

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ГРАНИЦЕ ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Саушев А.В., Шошмин В.А.,

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций

Рассматривается метод контроля состояния электротехнических систем транспортных средств, основанный на информации о границе области работоспособности. Метод обеспечивает высокую достоверность контроля и позволяет решать задачу оценки состояния системы и задачу определения запаса ее работоспособности.

Ключевые слова: электротехнические системы, электротехнические устройства, контроль работоспособности, запас работоспособности.

Введение. Основу повышения эффективности процесса эксплуатации электротехнических систем (ЭТС) транспортных средств составляет переход к проведению технического обслуживания и ремонтов по фактическому уровню их технического состояния. Для определения уровня технического состояния ЭТС в различные моменты времени используют методы диагностирования. В докладе рассматривается метод определения состояния электротехнических транспортных систем, основу которого составляет информация о границе области работоспособности. При этом обеспечивается высокая точность идентификации состояния системы и решается задача определения ее запаса работоспособности.

Актуальность исследований. Возрастающая сложность ЭТС, изменчивые условия эксплуатации транспортных средств обуславливают необходимость регулярного контроля и прогнозирования состояния этих систем. Особую актуальность при этом приобретает разработка методов и технических средств, обеспечивающие высокую достоверность полученных результатов, которая в значительной степени определяется точностью аппроксимации области работоспособности системы. В докладе рассматривается один из возможных подходов к решению задачи, предполагающий высокоточное задание области работоспособности на основе использования логических R-функций.

Постановка задачи. Под ЭТС будем понимать упорядоченную совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих электротехнических устройств (ЭТУ), образующих единое функциональное целое, предназначенное для решения определенной задачи. Любое ЭТУ с системных позиций также состоит из совокупности связанных между собой элементов. Отдельные элементы – это части или компоненты ЭТУ, предназначенные для выполнения определенных функций и не подлежащие дальнейшему разбиению на части. К таким элементам можно отнести резисторы, конденсаторы, индуктивности, микросхемы и т.п. Такими

елементами могут быть усилители, преобразователи, фильтры, корректирующие устройства, которые, в свою очередь, являются элементами ЭТС.

Состояние ЭТС в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором или вектором параметров. К их числу относятся: *входные параметры* $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_e)$, характеризующие задающие воздействия $\mathbf{u}(t)$ и наблюдаемые на входах ЭТС; *параметры внешних условий* $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_p, \dots, v_f)$, характеризующие возмущающие воздействия $\mathbf{v}(t)$; *внутренние параметры* $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N)$, характеризующие состояние комплектующих элементов ЭТС и называемые *первичными параметрами* (величины сопротивлений, индуктивностей, емкостей, коэффициенты усиления, постоянные времени); *внутренние параметры* $\mathbf{u}^v = (u_1^v, u_2^v, \dots, u_k^v, \dots, u_e^v)$, $\mathbf{Z}^v = (Z_1^v, Z_2^v, \dots, Z_g^v, \dots, Z_c^v)$, характеризующие соответственно сигналы на входах и выходах ЭТУ, входящих как элементы $v = \overline{1, h}$, h – число элементов, в состав системы; *выходные (внешние) параметры* $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, характеризующие различные функциональные зависимости фазовых переменных $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$ на выходах ЭТС от времени или частоты. Эти параметры являются показателями качества, которые характеризуют правильность функционирования ЭТС. Достаточно часто выходные параметры являются характеристиками ее выходных сигналов $\mathbf{Z}(t)$ и в этом случае $\mathbf{Y} \equiv \mathbf{Z}$.

Под внешними условиями работоспособности будем понимать условия, выполнение которых необходимо для того, чтобы ЭТС функционировала с требуемыми показателями качества. Эти условия определяются заданными соотношениями между выходными параметрами системы \mathbf{Y} и техническими требованиями к этим параметрам, устанавливаемыми при составлении технического задания.

