJECTS

*The substantiation of the electric wiring diagnostic parameters characterizing its insulating and conductive properties is given. The experimental research program of electrical wiring is presented. The received statistical models (regression equation) describing the dynamics of diagnostic parameter changes allow to assess the electric wiring residual resource.*

**Key words:** electrical wiring, diagnostic parameters, statistical models, residual resource.

Важным фактором в оценке и прогнозировании остаточного ресурса электропроводки (ЭП) является получение достоверной информации о её техническом состоянии. В одних случаях причиной прекращения эксплуатации ЭП следует считать моральный износ, в других – снижение эффективности функционирования, в результате которого дальнейшая эксплуатация электропроводки становится экономически нецелесообразной (например, при увеличении потерь электроэнергии или перерывов электроснабжения), в третьих – снижение диагностических параметров (ДП) ниже предельного допустимого уровня, когда возникает опасность электропоражения или возникновения пожара.

Большинство параметров физических процессов, протекающих в электроустановках, несут объективную информацию о старении и износе электропроводок и технологического электрооборудования. Регистрация ДП позволяет наблюдать их дрейф, т.е. динамику постепенного смещения от нормативных значений. Этот дрейф не может быть устранен без проведения определенных профилактических мероприятий. Развивающийся физический процесс износа электропроводки является монотонным и необратимым. Если известны предельно допустимые уровни параметров, то они могут быть использованы для оценки и прогнозирования остаточного ресурса [1]. Поэтому под диагностическими параметрами будем понимать совокупность количественных показателей, характеризующих изоляционные и токопроводящие свойства электропроводки. При этом будем считать, что значения диагностических параметров можно оценивать с помощью измерения.

К диагностическим параметрам ЭП отнесем:

1. По изоляционным свойствам:
  - сопротивление изоляции ( $R_{из}$ );
  - ток утечки (дифференциальный) на землю ( $I_{ут}$ );
  - коэффициент абсорбции ( $K_{абс}$ );
  - коэффициент поляризации ( $K_{пол}$ ).
2. По токопроводящим свойствам:
  - сопротивление токопроводящих цепей ( $R_{т.ц.}$ );
  - сопротивление контактов и клеммных соединений ( $R_{конт.}$ );
  - температура контактов ( $t_{конт.}^0$ ).

Измерение  $R_{из}$  является основным методом контроля изоляции ЭП, регламентированным действующими нормами [2], устанавливающими периодичность испытаний. Измерение сопротивления изоляции производится без нагрузки, и её нормой является сопротивление не ниже 0,5 МОм. Существующий метод измерения  $R_{из}$  с помощью мегомметра имеет значительную погрешность [3], ибо он основан на принципе наложения постоянного тока на переменный ток сети, что не позволяет определить фактическое  $R_{из}$ .

Измерение  $I_{ут}$  основано на выделении с помощью дифференциального трансформатора тока (ДТТ) утечки, представляющей собой геометрическую сумму полных токов утечки через изоляцию фазных проводов и нулевого рабочего, включая активную и емкостную составляющую. Достоинство данного метода состоит в том, что измерение тока утечки проводится в рабочем режиме с учетом номинального напряжения сети и реальной нагрузки. Контроль тока утечки, являясь более безопасным в отличие от измерения сопротивления изоляции, не требует применения повышенного напряжения, поэтому при производстве измерений не происходит ухудшение состояния контролируемой сети.

Коэффициент абсорбции  $K_{абс}$  характеризует влажность изоляционного материала [4]: чем больше изоляция увлажнена, тем коэффициент абсорбции будет меньше. Считается, что при  $K_{абс} < 1,25$  изоляция является несоответствующей нормативу, при  $K_{абс} = 1,25 - 1,6$  – хорошей; при  $K_{абс} > 1,6$  – превосходной.

Коэффициент поляризации  $K_{пол}$  [4], позволяющий оценить техническое состояние изоляции и остаточный ресурс, показывает способность заряженных частиц перемещаться в диэлектрике под действием электрического поля, что определяет степень старения изоляции. Значение коэффициента поляризации должно быть значительно больше единицы. Если  $K_{пол} < 1$  – изоляция является опасной;  $K_{пол} = 1 - 2$  – сомнительной;  $K_{пол} = 2 - 4$  – хорошей;  $K_{пол} > 4$  – превосходной.

Для определения закономерностей изменения диагностических параметров ЭП от факторов внешней среды были проведены экспериментальные исследования, включающие: выбор варьирующих факторов, обоснование объема опытов, определение последовательности изменения факторов и выбор шага, обоснование набора средств измерения, выбор методов обработки и анализа экспериментальных данных, сведение результатов опытов в удобочитаемую форму записи, оценку всех переменных в единой системе единиц физических величин.

В качестве диагностических параметров рассматривались:  $R_{из}$ ,  $I_{ут}$ ,  $K_{абс}$ ,  $K_{пол}$ ,  $K_{т.ц}$ .

При выборе факторов, влияющих на величину ДП, учитывались:

- назначение объекта;
- характеристика электропроводки (марка провода, способ прокладки, срок эксплуатации);
- характеристика микроклимата помещений (температура, относительная влажность, наличие химически активных веществ);
- параметры электроустановки (напряжение сети, ток короткого замыкания, сопротивление заземляющего устройства, сопротивление повторного заземления, параметры УЗО).

