

УДК 622.23.08

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, С. Ф. МАСЛОВИЧ, кандидат технических наук, С. И. БАХУР, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрена программная реализация одного из методов расчета показателя качества системы технического обслуживания электрооборудования и объектов электроснабжения. В качестве показателя качества выбран функционал, характеризующий относительное время пребывания объекта в работоспособном состоянии.

**С** проблемой надежности в электроэнергетике связаны следующие практические задачи:

- прогнозирование надежности оборудования и установок;
- нормирование уровня надежности;
- испытания на надежность;
- расчет и анализ надежности;
- оптимизация технических решений по обеспечению надежности при создании и эксплуатации электрооборудования, установок, систем;
- экономическая оценка надежности.

Теория надежности вводит в практику инженерного исследования количественные оценки, которые позволяют: устанавливать требования и нормативы надежности оборудования для установок и систем; сравнивать различные виды оборудования, установок и систем по их надежности; рассчитывать надежность установок по надежности их элементов; оптимизировать величину необходимого резерва и структуру технических объектов; выявлять наименее надежные элементы оборудования, установок и систем; оценивать сроки службы оборудования и установок.

Результаты энергоаудитов, проведенных в Барановичском вагонном депо и локомотивном депо г. Жлобина, указывают на большой физический износ электропотребляющего оборудования. Более 25 % электрооборудования эксплуатируется свыше 20 лет, поэтому актуально повышение надежности и снижение удельных энергозатрат на его эксплуатацию. При этом задачи модернизации и замены устаревшего оборудования, а также расчёт оптимальных сроков профилактических работ необходимо рассматривать в комплексе с мероприятиями по совершенствованию технологии и повышению качества услуг по ремонту вагонов и локомотивов.

Формализация математического описания статистической информации с целью оптимизации сроков профилактических работ требует учета экономики и безопасности.

Если в качестве математического ожидания  $a$  рассматривать **нормативное значение** контролируемого параметра, то за соблюдением этой настройки можно будет следить на основании замеров выборочной средней  $\bar{x}$ . Тогда, исходя из заданной доверительной вероятности  $u$  и величин допуска в меньшую и в большую сторону, можно будет отмечать случаи нарушения заданных требований.

Если закон распределения не удается подобрать да-

же приближенно, то можно использовать неравенство Чебышева

$$P(|\bar{x} - a| < \delta) \geq 1 - \frac{\sigma^2}{\delta^2};$$

правда, в этом случае необходимо знание дисперсии  $\sigma^2$ , которую можно оценить дополнительными **предварительными** исследованиями.

Существует ряд разработанных методов *контроля и управления случайными процессами* [1], основной целью которых является обеспечение **экономичного** обслуживания по состоянию. Следует особо отметить, что все эти математически строгие результаты доведены до алгоритмов, пригодных к практическому использованию.

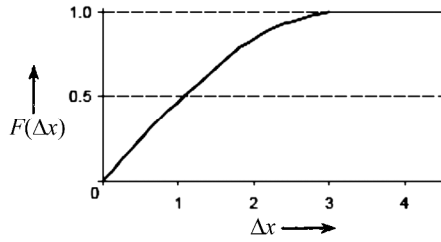
Рассматривается  $\xi(t)$  – случайный **монотонно убывающий** во времени  $t$  процесс, о развитии которого можно судить по некоторому контролируемому признаку, наблюдаемое значение которого в момент времени  $t_k$  обозначено через  $x_k$ . Это соответствует обычной практике, когда контрольные мероприятия проводятся через определенные промежутки времени, не обязательно равные. Суммарные затраты на наблюдение и регулировку системы в период ее работоспособности, т.е. пока  $x_k < L$  ( $L$  – пороговое значение, соответствующее отказу) составляют сумму  $C$ , а штраф (потери при отказе, т.е. выходе системы за порог отказа, когда  $x_k < L$ ) – величину  $A$ .

