

УДК 622.23.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Н. ГАЛУШКО*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель***Т. В. АЛФЕРОВА, А. А. АЛФЕРОВ***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Эксплуатация электрооборудования неизбежно сопряжена с постепенным его износом и, вследствие этого, с необходимостью его периодического ремонта. Для эффективного построения систем профилактических мероприятий, контроля, испытаний, диагностики, текущих и капитальных ремонтов необходимо знание причин отказов электрооборудования. Нарастающая доля оборудования, исчерпавшего свой нормативный ресурс работы, в совокупности с негативными внешними воздействиями (перегрузки, перенапряжения, короткие замыкания и т. д.), способствует росту отказов. Необходимость прогнозирования разрушения элементов, оценка риска эксплуатации в условиях неполноты и неопределенности информации о качестве и состоянии оборудования, является постоянно действующим фактором.

Основная часть

Наработка электрооборудования на отказ зависит от внешних и внутренних возмущающих факторов; природа первых не зависит от свойств электрооборудования, вторых – обусловлена его свойствами. Поэтому режим работы электрооборудования и его реакцию на этот режим необходимо оценивать статистически, т. е. одновременно учитывать случайное значение нагрузки и случайную реакцию оборудования на эту нагрузку. Одним из возможных способов реализации прогноза в условиях неопределенности исходной информации является вероятностный подход. 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 с 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 [1]–[3]. 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 любых элементов полагаются экспоненциальными [1]. Многочисленные исследователи указывают на актуальность определения устойчивых уровней наработки на отказ и повышения надежности электрооборудования, применения аналитических методов

оценки надежности технических систем [2], [3]. В этих условиях повышение надежности электрооборудования за счет применения современного аналитического и статистического инструментария представляется актуальной задачей исследования.

Целью работы является применение аналитического и статистического инструментария для определения основных показателей надежности электрооборудования и электрических систем с учетом изменяющихся условий эксплуатации. Изучение динамики закономерностей показателей надежности объектов во времени позволит с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы.

Можно выделить следующие основные задачи исследования:

- анализ значений показателей надежности объектов, а также динамики их изменения во времени;
- синтез систем по заданным критериям надежности;
- обеспечение и повышение надежности объектов.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, другие свойства или их сочетания. Аналитический и статистический инструментарий расчета показателей безотказности восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов приведен в [4].

В зависимости от информационной составляющей исследуемого объекта и возможности проведения статистических испытаний выполнены разные подходы по определению параметров надежности (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм определения показателей надежности объектов в зависимости от информационной базы данных

Структура программного инструментария включает в себя следующие элементы: шаблон исходных данных элементов исследуемого объекта и библиотеку реализованных элементов (bibl. elementov); шаблон данных параметров моделирования в виде номинальных величин и отклонений от них (parametr. modelirov); дерево возможных связей между элементами; шаблон влияния различных факторов в виде процедуры аналитической зависимости для каждого элемента системы между показателями надежности и параметрами моделирования.

Шаблон исходных данных элементов исследуемого объекта и библиотека реализованных элементов представляет собой созданную по результатам предшествующих испытаний базу данных элементов, из которой исследователь может выбирать нужный элемент для создания структуры объекта. В случае известных показателей надежности заполняется пустой шаблон элемента, в случае наличия в библиотеке базы нужного элемента – используется имеющийся. Создание библиотеки предполагало изучение имеющихся на данный момент исследований показателей надежности, например, представленных в [6], [7].

Шаблон данных параметров моделирования реализован в виде номинальных величин и отклонений от них в программах электрического моделирования (Multisim, MathCAD, Excel), как генератор сигнала с возможностью изменять его параметры в процессе моделирования.

Дерево возможных связей между элементами выполнено процедурами, основанными на аналитических зависимостях показателей надежности при различном включении (последовательное и параллельное) и преобразовании сигнала в зависимости от назначения элемента.

