

УДК 622.23.08

## **ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**С. И. БАХУР, А. А. АЛФЕРОВ, Т. В. АЛФЕРОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**В. Н. ГАЛУШКО**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

### **Введение**

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 электротехнического оборудования, 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 более 20 лет, поэтому актуально повышение надежности и снижение удельных энергозатрат на его эксплуатацию. При этом задачи модернизации устаревшего оборудования, а также расчет оптимальных сроков профилактических работ необходимо рассматривать в комплексе с мероприятиями по совершенствованию технологии и повышения качества услуг по ремонту вагонов и локомотивов.

Целью данной работы является 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.

### Основная часть

Формализация математического описания статистической информации с целью оптимизации сроков профилактических работ требует учета экономических факторов и требований 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  $\gamma$  и величин допуска в меньшую и в большую сторону, можно будет отмечать случаи нарушения заданных требований.

Если закон распределения не удастся подобрать даже 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 неубывающий во времени  $t$  процесс, о развитии которого можно судить по некоторому контролируемому признаку, наблюдаемое значение которого в момент времени  $t_k$  обозначено  $x_k$ . 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 рис. 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 кон-

тролируемый признак («дефектность», количество отказавших подсистем и т. п.) стремится к порогу  $L$ , за которым система считается отказавшей.

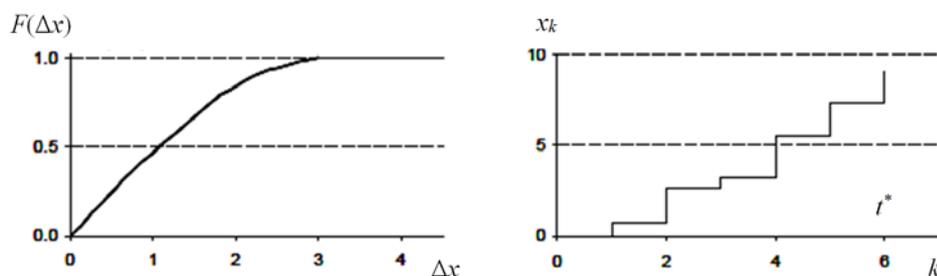


Рис. 1. Пример метода контроля состояния

Второй рассматриваемый здесь метод контроля весьма перспективен для учета изменения интенсивности отказов, когда она растет у *стареющей* системы. Пусть интенсивность отказов не постоянна  $\lambda \neq \text{const}$ ,  $\lambda'(t) \geq \text{const}$ , 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 в статье 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 инструментарий 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

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

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 различны в несколько раз [2]–[4]. Это является, как правило, следствием сделанных при ориентировочных расчетах допущений: анализируемая система, как правило, структурно является последовательной; условия эксплуатации не учитываются; отказы элементов независимы; модели отказов тех или иных 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 (рис. 2).

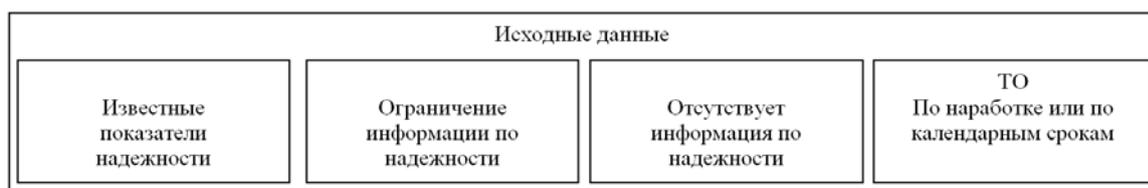


Рис. 2. Модели технического обслуживания

На рис. 3 приведен пример определения показателей безотказности функционирования невосстанавливаемого 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.

<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> $f(x) := \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
---	--	---

Рис. 3. Пример определения показателей безотказности

Для предприятий железнодорожного транспорта (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, градирни и др. Особое внимание с точки зрения наибольшего расхода электроэнергии представляет вентиляционное, насосное и компрессорное ( $\approx 22\%$ ), станочное ( $\approx 12\%$ ) и сварочное ( $\approx 16\%$ ) электрооборудование, освещение ( $\approx 22\%$ ).