Если для такого процесса **изменение** признака  $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$  на очередном интервале времени контроля не зависит от текущего времени, т.е. не зависит от предыстории, и распределено по известному (хотя бы эмпирически) закону:  $P(\Delta x_k < z) = F(z)$ , то минимум удельных затрат на контроль и обслуживание достигается при прекращении эксплуатации (для ремонта, замены и т.п.) в момент времени  $t_{k-1}^*$ , когда впервые будет **нарушено** неравенство; или, что то же самое, когда впервые **выполнится** неравенство

$$1 - P(\Delta x < L - x_{k-1}) \leq \frac{C}{A(k-1)}.$$

Алгоритм действий при организации управления качеством по такому методу рассмотрим на примере, проиллюстрированном на рисунке 1. На левом графике приведен эмпирический закон распределения  $F(z)$ , полученный предварительным сбором статистической информации, по которому с помощью *единичного жребия* можно смоделировать разовое изменение контролируемого признака  $\Delta x_k$ . На правом графике представлено монотонное развитие процесса от состояния полностью исправной системы (признак  $x = 0$ ) к отказу

(признак  $x = L$ ). Видно, как с течением времени контролируемый признак ("дефектность", количество отка-



завших подсистем и т. п.) стремится к порогу  $L$ , за которым система считается отказавшей.

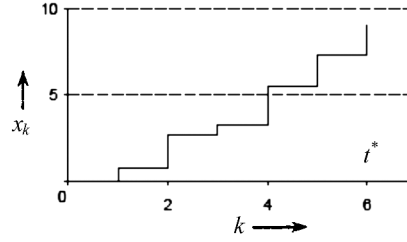


Рисунок 1 – Пример метода контроля состояния

Второй рассматриваемый здесь метод контроля весьма перспективен для учета изменения интенсивности отказов, когда она растет у *стареющей* системы. Пусть интенсивность отказов непостоянна, т. е. увеличивается со временем по известному (хотя бы эмпирическому) закону  $\lambda = \lambda(t)$ .

Вероятность безотказной работы системы

$$F(\omega) = 1 - e^{-\int_0^{\omega} \lambda(t) dt}$$

Введем обозначения:

$T_1$  – среднее время замены исправной системы;

$T_2$  – среднее время замены неисправной системы (обычно на практике  $T_2 > T_1$  из-за затрат на ликвидацию последствий отказа);

$T_3$  – момент времени *предупредительной* замены системы.

Тогда  $T_3$  определяется из условия

$$\frac{T_1}{T_2 + \Delta t} = 1 - \frac{1}{1 - F(T_3) + \lambda(T_3) \int_0^{T_3} [1 - F(\omega)] d\omega}$$

В качестве показателя эффективности системы технического обслуживания (ТО) используется функционал, характеризующий относительное время пребывания объекта в работоспособном состоянии. Для получения результатов оценки качества системы ТО следует иметь основные показатели надежности объекта эксплуатации, а также средние затраты времени на выполнение основных плановых и аварийно-восстановительных работ. Знание указанных величин в большинстве случаев достаточно для использования созданной программы расчета.

Предложенный нами подход анализа надежности имеет определенное преимущество перед известными в литературе алгоритмами расчета, так как при сохранении строгости вычислений обладает несомненной простотой и наглядностью. Он позволяет при проектировании технических объектов заранее оценить достаточность предусмотренных объема и номенклатуры регламентных работ для получения оптимальной (в некотором смысле) стратегии ТО. Кроме того, появляется возможность оперативно исследовать влияние различных факторов, связанных с системой ТО, на показатели ее эффективности.

Основными факторами, влияющими на эффективность функционирования системы ТО, являются показатели надежности объекта, а также время поиска и продолжительность плановых и аварийно-восстановительных работ. Программный инструмент позволяет при проектировании или эксплуатации технических объектов оценить достаточность предусмотренных объема и номенклатуры регламентных работ.

Расчет оптимальных сроков профилактических работ при постепенных отказах для достижения максимальной вероятности безотказной работы реализован на основе формулы

$$P(t) = \int_0^t \varphi(x) \Theta(t-x) dx,$$

где  $\varphi(x)$  – плотность вероятности появления неисправности (реализуются нормальный, показательный, Вейбулла и другие распределения);  $\Theta(x)$  – условная вероятность отказа на интервале инкубации.

Наработка электрооборудования на отказ зависит от внешних и внутренних возмущающих факторов; природа первых не зависит от свойств электрооборудования, вторых – обусловлена его свойствами. В качестве основных параметров математической модели надежности функционирования оборудования можно использовать наработку на отказ и среднее время восстановления, что позволяет охарактеризовать безотказность и долговечность оборудования. Такой подход к оценке вероятности отказа элементов реализуется учетом статистической информации о различных типах отказов, полученных в результате обследований. Значения результирующей вероятности безотказной работы и интенсивности отказов системы с учетом эксплуатации и без нее иногда отличаются в несколько раз [2–4]. Это является обычно следствием сделанных при ориентировочных расчетах допущений: анализируемая система, как правило, структурно является последовательной; условия эксплуатации не учитываются; отказы элементов независимы; модели отказов любых элементов полагаются экспоненциальными [2]. Многочисленные исследователи указывают на актуальность определения устойчивых уровней наработки на отказ и повышения надежности электрооборудования, применения аналитических методов оценки надежности технических систем [3, 4].