Шаблоны влияния различных факторов в виде аналитических зависимостей каждого элемента системы между показателями надежности и параметрами моделирования позволяют учитывать воздействие внешней информационной составляющей. В качестве такой информации может служить напряжение и величина его отклонения от номинального значения, сила тока, частота. Каждый из имеющихся модулей элементов использует только один или несколько существенно влияющих на него параметров, основанных на исследованиях влияния различных факторов на работоспособность электрического оборудования, представленных, например, в [8]. При учете влияния окружающей среды на работоспособность электрического оборудования существует дополнительное поле для учета температуры, влажности и других влияющих факторов.

В качестве одного из объектов исследований использовался многоканальный блок управления и защиты электродвигателей. Отказы элементов независимы с последовательной структурой, когда отказ одного из элементов приводит к отказу всего блока. Требовалось определить вероятность безотказной работы $P(t)$ и среднее время безотказной работы T_{cp} блока управления и защиты без учета и с учетом условий эксплуатации, применяя стандартную методику расчета [5]. Во втором случае произвести расчет показателей надежности для трех значений температуры внутри блока управления и защиты: $t_1^\circ = 40^\circ \text{C}$; $t_2^\circ = 50^\circ \text{C}$; $t_3^\circ = 60^\circ \text{C}$, считая, что все элементы его нагреты до указанных температур. Исходные данные приведены в табл. 1.

При проведении расчетов надежности без учета условий эксплуатации необходимо считать, что анализируемый блок управления и защиты (БУ и З) структурно является последовательным, отказы элементов независимы и отказ одного элемента приводит к отказу всего БУ и З в целом. В этом случае математическая модель отказов будет иметь экспоненциальный вид. Определяем интенсивность отказа λ_i каждого элемента при температуре окружающей среды 20°C и относительной влажности 50–70 %.

Интенсивность отказов БУ и З в целом определяется суммой интенсивностей отказов всех групп составляющих элементов:

$$\lambda_s = \sum (\lambda_{i1} - \lambda_{i14}) = 43,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Результирующая вероятность безотказной работы без учета условий эксплуатации определяется по формуле

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} = \exp(-43,5 \cdot 10^{-6} \cdot 5800) = 0,777.$$

Таблица 1

Элементы блока управления и защиты

Наименование элементов	Количество элементов
Трансформатор силовой	2
Штепсельный разъем	2
Контактор трехполюсный	3
Реле электромагнитное, три контактных группы	2
Реле пневматическое, две контактных группы	1
Конденсатор электролитический	2
Конденсатор слюдяной	5
Резистор металлопленочный	38
Резистор проволочный	2
Транзистор германиевый	16
Транзистор кремниевый	8
Диод кремниевый	4
Интегральная микросхема	6
Дроссель	3
Число часов работы	5800

Среднее время безотказной работы БУ и З (T_{cp}) без учета условий эксплуатации определяется по формуле

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{43,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}} = 23 \cdot 10^3 \text{ ч}.$$

Для увеличения вероятности безотказной работы рекомендуется либо заменить эти элементы более надежными (например, контактор заменить пускателем), либо зарезервировать их элементами с более большей вероятностью безотказной работы. Но на практике данные рекомендации выполнить не всегда является возможным.

При проведении уточненного расчета надежности с учетом условий эксплуатации необходимо учитывать воздействия внешней среды, в которой функционирует БУ и З (температура, влажность, давление, вибрация, запыленность и т. п.), а также особенности энергетического режима работы самого БУ и З (выделяемой элементами БУ и З тепловой энергии, величин электромагнитных нагрузок, механических напряжений и т. п.). Степень влияния различных факторов условий эксплуатации на показатели надежности различна. При приближенных расчетах учет влияния условий эксплуатации на надежность работы БУ и З производят путем введения следующих показателей:

- температуры поверхности элемента t° ;
- коэффициента внешних условий k_s , суммарно учитывающего остальные внешние условия эксплуатации;

– коэффициента нагрузки элемента k_n , представляющего отношение фактических значений нагрузки к номинальным.

