

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДИАГНОСТИРУЕМОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Вишняков Е.П., Швайковский М.А., Ильин А.В., Рыбаков Д.В., Смирнов С.В.

ФГБВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,

e-mail: vka@mil.ru

В статье исследуется вопрос оценки влияния мероприятий по диагностированию электрооборудования на надежность функционирования системы электроснабжения. Одним из способов оценки является проведение анализа изменения значений комплексных показателей надежности. В качестве таких показателей используются коэффициент готовности (K_G) и коэффициент технического использования ($K_{ТИ}$). Для определения K_G и $K_{ТИ}$ использован метод вложенных цепей Маркова. Принято, что нахождение электрооборудования в работоспособном состоянии приносит определенный доход, поэтому качество его функционирования можно измерить средним удельным доходом. Для рассматриваемой модели функционирования электрооборудования предложена надежностная интерпретация среднего удельного дохода. Определены функциональные зависимости показателей надежности от периодов диагностирования электрооборудования и качества проведения работ по диагностическому контролю, с помощью которых можно определить числовые значения рассматриваемых показателей K_G и $K_{ТИ}$.

Ключевые слова: система электроснабжения, техническое диагностирование, электрооборудование, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, полумарковская модель

DETERMINATION OF PERFORMANCE RELIABILITY DIAGNOSED ELECTRICAL EQUIPMENT

Vishnyakov E.P., Shvaykovskiy M.A., Ilin A.V., Rybakov D.V., Smirnov S.V.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

In the article the question of assessing the impact of activities on the diagnosis of electrical equipment on the reliability of power system operation. One method of evaluation is to analyze the changes in the values of complex parameters of reliability. As such indicators used availability factor (K_G) and the technical utilization ratio ($K_{ТИ}$). To determine the K_G and $K_{ТИ}$ used method of embedded Markov chains. It is assumed that the presence of electrical equipment in working condition brings some income, so the quality of its functioning can be measured by the average specific income. For this model of electric operation offered reliability interpretation mean specific income. Defined functional dependence of reliability indicators of periods of diagnosing electrical equipment and quality of work of diagnostic tests by which you can determine the numerical values of the considered parameters $K_{ТИ}$ and K_G .

Keywords: power supply system, technical diagnostics, electrical equipment, availability factor, technical utilization rate, semi-Markov model

Одним из путей повышения надежности функционирования систем электроснабжения (СЭС) является широкое внедрение в процесс их эксплуатации средств и методов диагностирования электрооборудования (ЭО), позволяющих выявлять возникающие в нем дефекты на ранних стадиях их развития и оценивать техническое состояние оборудования в периодах между ремонтами, в том числе и без вывода его из эксплуатации. При этом возникает необходимость предварительной оценки влияния вводимых мероприятий по диагностированию ЭО на надежность функционирования системы электроснабжения в целом.

Одним из способов предварительной оценки влияния вводимых мероприятий по диагностированию электрооборудования на надежность функционирования СЭС является проведение анализа изменения значений комплексных показателей надежности. В качестве таких показателей можно использовать коэффициент готовности (K_G)

и коэффициент технического использования ($K_{ТИ}$).

Цель исследования

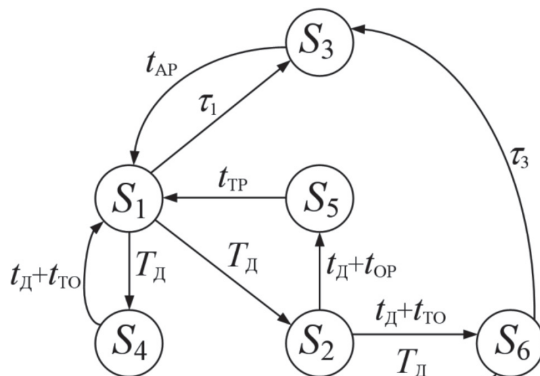
Определение функциональной зависимости выбранных показателей надежности от периодов диагностирования электрооборудования и качества проведения работ по диагностическому контролю.

Исходные предположения и допущения метода исследования

Для определения коэффициента готовности и коэффициента технического использования сложной системы, какой является СЭС, обычно учитывают только два крайних состояния системы – исправное и состояние отказа – и не анализируют процесс перехода из одного крайнего состояния в другое [5, 7]. В отличие от этой схемы, реальный процесс функционирования системы сопровождается постепенным накоплением нарушений, т.е. появлением дефектов.