Целью статистической обработки результатов измерений явилось определение законов распределения диагностических параметров и их числовых оценок, построение уравнений регрессий и определение коэффициентов корреляции, позволяющие установить причинно-следственные связи между параметрами и признаками, характеризующими их численное значение.

Статистическая обработка результатов измерений включала: определение минимального необходимого числа измерений (объем выборки), оценку однородности полученной выборки, определение коэффициентов вариации, выбор доверительной вероятности и максимально допустимую ошибку измерений.

Были обследованы производственные здания, животноводческие объекты и жилые дома в сельских поселениях Алтайского края.

Рассматривались групповые электропроводки (алюминиевые и медные) с поливинилхлоридной изоляцией, выполненные проводами и кабельными линиями. Учитывались следующие виды электрической нагрузки: электродвигательная, электротермическая и осветительная.

Для измерения диагностических параметров ЭП и характеристик микроклимата помещений использовалась система измерительных приборов (универсальное диагностирующее устройство MIC-1000, токовые клещи – мультиметр переменного тока Prova и др.).

Формализованное описание процесса старения изоляции и токоведущей части электропроводки может быть представлено в общем виде структурной схемой влияния факторов на формирование значений ряда  $S(t)$  в виде следующего разложения:

$$S(t) = F_{тр}(t) + \sum_{k=1}^n a_k f_k(t) + z(t), \quad (1)$$

где  $F_{тр}(t)$  – функция тренда, обусловленная физической природой процесса старения ЭП, характеризующая тенденцию (динамику изменения) диагностического параметра  $S(t)$ ;  $f_k(t)$  – функция, формирующая изменение диагностического параметра, обусловленное действием  $k$ -го фактора;  $z(t)$  – результат воздействия случайных факторов, не поддающихся учету и оценке;  $a_k$  – коэффициент, принимающий значение 1 или 0 в за-

в зависимости от того, участвует ли в формировании значений  $S(t)$   $k$ -й фактор. Вывод об учете  $k$ -го фактора в формировании значений  $S(t)$  принимается экспертом на основании статистического анализа диагностических параметров.

Основываясь на разложении (1), можно дать общую формулировку задачи построения модели процесса старения ЭП: по имеющейся траектории  $S(t_1), S(t_2), \dots, S(t_m)$  анализируемого ряда  $S(t)$  требуется обобщить модель, адекватно описывающую функции  $f_k(t)$ , присутствующие в разложении, а также определить значения параметров  $a_k$ .

Для построения математической модели диагностического параметра ЭП в зависимости от факторов внешней среды была принята функция вида

$$M[(ДП)] = \theta(t^0, V, T, \alpha, \beta, \gamma), \quad (2)$$

где  $M[(ДП)]$  – математическое ожидание диагностического параметра при соответствующих значениях контролируемых переменных;  $t^0$  – температура помещения;  $V$  – относительная влажность;  $T$  – срок эксплуатации электропроводки;  $\alpha, \beta, \gamma$  – коэффициенты, определение которых составляет цель эксперимента.

Статистическая обработка результатов измерений с учетом принятых допущений о линейной модели и представлении схемы замещения электропроводки как однородной линии с распределенными параметрами позволила определить законы распределения ДП и их числовые оценки, построить уравнения регрессии и найти коэффициенты корреляции, позволяющие установить причинно-следственные связи между ДП и признаками, характеризующими их численное значение.

Приведенные уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} K_{\text{пол}} &= 2,107 + 0,022 t - 0,001 V - 0,038 T, \\ K_{\text{абс}} &= 2,275 + 0,003 t - 0,014 V, \\ R_{\text{из}} &= -10,914 + 9,135 K_{\text{абс}} + 2,638 K_{\text{пол}} \end{aligned} \quad (3)$$

позволяют достаточно точно прогнозировать  $k$ -й диагностический параметр, что подтверждается высокими значениями множественных коэффициентов детерминации и коэффициентов корреляции. Их значение свидетельствует об адекватном выборе совокупности факторов, влияющих на величину определенного диагностического параметра.

### Выводы

1. Техническое состояние электропроводки следует оценивать совокупностью диагностических параметров, характеризующих динамические свойства изоляции и токоведущих частей ЭП.
2. Установлено, что статистические оценки диагностических параметров ( $R_{\text{из}}$ ,  $I_{\text{ут}}$ ,  $K_{\text{абс}}$  и  $K_{\text{пол}}$ ) близки к нормальному распределению и имеют полимодальный характер. Существуют значимые статистические связи между диагностическими параметрами и характеристиками микроклимата и временем эксплуатации ЭП.
3. Построенные статистические модели старения и износа изоляции, на основе которых установлены закономерности изменения диагностических параметров, позволяют прогнозировать остаточный ресурс электропроводки.

### Литература

1. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России. РД 09.102-95.
2. Правила эксплуатации электроустановок потребителей / утв. Ростехнадзором России 31.03.92. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Деан, 2001. – 320 с.
3. Карякин Р.Н. Устройства электроустановок производственных зданий: справ. – М.: Энергосервис, 2004. – 278 с.
4. Измерение параметров изоляции // Сонел. – М., 2005. – URL: [http://www.sonel.ru/biblio/measurement/measurement\\_mik/](http://www.sonel.ru/biblio/measurement/measurement_mik/)-Зарг.с экрана.