Для достоверной количественной оценки коэффициента внешних условий k_3 требуется надлежащая организация сбора статистических данных о повреждаемости с развернутыми формами и актами, отражающими нарушения в работе данного электрооборудования. С помощью этих данных можно установить функциональную зависимость повреждаемости от внешних условий и режимов работы (климатических условий, частоты операций, качества применяемых материалов и т. д.).

На основе собранного и обработанного статистического материала об электрооборудовании определяются экономически обоснованные показатели надежности. Последние являются исходными данными для решения задач повышения надежности СЭС. В рамках проводимого исследования данный коэффициент k_3 статистически значимо не влиял на исследуемые результаты в рамках принятых диапазонов изменения влияющих величин.

Параметры электрических нагрузок для различных элементов БУ и З различны. Так, для резисторов параметром нагрузки является мощность рассеивания; для конденсаторов – рабочее напряжение; для полупроводниковых диодов – выпрямленный ток и обратное напряжение; для транзисторов – суммарная мощность рассеивания на переходах в непрерывном и импульсном режимах; для трансформаторов – мощность первичной обмотки; для дросселей – плотность тока в обмотках; для электрических машин – рабочая мощность; для пускателей, переключателей, штепсельных разъемов – ток, протекающий через контакты; для реле – ток через контакты и время нахождения обмотки под напряжением. Поэтому при расчете показателей надежности БУ и З с учетом условий эксплуатации следует различать коэффициент нагрузки по току $k_{нi} = I/I_n$, коэффициент нагрузки по напряжению $k_{нv} = U/U_n$ и коэффициент нагрузки по мощности $k_{нp} = P/P_n$.

Результирующее значение интенсивности отказов элементов БУ и З с учетом условий эксплуатации λ_{j3} можно определить по формуле

$$\lambda_{j3} = \lambda_i \cdot n_j \cdot a(t^\circ, k_n).$$

На рис. 2 приведены семейства кривых $a(t^\circ, k_{нv})$ для конденсаторов, трансформаторов, дросселей, штепсельных разъемов, магнитных пускателей, контакторов, мощных реле, металлопленочных резисторов, проволочных резисторов, кремниевых диодов, кремниевых транзисторов, интегральных микросхем и германиевых транзисторов.

Результирующая суммарная интенсивность отказов $\sum \lambda_{j3}$ и интенсивность отказов всего БУ и З с учетом условий эксплуатации $\lambda_{с3}$ определяется по формуле

$$\lambda_{с3} = k_3 \cdot \sum \lambda_{j3};$$

$$\text{для } 40^\circ\text{C: } \lambda_{с3}^{40^\circ\text{C}} = k_3 \cdot \sum (\lambda_{j31}^{40^\circ\text{C}} - \lambda_{j314}^{40^\circ\text{C}}) = 191 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{для } 50^\circ\text{C: } \lambda_{с3}^{50^\circ\text{C}} = k_3 \cdot \sum (\lambda_{j31}^{50^\circ\text{C}} - \lambda_{j314}^{50^\circ\text{C}}) = 285 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{для } 60^\circ\text{C: } \lambda_{с3}^{60^\circ\text{C}} = k_3 \cdot \sum (\lambda_{j31}^{60^\circ\text{C}} - \lambda_{j314}^{60^\circ\text{C}}) = 453 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

