

В. В. КАРАГОДИН, Е. П. ВИШНЯКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРИОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Рассматривается задача диагностирования электрооборудования систем электроснабжения. Приведена методика определения оптимального периода диагностирования. Предложенный подход может быть использован в процессе эксплуатации систем электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения, надежность, техническое состояние, дефект, период диагностирования.

Введение. Надежность современных систем производства и распределения электроэнергии в значительной мере определяется безотказностью работы электроустановок. В настоящее время более 50 % основного силового оборудования выработало свой ресурс. Вследствие этих обстоятельств повышается актуальность задач технической диагностики электрооборудования, являющейся основным методом поддержания работоспособности и безава-

рийности оборудования систем электроснабжения. Появление скрытых дефектов, которые возникают в результате естественного старения и работы электрооборудования при нерасчетных эксплуатационных воздействиях, ведет к отказу этого оборудования.

Под дефектом будем понимать такое отклонение технического состояния электрооборудования от нормы, которое со временем может привести к его отказу [1, 2]. Введение периодического диагностирования электрооборудования позволяет выявить скрытые дефекты и тем самым уменьшить вероятность выхода его из строя.

Постановка задачи. В системе диагностирования предусматриваются методы выявления дефектов при включенном и отключенном оборудовании. При этом применяемые методы должны обеспечивать выявление дефектов на ранних стадиях при минимальных трудозатратах. Определение периодичности диагностирования является не менее важной задачей, чем выбор метода диагностирования.

В настоящей статье рассматривается способ определения оптимального периода диагностирования, проводимого на отключенном электрооборудовании, т. е. при выводе его из работы.

Для оценки эффективности диагностического контроля оборудования системы электроснабжения воспользуемся коэффициентом простоя K_{Π} [3, 4]:

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\text{т.и}},$$

где $K_{\text{т.и}}$ — коэффициент технического использования.

Считая, что появление скрытого дефекта равносильно отказу электрооборудования, коэффициент простоя можно определить следующим образом:

$$K_{\Pi} = \frac{T_{\Pi} + T_{\text{д}}}{t_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где T_{Π} — время простоя при ремонте и плановом техническом обслуживании; $T_{\text{д}}$ — время работы электрооборудования при наличии дефекта; t_{Σ} — время работы системы.

Коэффициент простоя характеризует часть времени, в течение которого система находится в неисправном состоянии относительно общего времени эксплуатации.

Очевидно, для каждой эксплуатируемой системы следует определить оптимальный период контроля, при котором значение коэффициента простоя будет наименьшим.

Методика определения оптимального периода диагностирования. Для определения оптимального периода диагностирования рассмотрим зависимость коэффициента K_{Π} от параметров системы и характеристик ее эксплуатации. Для этого найдем зависимости величин T_{Π} и $T_{\text{д}}$, входящих в выражение (1), от этих параметров.

Примем следующие допущения:

- интенсивность отказов системы на рассматриваемом временном интервале равна Λ [4];
- период контроля постоянный;
- система диагностирования абсолютно надежна и обеспечивает абсолютную достоверность проверки;
- во время диагностирования, технического обслуживания и ремонта отказы в системе не возникают;
- среднее время ремонта и технического обслуживания конечно.

Время простоя определяется выражением

$$T_{\Pi} = T_{\text{р}} + T_{\text{ТО}} + T_{\text{к}} = n\tau_{\text{р}} + m\tau_{\text{ТО}} + N\tau_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{р}}$ — время ремонта; $T_{\text{к}}$ — время (период) контроля; $T_{\text{ТО}}$ — время технического обслуживания (ТО); n — среднее количество отказов в течение рассматриваемого интервала

времени; τ_p — среднее время ремонта системы; m — среднее количество технических обслуживаний; $\tau_{ТО}$ — среднее время технического обслуживания; N — число циклов контроля, характеризующее частоту проверки системы; τ_k — продолжительность контроля.

