

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-169-184
УДК 621.31:658.58

А. В. Саушев,
Е. В. Бова,
К. К. Гаспарян

МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ В РЕЖИМЕ ТЕСТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Статья посвящена решению одной из важнейших задач технической диагностики электротехнических систем, посвященной определению их состояния в процессе наладки и эксплуатации. Диагностическими параметрами являются выходные параметры системы в режиме ее тестового диагностирования. Показано, что для оценки состояния системы и определения ее запаса работоспособности необходима информация о границе области работоспособности. Выделены и рассматриваются три основных способа аппроксимации области работоспособности. Раскрывается сущность метода контроля состояния электротехнических систем по их выходным характеристикам. Анализируются возможные способы задания области работоспособности. Приводятся алгоритмы отображения области работоспособности и других допусковых областей из пространства параметров комплектующих элементов системы в пространство ее выходных, измеряемых характеристик. Для отображения областей из пространства внутренних параметров системы в пространство ее выходных параметров предложено использование факторных моделей, формируемых на основе метода планирования эксперимента. Получены правила распознавания принадлежности или непринадлежности вектора фактического состояния системы ее области работоспособности, а также допусковым областям, которые характеризуют конкретные значения запаса работоспособности системы и определяются формой ее задания. Для электротехнических систем, имеющих вид систем управления, рассматривается альтернативный метод получения уравнений гиперповерхностей, ограничивающих область работоспособности, основанный на построении желаемой частотной характеристики. Приводится пример синтеза системы управления электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием координат. Для случая, когда область работоспособности аппроксимирована совокупностью линейных гиперплоскостей и известны статистические данные о законах распределения первичных параметров системы, рассматривается статистический метод пересчета исходной области работоспособности в пространство измеряемых (контролируемых) характеристик. Излагается методика оценки методической погрешности определения состояния электротехнических систем, основанная на методе статистического моделирования и использовании ЛПТ-последовательностей, на основе которых формируется множество псевдослучайных точек. Предлагаемая методика иллюстрируется примером.

Ключевые слова: электротехническая система, область работоспособности, контроль состояния, запас работоспособности, диагностические параметры.

Введение

Одной из важнейших задач параметрического управления состоянием электротехнических систем (ЭТС) является задача определения их работоспособности или неработоспособности. При этом крайне важно решить и еще одну задачу — определить запас работоспособности ЭТС, под которым понимается степень приближения вектора фактического состояния системы к его предельно допустимому значению [1]. Большинство известных методов диагностирования состояния ЭТС либо не позволяют решить эту задачу, либо решают ее, но с высокой методической погрешностью, которая резко возрастает с увеличением числа диагностических (контролируемых) параметров [2], [3]. Методы диагностирования состояния судовых электрических

средств автоматизации, основанные на идее исключения варьируемого параметра и изложенные в работах [4], [5], характеризуются низкой методической погрешностью. Однако эти методы рассматривают частный случай, когда область работоспособности ЭТС тождественно равна области физической реализуемости системы, определяемой ограничениями на ее внутренние (первичные) параметры [3].

Состояние ЭТС в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором (вектором) параметров, к которым следует отнести:

- входные параметры, характеризующие задающие воздействия $u(t)$ и наблюдаемые на входах системы. Задающие воздействия подразделяются на *управляющие воздействия*, характеризующие рабочие режимы работы ЭТС, и *тестовые* (пробные) воздействия, которые имеют место в режимах наладки и технического диагностирования ЭТС;

- внешние параметры, характеризующие свойства внешней по отношению к ЭТС среды и оказывающие влияние на ее функционирование;

- внутренние параметры $X = (X_1, X_2, \dots, X_p, \dots, X_n)$, характеризующие состояние комплектующих элементов ЭТС, называемые также *первичными параметрами*. К этим параметрам относятся как параметры самих элементов системы, например, величины сопротивлений, индуктивностей, емкостей, масс, моментов инерции, жесткостей упругих связей, так и функции этих параметров, имеющие определенный физический смысл, основными из которых являются коэффициенты усиления и постоянные времени;

- внутренние параметры u^v и Z^v , характеризующие, соответственно, сигналы на входах и выходах электротехнических устройств, входящих как элементы $v = \overline{1, h}$, где h — число элементов в составе ЭТС;

- выходные параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, характеризующие свойства ЭТС, интересующие потребителя. Они представляют собой параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$ ЭТС, и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность системы. Эти параметры, как правило, являются показателями качества, характеризующими правильность функционирования системы [1].

В качестве диагностических параметров для ЭТС следует рассматривать первичные параметры X или выходные параметры (измеряемые характеристики) Z в режиме тестового диагностирования системы. Это обусловлено тем, что именно первичные параметры определяют состояние ЭТС и лишь в пространстве параметров X возможно определение запаса работоспособности. Методы оценки состояния ЭТС в пространстве параметров Z основаны на отображении области работоспособности также других допусковых областей, принадлежащих области работоспособности, в пространство измеряемых характеристик, что в ряде случаев позволяет решить поставленную задачу более эффективно. При этом под областью работоспособности понимается множество значений первичных параметров, при которых выполняются все требования к выходным Y параметрам системы. Эти требования устанавливаются при проектировании ЭТС на этапе составления технического задания на ее разработку.