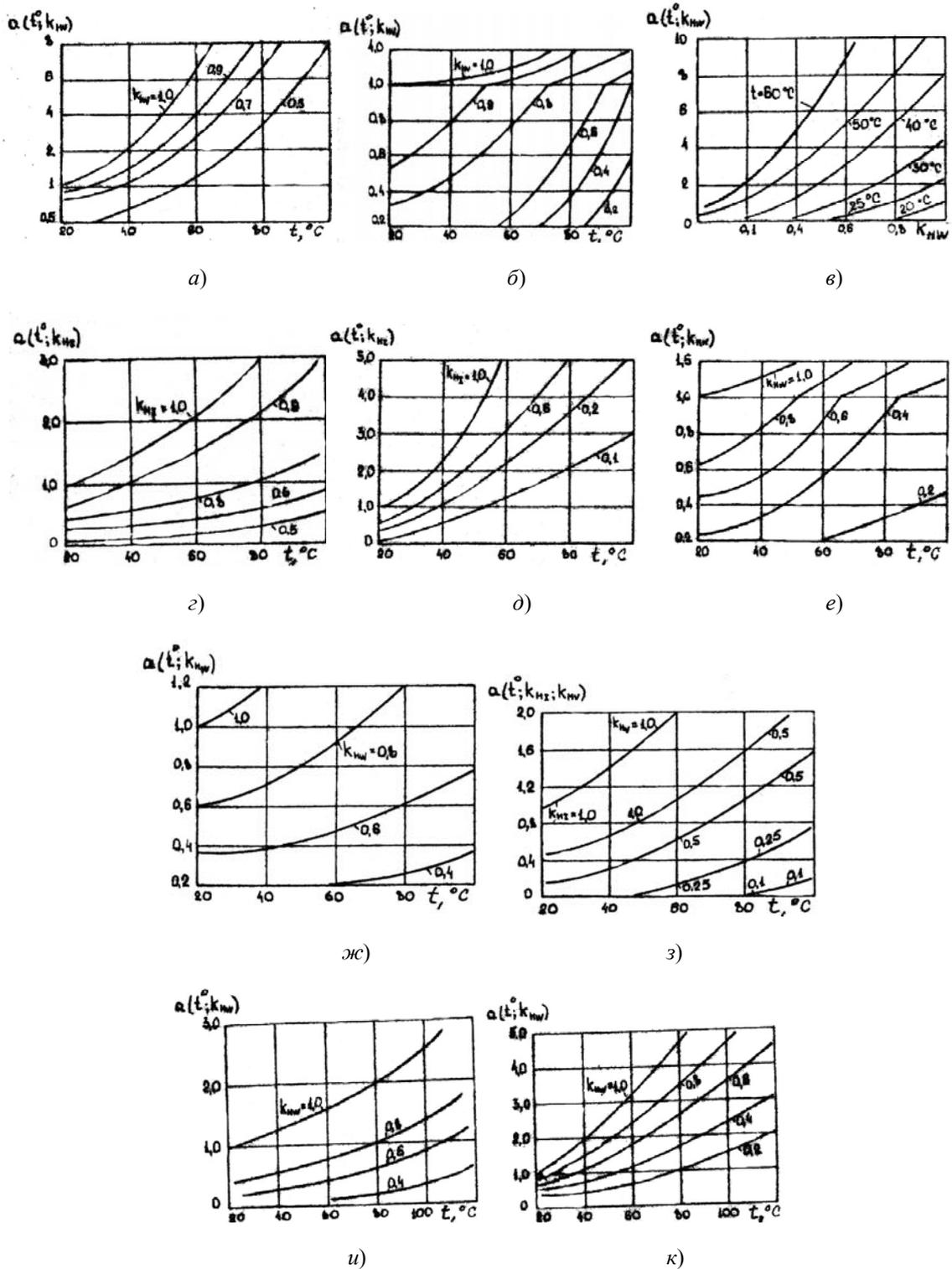


Рис. 2. Семейство кривых $a(t; k_{mv})$ для электролитических (а) и слюдяных (б) конденсаторов; трансформаторов и дросселей (в); штепсельных разъемов (г); магнитных пускателей, контакторов, мощных реле (д); металлопленочных резисторов (е); проволочных резисторов (ж); кремниевых диодов (з); кремниевых транзисторов (и); интегральных микросхем и германиевых транзисторов (к)