Учитывая, что

$$n = \lceil \Lambda(t_\Sigma - T_{II}) \rceil; \quad (3)$$

$$m = \lceil M(t_\Sigma - T_{II}) \rceil, \quad (4)$$

где $\lceil \cdot \rceil$ — наибольшее целое число, не превосходящее значения, указанного в скобках; M — интенсивность проведения ТО, из выражения (2) получаем

$$T_{II} = \frac{N\tau_k + \Lambda\tau_p t_\Sigma + M\tau_{ТО} t_\Sigma}{1 + \Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}}. \quad (5)$$

Так как число циклов контроля определяется выражением

$$N = \left\lceil \frac{t_\Sigma - T_{II}}{T_k} \right\rceil, \quad (6)$$

то, используя формулу (5), получаем

$$N = \left\lceil \frac{t_\Sigma}{T_k(1 + \Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}) + \tau_k} \right\rceil. \quad (7)$$

Подставив это значение N в уравнение (5), получим

$$T_{II} = t_\Sigma \left\{ \frac{\Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}}{1 + \Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}} + \frac{\tau_k}{(1 + \Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}) \left[T_k(1 + \Lambda\tau_p + M\tau_{ТО}) + \tau_k \right]} \right\}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что время простоя T_{II} зависит как от параметров самой системы (Λ), так и от параметров ее эксплуатации ($\tau_{ТО}$, τ_p , N , τ_k).

Для определения времени T_d необходимо найти среднее время \bar{t}_d работы электрооборудования при наличии дефекта в течение одного периода контроля (рис. 1).

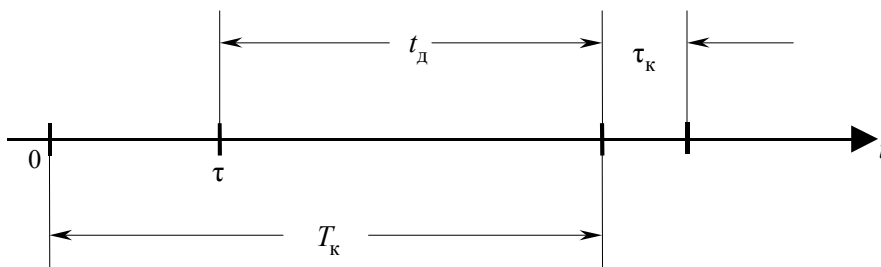


Рис. 1

Вероятность возникновения хотя бы одного дефекта определяется как

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda_d t},$$

где λ_d — интенсивность появления дефектов.

Если трактовать момент времени, при котором возникает первый дефект, как случайную величину τ , то вероятность определяется выражением

$$P(\tau \leq t) = q(t),$$

а плотность вероятности случайной величины — выражением

$$f(\tau) = \frac{dq(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda_d \tau}. \quad (9)$$

Тогда

$$\bar{t}_d = T_k - m_1(\tau), \quad (10)$$

где m_1 — математическое ожидание времени появления первого дефекта.

Величина $m_1(\tau)$ может быть как больше, так и меньше длительности периода контроля T_k . Тогда выражение (10) примет вид

$$\bar{t}_d = T_k \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau - \int_0^{T_k} \tau f(\tau) d\tau - T_k \int_{T_k}^{\infty} f(\tau) d\tau = T_k \int_0^{T_k} f(\tau) d\tau - \int_0^{T_k} \tau f(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Подставляя в формулу (11) значение плотности вероятности из выражения (9), получаем

$$\begin{aligned} \bar{t}_d &= T_k \int_0^{T_k} \lambda e^{-\lambda_d \tau} d\tau - \int_0^{T_k} \tau \lambda e^{-\lambda_d \tau} d\tau = T_k (1 - e^{-\lambda_d T_k}) + T_k e^{-\lambda_d T_k} - \frac{1}{\lambda_d} (1 - e^{-\lambda_d T_k}) = \\ &= T_k - \frac{1}{\lambda_d} (1 - e^{-\lambda_d T_k}). \end{aligned} \quad (12)$$