В работе [2] построена полумарковская модель функционирования системы электроснабжения, которая в моменты времени, соответствующие смене состояний системы, является однородной цепью Маркова, вложенной в процесс $\eta(t)$. Разработанная модель включает в себя: ориентированный граф состояний и переходов электрооборудования, матрицу вероятностных переходов, а также формулы вероятности переходов из состояния S_i в состояние S_j . Схема смены состояний СЭС приведена в виде графа, изображенного на рисунке. На графе случайное время перехода из состояния в состояние обозначено греческой буквой τ , а детерминированное – латинскими буквами t или T .

Задачу отыскания коэффициента готовности (K_r) и коэффициента технического использования ($K_{ти}$) с помощью разработанной модели будем решать через определение средней доли времени пребывания процесса $\eta(t)$ в каждом из состояний S_i , $i = 1, 2, \dots, 6$. Напрямую из процесса $\eta(t)$ найти эти характеристики не представляется возможным, поэтому для их определения будет использован метод вложенных цепей Маркова [8].



Ориентированный граф смены состояний СЭС в процессе его эксплуатации, где S_1 – СЭС находится в состоянии исправной работы; S_2 – ЭО диагностируется, находясь в неисправном состоянии; S_3 – СЭС отказала, проводится аварийный ремонт; S_4 – ЭО диагностируется, находясь в исправном состоянии; S_5 – в СЭС проводится текущий ремонт; S_6 – СЭС работает при наличии дефекта

Разработка модели

Практика показывает, что ЭО эксплуатируется в течение времени, значительно превосходящего период T_d его диагностирования. При таком условии формально можно рассматривать процесс его функ-

ционирования на бесконечном интервале времени. Будем считать, что нахождение ЭО в работоспособном состоянии приносит определенный доход, в этом случае качество функционирования оборудования можно измерить средним удельным доходом, который согласно [3], будет равен

$$g(T_d) = \lim_{t \rightarrow \infty} P \{ \eta(t) \in S_j / \eta_0 = S_i \} = \sum_{i=1}^6 \pi_i(T_d) \omega_i(T_d) / \sum_{i=1}^6 \pi_i(T_d) \nu_i(T_d), \quad (1)$$

где $g(T_d)$ – относительная доля времени, которую процесс находится в состояниях множества S_j ;

$S_j = \{S_i, i \in J\}$ – множество состояний процесса, приносящих доход от эксплуатации ЭО; η_0 – состояние процесса $\eta(t)$ в момент времени $t = 0$;

$\pi_i(T_d)$ – финальные вероятности цепи $\{\eta(t)\}$; $\omega_i(T_d)$ – средний доход (полезное время) для i -го состояния;

$\nu_i(T_d)$ – усредненное математическое ожидание (МО) длительности одного шага процесса $\eta(t)$, состоящего в переходе из S_i в какое-то новое состояние S_j , $j = 1, 2, \dots, 6$.

Для вычисления величины среднего удельного дохода получим выражения для характеристик $\nu_i(T_d)$ и $\omega_i(T_d)$.

Введем понятия, необходимые для определения $\nu_i(T_d)$. Переходным интервалом (переходом) $\tau(S_i, S_j)$ будем называть промежуток времени между моментом попадания ЭО в состояние S_i и моментом попадания в S_j при следующем переходе [6]. Тогда, усредняя математическое ожидание длительности перехода из S_i в S_j по всем возможным переходам, получим

$$\nu_i(T_d) = \sum_{j=1}^6 p_{ij}(T_d) \mu_{ij}, \quad (2)$$

где $\mu_{ij} = M[\tau(S_i, S_j)]$ – МО длительности одного шага процесса, начинающегося в S_i и заканчивающегося в S_j ;

$p_{ij}(T_d)$ – вероятность перехода из S_i в S_j за один шаг.

Математическое ожидание μ_{ij} определяется выражением

$$\mu_{ij} = \int_0^{T_d} t dF_{ij}(t), \quad (3)$$

где $F_{ij}(T_d)$ – функция распределения (ФР) длительности пребывания полумарковского процесса в состоянии S_i при условии последующего перехода в состояние S_j .