В зависимости от информационной составляющей исследуемого объекта и возможности проведения статистических испытаний предложены различные модели определения параметров надежности для технического обслуживания (рисунок 2).

На рисунке 3 приведен пример определения показателей безотказности функционирования невозстанавливаемого объекта в программе Mathcad для различных законов распределения. В качестве наиболее значимых показателей безотказности используются следующие: вероятность безотказной работы, средняя наработка, гамма-процентная наработка до отказа, средняя остаточная наработка до отказа.

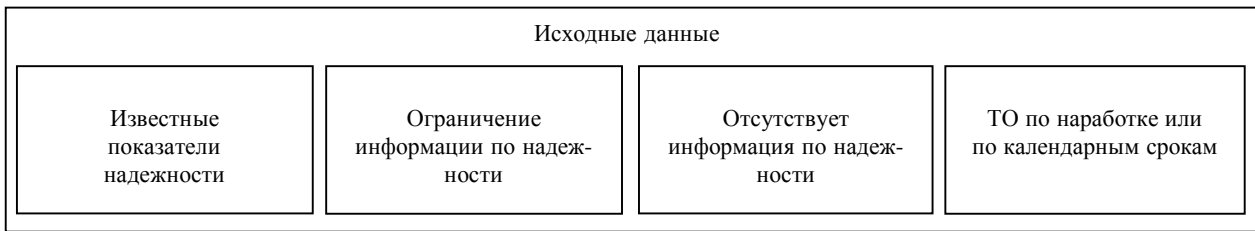


Рисунок 2 – Модели технического обслуживания

<p>Вейбулла закон распределения  <math>\alpha := 0.7 \quad \beta := 15</math></p> $f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	<p>Нормальный закон распределения  <math>M := 10 \quad \sigma := 3</math></p> $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\left[\frac{(x-M)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	<p>Показательный закон распределения  <math>\lambda := 0.05</math></p> $f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
---	--	---

Рисунок 3 – Пример определения показателей безотказности

Для предприятий железнодорожной отрасли (вагонное и тепловозное депо) с помощью представленных программ производился расчет для следующего оборудования: вентиляция, кран-балки, мостовые краны, электродомкраты, машины для мойки, гальванические ванны, станки, пресса, насосы, сетевые подогреватели, компрессора, градири и пр. Наибольшее внимание с точки зрения наибольшего расхода электроэнергии представляет вентиляционное, насосное, компрессорное ( $\approx 22\%$ ), станочное ( $\approx 12\%$ ) и сварочное ( $\approx 16\%$ ) электрооборудование, освещение ( $\approx 22\%$ ).

В состав объектов исследования входили следующие участки депо: вагонсборочный, ремонтно-комплектовочный, колесно-роликовый, автоконтрольный, пункты технического обслуживания вагонов, ремонтно-механический, энергосиловой, участок по обслужива-

нию зданий и сооружений. Наибольшее количество ремонтов из записей журналов заявок связано с заменой ламп освещения, пультов управления кран-балкой, вентиляторов.

С целью анализа влияния различных факторов выполнялись модельные (Multisim) и приборные эксперименты. Анализ моделирования включал оценку состояния эффективности энергоиспользования технологического оборудования, источников искусственного освещения, вентиляционных систем, оборудования по производству сжатого воздуха, сварочного оборудования.

На рисунке 4 приведено поле предварительного анализа влияющих факторов, которое реализовано как Web-приложение с целью пополнения базы данных экспертными мнениями и возможностью пополнения библиотеки нормативных документов.

Шаблон исходных данных

Резистор	Конденсатор	Катушка
Возд. линия	Каб. линия	ТР
Выка	АД	ДПТ
Создать новый элемент	Лампа	СГ

Закон распределения Экспоненциальный

Параметры

Дополнительные сведения

Результат нормальный вариант

$R(t) =$

$T_{ср} =$

наимудший вариант

$R(t) =$

$T_{ср} =$

Поле модели

СГ	$R(t) =$	$T_{ср} =$	
ЛЭП	$R(t) =$	$T_{ср} =$	
ТР	$R(t) =$	$T_{ср} =$	
АД	$R(t) =$	$T_{ср} =$	

Параметры моделирования

Напряжение	220	+20	-20
Ток	5	+0.5	-0.5
Частота	50	+7	-7
Температура	20	+10	-30
Влажность	70	+10	-5

Рисунок 4 – Часть поля предварительного анализа влияющих факторов

Этап приборных экспериментов включал подбор соответствующего оборудования и методик испытаний. В перечень средств измерений входят анализаторы качества электроэнергии, люксметры, тепловизоры.