Время работы оборудования при наличии дефекта за время t_Σ работы системы находим из уравнения

$$T_d = N \bar{t}_d.$$

Учитывая выражения (7) и (12), величину T_d можно представить следующим образом:

$$T_d = \frac{T_k - \frac{1}{\lambda_d} (1 - e^{-\lambda_d T_k})}{T_k (1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}) + \tau_k} t_\Sigma, \quad (13)$$

т.е. время T_d функционирования оборудования при наличии дефекта зависит от продолжительности периода контроля T_k и интенсивности λ_d возникновения определенного вида скрытого дефекта: $T_d = f(\lambda_d, T_k)$.

Подставив выражения (8) и (13) в уравнение (1), получим формулу для коэффициента простоя:

$$\begin{aligned} K_{\text{п}} &= \frac{\Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}}{1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}} + \frac{\tau_k}{(1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}) [T_k (1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}) + \tau_k]} + \\ &+ \frac{T_k - \frac{1}{\lambda_d} (1 - e^{-\lambda_d T_k})}{T_k (1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}) + \tau_k}, \end{aligned} \quad (14)$$

т.е. коэффициент простоя в рассматриваемом случае есть функция

$$K_{\text{п}} = f(\Lambda, \lambda_d, \tau_{ТО}, \tau_p, \tau_k, T_k).$$

Можно предположить, что коэффициент простоя $K_{\text{п}}$, являясь функцией, зависящей от периода контроля T_k , имеет оптимум, так как при частой проверке системы увеличивается время $T_{\text{п}}$, а при выявлении дефекта уменьшается время T_d .

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента простоя от периода контроля $K_{\text{п}} = f(T_{\text{к}})$ для разных значений $\lambda_{\text{д}}$. Характер кривых показывает наличие явно выраженного минимума коэффициента простоя от периода контроля.

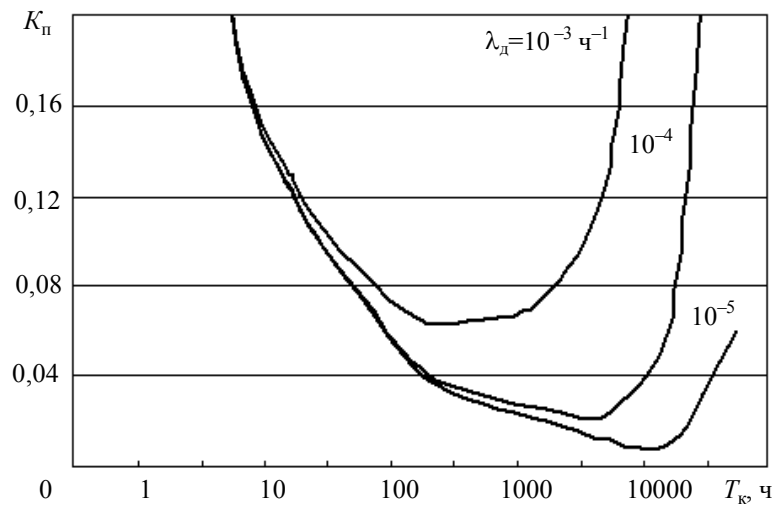


Рис. 2

Оптимальное значение периода контроля, при котором $K_{\text{п}} = K_{\text{п.мин}}$, найдем из условия

$$\frac{\partial K_{\text{п}}}{\partial T_{\text{к}}} = 0. \quad (15)$$

Частная производная выражения (15) имеет вид

$$\frac{\partial K_{\text{п}}}{\partial T_{\text{к}}} = \frac{(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}})^2 (1 - e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}}) [T_{\text{к}}(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) + \tau_{\text{к}}]}{(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}})^2 [T_{\text{к}}(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) + \tau_{\text{к}}]^2} - \frac{(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}})^2 \left\{ \tau_{\text{к}} + (1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) [T_{\text{к}} - \lambda_{\text{д}}^{-1} (1 - e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}})] \right\}}{(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}})^2 [T_{\text{к}}(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) + \tau_{\text{к}}]^2}. \quad (16)$$