Подставив формулу (3) в выражение (2), получим

$$\nu_i(T_d) = \sum_{j=1}^6 p_{ij}(T_d) \int_0^{T_d} t dF_{ij}(t). \quad (4)$$

Перейдем к определению $\omega_i(T_d)$ и ФР, входящих в $v_i(T_d)$. Если в момент времени t ЭО находится в состоянии S_1 и на интервале $(t, t + T_d)$ не произойдет отказа, то оно все время T_d будет находиться в состоянии S_1 . Если же произойдет отказ, то в состоянии S_1 ЭО в среднем находится время t_1 , где t_1 – МО времени, в течение которого не произошел отказ. Тогда согласно определению дохода и функции $F_1(t)$ получаем

$$\omega_1(T_d) = t_1 + (1 - F_1(T_d))T_d. \quad (5)$$

Аналогично

$$\omega_6(T_d) = t_3 + (1 - F_3(T_d))T_d, \quad (6)$$

где t_3 – МО времени, в течение которого не произойдет отказ ЭО с дефектом. Для выбранного правила диагностирования ЭО по определению дохода и множества S_j имеем:

$$\omega_i(T_d) = 0, \quad i = 2, 3, 4, 5. \quad (7)$$

Так как рассматривается функционирование ЭО за один период T_d , то

$$t_i = \int_0^{T_d} t dF_i(t), \quad i = 1, 3. \quad (8)$$

Формулы (5), (6) с учетом (8) принимают вид

$$\begin{aligned} \omega_1(T_d) &= \int_0^{T_d} (1 - F_1(t)) dt, \\ \omega_6(T_d) &= \int_0^{T_d} (1 - F_3(t)) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Отнесем понятие усредненной длительности перехода ЭО из состояния S_i за период времени T_d к номеру состояния i . Определим время пребывания в состоянии S_i до перехода в следующее состояние S_j как случайную величину t с ФР $F_{ij}(t)$. Для удобства можно говорить, что ЭО находится в состоянии S_i , готовясь перейти в S_j . Будущее состояние процесса и переходный интервал определяются совместно с помощью двумерного распределения [1]:

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} F_{ij}(t), \quad (10)$$

где $Q_{ij}(t)$ выражает вероятность того, что при исходном состоянии S_i процесс перейдет за один шаг в состояние S_j , время пребывания процесса в S_i не превзойдет величины t , т.е.

$$\begin{aligned} F_{ij}(t) &= P\{\tau(S_i, S_j) < t\}, \\ F_{ij}(0) &= 0, F_{ij}(T_d) = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Введем в соответствии с (10) и (11) ФР длительности пребывания процесса в состоянии S_i при условии его перехода в S_j на интервале времени от t до $t + T_d$. Выражения для определения данных ФР имеют вид

$$F_{13}(t) = \begin{cases} \frac{F_1(t)}{F_1(T_d)}, & t < T_d, \\ 1, & t \geq T_d, \end{cases} \quad (12)$$

$$F_{63}(t) = \begin{cases} \frac{F_3(t)}{F_3(T_d)}, & t < T_d, \\ 1, & t \geq T_d. \end{cases} \quad (13)$$

Так как переходы $S_1 \rightarrow S_2$, $S_1 \rightarrow S_4$, $S_6 \rightarrow S_2$ всегда происходят за постоянное время, равное периоду T_d диагностирования, то $F_{ij}(t)$ для этих состояний можно записать [1]:

$$F_{12}(t) = F_{14}(t) = F_{62}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_d, \\ 1, & t \geq T_d. \end{cases} \quad (14)$$

Точно так же введем ФР:

$$F_{12}(t) = F_{14}(t) = F_{62}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_d, \\ 1, & t \geq T_d. \end{cases} \quad (15)$$

$$F_{41}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_d + t_{то}, \\ 1, & t \geq t_d + t_{то}, \end{cases} \quad (16)$$

$$F_{25}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_d + t_{оп}, \\ 1, & t \geq t_d + t_{оп}, \end{cases} \quad (17)$$

$$F_{51}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{тр}, \\ 1, & t \geq t_{тр}. \end{cases} \quad (18)$$

Подставляя в (4) вероятности $p_{ij}(T_d)$ [3] и используя ФР (12), (13) для $i = 1$, получаем

$$\begin{aligned} v_i &= F_1(T_d) \int_0^{T_d} \frac{t dF_1(t)}{F_1(T_d)} + (1 - F_1(T_d)) F_2(T_d) T_d + \\ &+ (1 - F_1(T_d))(1 - F_2(T_d)) T_d. \end{aligned} \quad (19)$$