Библиотека данных по результатам накопленных сведений и проводимых исследований включает результаты исследований применяемого и нового оборудования.

Ниже приводятся некоторые положения библиотеки анализа влияющих факторов.

Влияние отклонений напряжения в электрической сети приводят к следующим последствиям:

- колебаниям светового потока осветительных приборов (фликер-эффект);
- нарушениям в работе преобразователей, регулирующих устройств и компьютеров;
- колебаниям момента на валу вращающихся электрических машин, вызывающим дополнительные потери электроэнергии и увеличенный износ оборудования, а также нарушения технологических процессов, требующих стабильной скорости вращения.

При снижении напряжения до  $0,9 U_{ном}$  время сварки увеличивается на 20 %, а при выходе его за пределы ( $0,9 \dots 1,1 U_{ном}$ ) возникает брак сварных швов. Отклонения напряжения отрицательно влияют на работу электросварочных машин: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15 % получается 100%-ный брак продукции.

Колебания напряжения с размахом 10–15 % могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также вентильных выпрямительных агрегатов.

*Влияние несимметрии напряжений на работу электрооборудования:* при несимметрии напряжений в 2 % сроки службы асинхронных двигателей сокращаются на 10,8, синхронных – на 16,2; трансформаторов – на 4; конденсаторов – на 20 %. Срок службы полностью загруженного двигателя, работающего при несимметрии напряжения 4 %, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжения 5 % располагаемая мощность асинхронного двигателя уменьшается на 5–10 % [5]. Скорость вращения асинхронных двигателей несколько снижается, возрастают вибрация вала и шум.

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей: существенно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

*Влияние несинусоидальности напряжения.* Наиболее серьезные нарушения имеют место в работе мощных управляемых вентильных преобразователей. Токи 3-й и 5-й гармоник газоразрядных ламп составляют 10 и 3 % от тока 1-й гармоники. Эти токи совпадают по фазе в

соответствующих линейных проводах сети и, складываясь в нулевом проводе сети 380/220 В, обуславливают ток в нем, почти равный току в фазном проводе.

*Влияние отклонения частоты в энергосистеме на работу электроприемников.* Различают электромагнитное и технологическое влияние отклонения частоты на работу электроприемников. Электромагнитная составляющая обуславливается увеличением потерь активной мощности и ростом потребления активной и реактивной мощностей. Можно считать, что снижение частоты на 1 % увеличивает потери в сетях на 2 %.

Пониженная частота в электрической сети влияет на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью (электродвигатели, трансформаторы), за счет увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных элементов.

Практическое применение программного инструментария заключается в оптимизации (в некотором смысле) технических решений по обеспечению надежности при проектировании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, систем. Результаты исследования позволяют прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; установить “узкие места” в обеспечении надежности; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

#### Список литературы

- 1 Барзилович, Е. Ю. Оптимально управляемые случайные процессы и их приложения (теоретические основы эксплуатации авиационных систем по состоянию) / Е. Ю. Барзилович. – Егорьевск : ЕАТК ГА, 1996. – 299 с.
- 2 Певзнер, Л. Д. Надежность горного электрооборудования и технических средств шахтной автоматики / Л. Д. Певзнер. – М. : Недра, 1983. – 198 с.
- 3 Лубков, Н. В. Аналитические методы оценки надежности технических систем / Н. В. Лубков, А. С. Степанянц // Измер., контроль, автоматизация. – 1979. – № 2 (18). – С. 45–53.
- 4 Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / В. С. Богомолов [и др.] // Вестник ВИИИЭ. – 1997. – С. 25–32.
- 5 Епанешников, М. М. Электрическое освещение / М. М. Епанешников. – М.: Энергия, 1973. – 352 с.

Получено 01.11.2014

**V. N. Galushko, S. F. Maslovich, S. I. Bahur.** Software tools for the simulation of reliability parameters of railway enterprises.

The article describes the program realization of the method to calculate the quality indicator for technical service system of electrical equipment and objects supplied with electricity. The functional defined relative time of the object in workable condition is chosen as a factor of quality.