Так как знаменатель в выражении (16) конечен, то производная $\frac{\partial K_{\text{п}}}{\partial T_{\text{к}}}$ может равняться нулю только при условии

$$(1 - e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}}) [T_{\text{к}}(1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) + \tau_{\text{к}}] - \tau_{\text{к}} - (1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}) \left[T_{\text{к}} - \frac{1}{\lambda_{\text{д}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}}) \right] = 0. \quad (17)$$

В результате преобразований получим

$$\lambda_{\text{д}} T_{\text{к}} e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}} + e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}} + \frac{\lambda_{\text{д}} \tau_{\text{к}}}{1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}} e^{-\lambda_{\text{д}}T_{\text{к}}} - 1 = 0. \quad (18)$$

Пусть $x = \lambda_{\text{д}} T_{\text{к.опт}}$, $a = \frac{\lambda_{\text{д}} \tau_{\text{к}}}{1 + \Lambda\tau_{\text{р}} + M\tau_{\text{ТО}}}$, где $T_{\text{к.опт}}$ — оптимальный период диагностирования. Тогда выражение (18) примет следующий вид:

$$x e^{-x} + e^{-x} + a e^{-x} - 1 = 0. \quad (19)$$

Поделим обе части уравнения (19) на e^{-x} , затем разложим e^x в ряд Маклорена, и, ограничившись тремя первыми членами разложения, получим уравнение для последующего определения значения $T_{\text{к.опт}}$:

$$\frac{1}{2}x^2 \approx a. \quad (20)$$

Положительный корень уравнения (20) $x \approx \sqrt{2a}$.

После обратной подстановки $x = \lambda_d T_{к.опт}$, $a = \frac{\lambda_d \tau_k}{1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}}$ в выражение (20) нахо-

дим

$$T_{к.опт} = \sqrt{\frac{2\tau_k}{1 + \Lambda \tau_p + M \tau_{ТО}} \frac{1}{\lambda_d}}. \quad (21)$$

С учетом сделанных при постановке задачи допущений о том, что во время технического обслуживания и ремонта не возникает отказов, выражение (21) принимает окончательный вид:

$$T_{к.опт} \approx \sqrt{\frac{2\tau_k}{\lambda_d}},$$

откуда следует, что чем больше продолжительность контроля, тем больше должен быть и период контроля, и чем чаще появляются скрытые отказы, тем чаще следует проводить диагностирование.

Заключение. На практике дефекты электрооборудования, которые могут быть определены средствами диагностирования, часто не выявляются своевременно вследствие неправильно выбранной периодичности его проведения. Применение диагностирования с оптимальной периодичностью позволит уменьшить суммарную продолжительность вынужденных простоев и повысить коэффициент готовности систем электроснабжения, при этом существенно сократится количество аварийных отказов оборудования, причинами возникновения которых являются скрытые дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1979.
2. Левин В. М. Оценка эффективности обслуживания электрических сетей по фактическому состоянию // Методы и средства оценки технического состояния энергетического оборудования / Под ред. А. И. Таджибаева. СПб.: Петербург. энергетический ин-т повышения квалификации, 2006. Вып. 30. 444 с.
3. Вигман Г. Л. Определение оптимального периода контроля для информационных систем длительного действия // Вопр. радиоэлектроники. 1964. Вып. 21. С. 72—78.
4. Вигман Г. Л. Определение оптимального периода контроля сложной радиоэлектронной аппаратуры // Там же. 1965. Вып. 11. С. 16—26.
5. Венцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

Сведения об авторах

- Владимир Викторович Карагодин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электроснабжения наземных комплексов, Санкт-Петербург; профессор
- Евгений Павлович Вишняков** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электроснабжения наземных комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: vishnya-494@mail.ru

Рекомендована кафедрой электроснабжения наземных комплексов

Поступила в редакцию 24.04.09 г.