В состав объектов исследования входили следующие участки депо: вагонооборотный, ремонтно-коплектовочный, колесно-роликовый, автоконтрольный, пункты технического обслуживания вагонов, ремонтно-механический, энергосиловой, участок по обслуживанию 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 влияющих 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 рис. 4 приведена часть поля предварительного анализа влияющих факторов, которое реализовано как Web-приложение с целью пополнения базы данных экспертными мнениями и возможностью пополнения библиотеки нормативных документов.

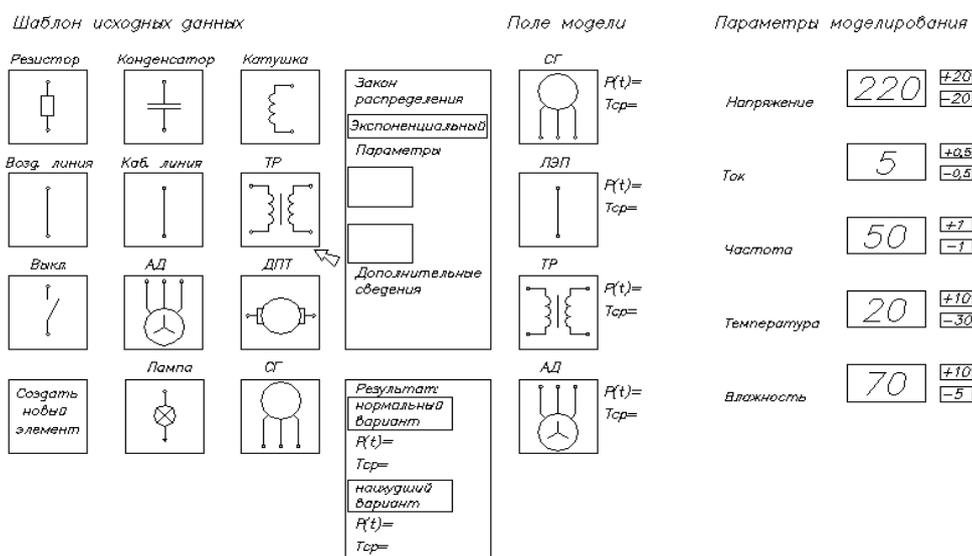


Рис. 4. Часть поля предварительного анализа влияющих факторов

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

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

Приведем некоторые положения библиотеки анализа влияющих факторов.

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

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

**Влияние несимметрии напряжения на работу электрооборудования.** При допустимых значениях несимметрии напряжения 2 % и несинусоидальности 5 % срок службы асинхронных двигателей сокращается на 21 %, синхронных – на 32 %; трансформаторов – на 8 %, конденсаторов – на 40 % [5].

**Влияние несинусоидальности напряжения.** При несинусоидальности напряжения наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей. При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С увеличением температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования.

**Влияние отклонения частоты в энергосистеме на работу электроприемников.** 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.

### Заключение

Практическое применение программного инструментария заключается в оптимизации технических решений по обеспечению требуемой надежности при проектировании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, электрических систем. Результаты исследования позволяют: анализировать и прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; разработать комплекс мероприятий по повышению надежности и эффективности функционирования электрооборудования.

### Литература

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. : ил.
3. Лубков, Н. В. Аналитические методы оценки надежности технических систем / Н. В. Лубков, А. С. Степанянц // Измерение, контроль, автоматизация. – 1979. – № 2 (18). – С. 45–53.

4. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / В. С. Богомолов [и др.] // Вестн. ВНИИЭ. – 1997. – № 1. – С. 25–32.
5. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – К. : Навук. думка, 2005. – 209 с.

*Получено 11.11.2014 г.*