Под внутренними условиями работоспособности будем понимать условия, при которых ЭТУ, как элементы ЭТС, способны выполнять возложенные на них функции, сохраняя при этом работоспособное состояние. Эти условия устанавливаются при проектировании на стадии технического задания и определяются заданными соотношениями между внутренними параметрами \mathbf{Z}^v и их допустимыми значениями, а также между первичными параметрами системы \mathbf{X} и их предельными значениями.

Условия работоспособности могут быть односторонними и двухсторонними и для второго более общего случая записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} Y_{j \min} &\leq Y_j = F_j(\mathbf{X}) \leq Y_{j \max}, \quad j = \overline{1, m} \\ Z_{j \min}^v &\leq Z_j^v = F_j^v(\mathbf{X}) \leq Z_{j \max}^v, \quad v = \overline{1, h} \\ X_{i \min} &\leq X_i \leq X_{i \max}, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Y_{j \max} (Z_{j \max}^v), Y_{j \min} (Z_{j \min}^v), Y_j (Z_j^v)$ – соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значение j -го выходного (внутреннего) параметра.

Первое неравенство в системе неравенств (1) является внешним условием работоспособности и определяет допусковую область $\mathbf{D}_Y = \bigcap_{j=1}^m D_j$ пространства выходных параметров, которая имеет вид m -мерного гиперпараллелепипеда (бруса) евклидова пространства R^m . Каждой допусковой области D_j значений выходных параметров соответствует допусковая область M_j значений первичных параметров. Это соответствие может быть записано в виде отображения $\Phi_{YX} : \mathbf{D}_Y \rightarrow \mathbf{M}_Y$ множества \mathbf{D}_Y в множество \mathbf{M}_Y . При этом каждое неравенство $(F_j(\mathbf{X}) - Y_{j \min}) \cdot (Y_{j \max} - F_j(\mathbf{X})) \geq 0, j = \overline{1, m}$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n первичных параметров \mathbf{X} определяет область M_j . Здесь $F(\mathbf{X})$ – оператор связи первичных и выходных параметров ЭТС в неравенствах (1).

Второе неравенство – является внутренним условием работоспособности и определяет допусковые области $D_Z^v = \bigcap_{j=1}^m D_j, v = \overline{1, h}$

пространства внутренних параметров Z^v , которые по виду соответствуют области \mathbf{D}_Y . Каждой области D_Z^v , согласно отображению $\Phi_{ZX} : D_Z^v \rightarrow M_Z^v$, в пространстве R^n соответствует область M_Z^v , объединение которых определяет допусковую область $\mathbf{M}_Z = \bigcap_{v=1}^s M_Z^v, v = \overline{1, h}$.

Третье неравенство – является внутренним условием работоспособности и определяет допусковую область $\mathbf{D}_X = \{ \mathbf{X} \in R^n | X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}, i = \overline{1, n} \}$, имеющую форму бруса.

Множество $\mathbf{G} = \mathbf{D}_X \cap \mathbf{M}_Z \cap \mathbf{M}_Y$, являющееся пересечением областей $\mathbf{D}_X, \mathbf{M}_Z$ и \mathbf{M}_Y будем называть *областью работоспособности*. Эта область определяет множество допустимых значений первичных параметров, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным и внутренним Z^v параметрам системы.

Задача диагностирования технического состояния ЭТС заключается в распознавании принадлежности вектора $\mathbf{Y}(t)$ области \mathbf{D} или вектора $\mathbf{X}(t)$, области \mathbf{G} , а также в определении запаса работоспособности системы в случае, если $Y(t) \subset \mathbf{D}$.

Под *запасом работоспособности* λ понимается степень приближения вектора фактического состояния ЭТС к его предельно допустимому значению: $\lambda = l_t / l_0$. Здесь l_t – наикратчайшее расстояние в евклидовом n -мерном пространстве параметров \mathbf{X} между текущим состоянием вектора $\mathbf{X}(t)$

и границей области \mathbf{G} ; l_0 – аналогично l_t , но для момента времени $t = t_0$, что соответствует начальному моменту эксплуатации ЭТС.