Рассчитываем результирующую вероятность безотказной работы $P_3(t)$ и среднее время безотказной работы для $T_{cp,3}$ БУ и З по формулам:

$$P_{\Sigma}(t) = \exp(-\lambda_{s3} \cdot t), \quad T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{s3}}.$$

$$\text{Для } 40^{\circ}\text{C: } P_{\Sigma}(t)^{40^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{40^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-191 \cdot 10^{-6} \cdot 5800) = 0,33;$$

$$T_{cp}^{40^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\lambda_{s3}^{40^{\circ}\text{C}}} = \frac{1}{191 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}} = 5236 \text{ ч};$$

$$\text{для } 50^{\circ}\text{C: } P_{\Sigma}(t)^{50^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{50^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-285 \cdot 10^{-6} \cdot 5800) = 0,191;$$

$$T_{cp}^{50^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\lambda_{s3}^{50^{\circ}\text{C}}} = \frac{1}{285 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}} = 3509 \text{ ч};$$

$$\text{для } 60^{\circ}\text{C: } P_{\Sigma}(t)^{60^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{60^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-453 \cdot 10^{-6} \cdot 5800) = 0,072;$$

$$T_{cp}^{60^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\lambda_{s3}^{60^{\circ}\text{C}}} = \frac{1}{453 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}} = 2208 \text{ ч}.$$

Заключение

Расчет надежности анализируемого блока управления и защиты с учетом условий эксплуатации показал, что результирующая вероятность безотказной работы всей системы уменьшается при увеличении температуры элементов и вследствие влияния условий окружающей среды. Для увеличения вероятности безотказной работы системы рекомендуется уменьшить влияние окружающей среды на элементы системы путем улучшения герметичности оболочек элементов и недопущения перегрева элементов за счет применения эффективных систем охлаждения.

Практическое применение результатов исследования заключается в создании обоснованных предпосылок определения основных показателей надежности электрических систем при воздействии различных факторов. Результаты исследования позволят: прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; оценить степень опасности и установить «узкие места» электрических систем; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования. Изучение закономерностей и динамики изменения показателей надежности объектов во времени позволит обеспечить обоснованную с точки зрения надежности продолжительность их работы.

Степень новизны результатов, которые затронуты в исследовании, характеризуется следующими положениями:

- при прогнозировании показателей надежности предложено применять аналитический и статистический аппарат вместе с современными программами моделирования электрооборудования, что позволит учитывать изменяющиеся условия эксплуатации;
- разработана структура постоянно пополняемой библиотеки факторов, влияющих на показатели надежности во время эксплуатации;
- реализовано математическое описание функционального состояния электрических систем по имеющейся информации, основанное на локализации источников, снижающих ее работоспособность.

Литература

1. Певзнер, Л. Д. Надежность горного электрооборудования и технических средств шахтной автоматики / Л. Д. Певзнер. – М. : Недра, 1983. – 198 с. : ил.

2. Лубков, Н. В. Аналитические методы оценки надежности технических систем / Н. В. Лубков, А. С. Степаняц // Измерения, контроль, автоматизация. – 1979. – № 2 (18). – С. 45–53.
3. Шевченко, Д. Н. Основы теории надежности : учеб.-метод. пособие для студентов техн. специальностей / Д. Н. Шевченко ; под ред. Л. А. Сосновского ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 250 с.
4. Половко, А. Н. Сборник задач по теории надежности / А. Н. Половко, И. М. Маликов. – М. : Сов. радио, 1972. – 408 с. : ил.
5. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / В. С. Богомолов [и др.] // Вестн. ВИИИЭ. – 1997. – С. 25–32.
6. Липштейн, Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
7. Шутенко, О. В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течение длительной эксплуатации / О. В. Шутенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХП», 2007. – № 4. – С. 26–30.
8. Исаев, И. П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / И. П. Исаев, А. П. Матвеевичев, Л. Г. Козлов. – М. : Транспорт, 1984. – 248 с.

Получено 13.12.2012 г.