После преобразований (19) принимает вид

$$v_1 = F_1(T_d) \int_0^{T_d} [1 - F_1(T_d)] dt. \quad (20)$$

Аналогично находим

$$v_6 = F_1(T_d) \int_0^{T_d} [1 - F_3(T_d)] dt. \quad (21)$$

Остальные усредненные длительности переходов легко определяются из формул (14)–(18) и (4) для $i = 2, 3, 4, 5$:

$$v_2 = \alpha(t_d + t_{то}) + (1 - \alpha)(t_d + t_{оп}), \quad (22)$$

$$v_3 = t_{оп}, \quad (23)$$

$$v_4 = t_d + t_{то}, \quad (24)$$

$$v_5 = t_{тр}. \quad (25)$$

Теперь дадим надежностную интерпретацию среднего удельного дохода применительно к рассматриваемой нами модели функционирования ЭО. Так как под доходом (полезным временем) на рассматриваемом переходе мы условились понимать среднее время нахождения ЭО в работоспособном состоянии, поэтому обозначим через $\omega_i(T_d)$ получаемый средний доход для состояния S_i за время T_d . Зависимость $g(T_d)$ в формуле (1) от периода диагностирования T_d указывает на то, что рассматривается восстанавливаемое электрооборудование. При этом в зависимости от его назначения, принятого порядка его диагностирования и технического обслуживания выражение для $g(T_d)$ может быть различным при одном и том же множестве состояний. Это связано с возможностью различного определения величины среднего дохода $\omega_i(T_d)$ для состояния S_i , а также с определением множества состояний ЭО, которые приносят доход. Для определения $g(T_d)$ важно также решить вопрос о порядке проведения диагностирования. Если ЭО диагностируется при его использовании по назначению, т. е. контроль при отсутствии отказа ведется параллельно с его работой, то время, в течение которого выполняется диагностирование, можно отнести в доход. Такое решение является правильным, так как здесь средний удельный доход отождествляется с надежностной характеристикой ЭО, а не с ее стоимостной единицей. Если же при выполнении диагностирования и при отсутствии отказа ЭО не используется, т. е. выводится из работы для проведения диагностических мероприятий, то время диагностирования в доход не включается.

Рассмотрим случай, когда ЭО с дефектом приносит доход до тех пор, пока не откажет, т. е. будем учитывать лишь его предрасположенность к отказам без учета снижения качества его функционирования. Перерывы в работе ЭО допускаются лишь при выполнении диагностирования и профилактических работ.

Пусть S_j – множество работоспособных состояний ЭО, приносящих доход. Тогда для рассматриваемого нами случая $S_j = \{S_1, S_6\}$, так как доход будет приносить нахождение ЭО в исправном состоянии и в состоянии работы с дефектом. Формула (1) для модели, представленной на рисунке, принимает вид

$$g(T_d) = \frac{\pi_1(T_d)\omega_1(T_d) + \pi_6(T_d)\omega_6(T_d)}{\sum_{i=1}^6 \pi_i(T_d)v_i(T_d)}. \quad (26)$$

В соответствии с принятыми определениями $g(T_d)$ выражает отношение МО времени пребывания ЭО в работоспособном состоянии за рассматриваемый период эксплуатации T_d к сумме МО времени пребывания ее в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных проведением диагностирования, и временем ремонтов за тот же период. Согласно [4] $g(T_d)$ есть коэффициент технического использования ($K_{\text{ТИ}}$) следовательно выражение (26) можно представить в виде

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{\pi_1(T_d)\omega_1(T_d) + \pi_6(T_d)\omega_6(T_d)}{\sum_{i=1}^6 \pi_i(T_d)v_i(T_d)}. \quad (27)$$

Перейдем к установлению зависимости $K_{\Gamma}(T_d)$. Выразим $K_{\Gamma}(T_d)$ через $K_{\text{ТИ}}$. Обозначим

$$\tilde{T} = t_p + t_d + t_b, \quad (28)$$

где t_p, t_d, t_b – МО времени нахождения ЭО на интервале времени $\tilde{T}$ соответственно в состояниях работоспособности, диагностирования и восстановления. Тогда согласно [4]:

$$K_{\Gamma} = \frac{t_p}{t_p + t_b}, \quad (29)$$

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{t_p}{t_p + t_d + t_b}. \quad (30)$$