Трудность решения задачи контроля обусловлена необходимостью построения границы области \mathbf{G} , которая может иметь весьма сложную конфигурацию, и необходимостью вычисления величин l_t и l_0 . Кроме того, для определения вектора $\mathbf{X}(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ требуется контролировать все n параметров \mathbf{X} , что при большой размерности пространства R^n практически неудобно и весьма проблематично.

Для упрощения задачи распознавания область \mathbf{G} обычно аппроксимируют вписанным или описанным брусом наибольшего объема. Тем самым допустимые пределы изменения на параметры \mathbf{X} устанавливаются независимо друг от друга.

Анализ показал [1], что для ЭТС транспортных средств такой подход приводит к большой методической погрешности, которая нелинейно возрастает в функции числа контролируемых параметров \mathbf{X} . Кроме того, для неодносвязных областей работоспособности известные методы не имеют однозначного решения. Ставится задача разработки метода контроля ЭТС, обеспечивающего его простоту и высокую достоверность.

Результаты исследований. Для решения задачи установим связь между первичными \mathbf{X} и контролируемыми (измеряемыми) параметрами \mathbf{Z} . Сущность предлагаемого подхода сводится к следующему. Известно, что любую динамическую систему с заданной погрешностью можно аппроксимировать системой второго порядка и решить задачу ее идентификации, используя переходную характеристику $h(t)$ или частотную передаточную функцию $W(j\omega)$. При этом, между параметрами \mathbf{X} и \mathbf{Z} существует соответствие $\mathbf{Z} = \psi(\mathbf{X})$ и области \mathbf{G} в пространстве R^h параметров \mathbf{Z} соответствует допусковая область \mathbf{F} .

В процессе параметрического синтеза при использовании для поиска номинальных значений внутренних параметров метода сужающихся областей [2], область \mathbf{G} разбивается на подобласти G_i , каждая из которых определяет запас работоспособности λ_i . На основании отображения $\Phi_Z : \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{F}$ в пространстве параметров \mathbf{Z} областям G_i будут соответствовать области F_i .

Для аналитического описания границы области G_i воспользуемся аппаратом логических R -функций [3]. При этом области G_i аналитически записывается в виде следующего рекуррентного соотношения:

$$G_i = (1 + g_i)^{-1} \cdot \left(f_j + f_{j-1} - \sqrt{f_j^2 + f_{j-1}^2 - 2g_i f_j f_{j-1}} \right), j = 1, 2, \dots, 2(m+n), i = 1, 2, \dots, S, \quad (2)$$

где $f_j = \rho_j(X)$ – уравнение j -ой гиперповерхности i -ой подобласти G_i , которое, при необходимости, всегда можно получить, используя методы планирования эксперимента [4]; m и n – размерность соответственно пространства выходных и первичных параметров; S – общее число подобластей G_i ; $g_i \in [-1; 1]$ – параметр преобразования.

Для случая, когда $m = n = 2$ область работоспособности задается

уравнением

$$G = 0,5(M + P - |M - P|), \quad (3)$$

$$M = 0,5(c + d - |c - d|), \quad P = 0,5(e + f - |e - f|),$$

$$c = Y_{1\max} - Y_{1\min} - |2\rho_1(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}|; \quad d = Y_{2\max} - Y_{2\min} - |2\rho_2(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}|;$$

$$e = X_{1\max} - X_{1\min} - |2X_1 - X_{1\max} - X_{1\min}|; \quad f = X_{2\max} - X_{2\min} - |2X_2 - X_{2\max} - X_{2\min}|.$$

Получим уравнение области **F**. С этой целью для каждой поверхности границы области **G**, описываемых соответственно уравнениями c, d, e, f , сформируем совокупность N_q граничных точек, равных числу значимых коэффициентов в уравнениях $\rho_j(X_1, X_2)$. По этим точкам получим уравнения поверхностей I_1, I_2, I_3, I_4 , составляющих область **F**. При этом $X_i^{(1)} = X_i^{(0)} + (\partial f_j^{(0)}(\mathbf{X}) / \partial X_i) \Delta l_j / \text{grad} \partial f_j^{(0)}(\mathbf{X})$ [2]. Применяя преобразование (2) для описания границы области **F**, при условии, что $h=2$, окончательно получим:

$$F = I_{14} + I_{58} - |I_{14} - I_{58}| = 0,$$

$$I_{14} = 0,25(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - |I_1 - I_2| - |I_3 - I_4| - |I_1 + I_2 - I_3 - I_4| + |I_3 - I_4| - |I_1 - I_2|), \quad (4)$$

$$I_{58} = 0,25(I_5 + I_6 + I_7 + I_8 - |I_5 - I_6| - |I_7 - I_8| - |I_5 + I_6 - I_7 - I_8| + |I_7 - I_8| - |I_5 - I_6|).$$

Аналогичным образом определяются границы подобластей F_i . Каждой подобласти $G_i(F_i)$ соответствует свой запас работоспособности ЭТС. Так, например, для подобласти $G_1(F_1): \lambda_1 \in [0; l_1/l_0]$, для $G_2(F_2): \lambda_2 \in [l_1/l_0; l_2/l_0]$, для $G_3(F_3): \lambda_3 \in [l_2/l_0; 1]$.

Таким образом, задача оценки состояния ЭТС сводится к распознаванию в пространстве R^c параметров **Z** принадлежности вектора текущего состояния системы той или иной подобласти $F_\beta, \beta = 1, 2, \dots, S$, где S – число подобластей, для каждой из которых определен запас работоспособности λ_β .

Задача распознавания решается следующим образом. Если после подстановки полученных в результате контроля значений $Z_q, q = 1, 2, \dots, k$ в уравнение (4) окажется, что $F < 0$, следовательно, ЭТС находится в работоспособном состоянии и далее проверяется справедливость выполнения неравенств $F_\beta < 0, \beta = 1, 2, \dots, (S+1)$. Если $F_\beta \leq 0$ и $F_{\beta+1} > 0$, следовательно, вектор текущего состояния ЭТС принадлежит подобласти F_β и запас работоспособности ЭТС равен λ_β . Если $F > 0$ – система неработоспособна. В этом случае осуществляется параметрическая коррекция настраиваемых параметров и ЭТС восстанавливает работоспособность [1].

Рассмотренный подход был апробирован на примерах диагностирования судовых и береговых ЭТС.

Выводы. Для контроля состояния транспортных ЭТС, подверженных изменчивым условиям эксплуатации, необходимо использовать информацию

о границе области работоспособности системы. При этом обеспечивается высокая достоверность контроля и появляется возможность определения запаса работоспособности ЭТС. Для аналитического описания области работоспособности с низкой методической погрешностью следует использовать разработанную методику, основанную на применении логических R -функций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А.В. Методы управления состоянием электротехнических систем. – СПб.: СПГУВК, 2004. – 126 с.
2. Саушев А.В., Шошмин В.А. Основы инженерного проектирования электротехнических устройств и систем. – СПб.: ЛИВТ, 1993. – 125 с.
3. Саушев А.В. Метод построения границы области работоспособности электротехнических объектов // Электричество. – 1990. – № 4. – С. 14-19.

Саушев О.В., Шошмін В.О. КОНТРОЛЬ СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО МЕЖУ ОБЛАСТІ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ
Розглядається метод контролю стану електротехнічних систем транспортних засобів, заснований на інформації про межу області працездатності. Метод забезпечує високу достовірність контролю і дозволяє розв'язувати задачу оцінювання стану системи та задачу визначення запасу її працездатності.
Ключові слова: електротехнічні системи, електротехнічні прилади, контроль працездатності, запас працездатності.

Saushev A.V., Shoshmin V.A. CONTROL OF ELECTRO-TECHNICAL SYSTEMS CONDITION ON THE BASIS OF INFORMATION OF THE RANGE OF SERVICEABILITY
A quality monitoring of a condition of electro-technical systems of the vehicles, based on the information on the range of serviceability, is considered. The method provides high reliability of the control and allows solve a problem of the estimation of a condition of system and a problem of determination of its serviceability margin.
Key words: electro-technical systems, electro-technical arrangements, serviceability control, serviceability margin.