Решая совместно (29) и (30), получим

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\text{ТИ}}(t_p + t_d + t_b)}{t_p + t_b}. \quad (31)$$

Элементарными преобразованиями приводим (31) к виду

$$K_{\Gamma} = K_{\text{ТИ}} \frac{1}{1 - \frac{t_d}{t_p + t_d + t_b}}, \quad (32)$$

где слагаемое $\frac{t_d}{t_p + t_d + t_b}$ выражает долю времени, которую процесс находится в состоянии диагностирования. Тогда, повторяя рассуждения, проведенные выше, для состояния диагностирования ЭО и используя формулы (27), (32), получим

$$K_{\Gamma} = \frac{\pi_1(T_d)\omega_1(T_d) + \pi_6(T_d)\omega_6(T_d)}{\pi_1(T_d)v_1(T_d) + \pi_3(T_d)v_3(T_d) + \pi_5(T_d)v_5(T_d) + \pi_6(T_d)v_6(T_d)}. \quad (33)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Определены функциональные зависимости показателей надежности от периодов диагностирования электрооборудования и качества проведения работ по диагностическому контролю. С помощью выражений (27) и (33) можно определить числовые значения рассматриваемых показателей K_{Γ} и $K_{\text{ти}}$. Адекватность полученной модели подтверждается использованием апробированного математического аппарата.

Выводы

Эффективность использования средств диагностирования электрооборудования в процессе эксплуатации СЭС можно оценить, сравнив значения показателей надежности СЭС при действующей стратегии технического обслуживания и ремонта со значениями показателей надежности при введении постоянного (периодического) диагностирования ЭО. В случае повышения показателей надежности и выполнения экономического критерия можно принять положительное решение о целесообразности использования диагностического контроля.

Список литературы

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер. с англ. / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Сов. радио, 1969. – 488 с.
2. Вишняков Е.П., Авсеенко А.И., Шуневич Н.А. Модель функционирования системы электроснабжения сложных объектов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2. – Режим доступа: www.science-education.ru/ru/article/view?id=23009.
3. Герцбах И.Б. Модели профилактики. Теоретические основы планирования профилактических работ. – М.: Сов. радио, 1969. – 216 с.

4. ГОСТ Р 27.002 – 2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 27 с.

5. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.

6. Джевэлл В. Управляемые полумарковские процессы. В кн.: Кибернетический сб. Новая серия. Пер. с англ. / Под ред. А.А. Ляпунова и О.Б. Лупанова. – М.: Мир. – 1967. – Вып. 4. – С. 97–137.

7. Калявин В.П., Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок: Учебное пособие. / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2000. – 348 с.

8. Кениг Д., Штойян Д. Методы теории массового обслуживания. Пер. с нем. / Под ред. Г.П. Климова, – М.: Радио и связь, 1981. – 128 с.

References

1. Barlou R., Proshan F. Matematicheskaja teorija nadezhnosti. Per. s angl. / Pod red. B.V. Gnedenko. M.: Sov. radio, 1969. 488 p.
2. Vishnjakov E.P., Avseenko A.I., Shunevich N.A. Model funkcionirovaniya sistemy jelektrosnabzhenija slozhnyh obektov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. no. 2–2. Rezhim dostupa: www.science-education.ru/ru/article/view?id=23009.
3. Gercbah I.B. Modeli profilaktiki. Teoreticheskie osnovy planirovaniya profilak-ticheskikh rabot. M.: Sov. radio, 1969. 216 p.
4. GOST R 27.002 2009. Nadezhnost v tehnike. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. Moskva: Standartinform, 2011. 27 p.
5. Guk Ju.B. Analiz nadezhnosti jelektrojenergeticheskikh ustanovok. L.: Jenergoatomizdat, 1989. 224 p.
6. Dzhevell B. Upravljaemye polumarkovskie processy. V kn.: Kiberneticheskij sb. Novaja serija. Per. s angl. / Pod red. A.A. Ljapunova i O.B. Lupanova. M.: Mir. 1967. Vyp. 4. pp. 97–137.
7. Kaljavin V.P., Rybakov L.M. Nadezhnost i diagnostika jelektroustanovok: Uchebnoe po-sobie. / Mar. gos. un-t. Joshkar-Ola, 2000. 348 p.
8. Kenig D., Shtojjan D. Metody teorii massovogo obsluzhivaniya. Per. s nem. / Pod red. G.P. Klimova, M.: Radio i svjaz, 1981. 128 p.