Для оценки состояния ЭТС в пространствах первичных и выходных параметров необходима информация о границе области работоспособности, которая может быть задана в виде множества граничных точек или в виде гиперповерхностей. Для технической реализации методов поиска и хранения граничных точек требуется большой объем памяти. Вместе с тем вычислительные возможности современных компьютеров позволяют реализовывать известные алгоритмы поиска граничных точек [6], [7] при достаточно большом числе первичных параметров. В целях контроля состояния системы область работоспособности аппроксимируют более простыми фигурами. Можно выделить три основных способа аппроксимации области работоспособности [6] – [8].

Первый способ предполагает замену области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом), грани которого параллельны осям координат. Построенная таким образом область

определяет независимые допуски, т. е. допуск на каждый из параметров ЭТС не зависит от значений других параметров. В этом случае оценка состояния ЭТС производится с помощью алгоритма контроля по независимым допускам [9]. Если все первичные параметры находятся в пределах своих допусков, то принимается решение о работоспособности системы [9] – [11]. Данный способ является наиболее известным и широко применяемым на практике. Вместе с тем ему присущи два существенных недостатка: во-первых, задача построения бруса является достаточно сложной и для произвольного случая не имеет однозначного решения, во-вторых, и это самое существенное, с ростом размерности пространства первичных параметров методическая погрешность такой аппроксимации резко и нелинейно возрастает. Полученные в работах [3], [6] оценки методической погрешности позволили сделать вывод о недопустимости использования данного подхода для оценки состояния ЭТС при числе первичных параметров больше трех. Второй способ предполагает переход от независимых допусков к зависимым допускам, в виде линейных ограничений. Область работоспособности должна быть задана множеством граничных точек. В результате применения известных методов [6], [12], [13] область аппроксимируют линейными гиперповерхностями, что позволяет существенно снизить методическую погрешность. Третий способ основан на аналитическом описании области работоспособности произвольной формы на основе P - и R -отображений [6], [14], [15].

При разработке методов оценки состояния ЭТС необходимо учитывать исходные данные, размерность системы и априорную информацию о форме и задании области работоспособности. Методы контроля состояния ЭТС должны иметь критерии, позволяющие распознавать принадлежность любой произвольной точки R_i области работоспособности и оценивать запас работоспособности системы.

При контроле состояния ЭТС по независимым допускам задача решается весьма просто. Координаты точки R_i сравниваются независимо друг от друга с допусками (предельными координатами по каждому параметру), и при выполнении всех неравенств делается вывод о принадлежности точки области работоспособности и, как следствие, о работоспособном состоянии ЭТС. При более точной аппроксимации области работоспособности и переходе к зависимым допускам такое правило не работает, поэтому необходимо решение следующих задач: разработка метода оценки состояния ЭТС в пространстве выходных параметров Z на основе информации о границе области работоспособности и разработка методики оценки достоверности контроля в пространстве этих параметров.

Метод контроля состояния электротехнических систем по измеряемым характеристикам

Метод контроля состояния ЭТС по выходным параметрам (измеряемым характеристикам) реализуется путем подачи на ее вход зондирующих сигналов известной формы, измерения характеристик выходных сигналов и проверки выполнения условий работоспособности для результатов измерений.

Условия работоспособности могут быть односторонними и двухсторонними, причем для второго (более общего) случая они имеют вид:

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

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 значения j -го выходного (внутреннего) параметра; $F_j(\mathbf{X})$ и $F_j^v(\mathbf{X})$ — операторы связи первичных параметров ЭТС с ее выходными Y и внутренними Z параметрами соответственно.

Измерение характеристик можно представить как результат преобразования выходных сигналов ЭТС с помощью известных фильтров. При необходимости независимость друг от друга результатов измерений можно обеспечить как за счет выбора разных выходных фильтров, так и за счет выбора соответствующих входных сигналов. Для большинства ЭТС вполне достаточным является использование единичного ступенчатого или импульсного входного воздействий. Для обеспечения требуемой полноты контроля общее число измеряемых значений выходных сигналов должно быть не меньше числа существенных первичных параметров ЭТС, под которыми понимаются параметры комплектующих элементов системы, имеющие наибольшую чувствительность к этим сигналам [9]. Так как при каждом измерении входной сигнал и при необходимости преобразующий фильтр являются известными, измеряемые характеристики, составляющие вектор $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$, также являются известными функциями $\mathbf{Z} = F_z(\mathbf{X})$ первичных параметров системы $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. Такими характеристиками могут быть временные (переходная и импульсная переходная функция) и частотные характеристики ЭТС.

Для построения функций $F_z(\mathbf{X})$ можно воспользоваться методами планирования эксперимента [15]. С целью задания условий работоспособности в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ достаточно выразить первичные параметры $\mathbf{X}$ через параметры $\mathbf{Z}$ и подставить их в уравнения, задающие условия работоспособности. Эта операция будет соответствовать отображению области работоспособности $\mathbf{G}$ в пространство измеряемых характеристик $\mathbf{Z}$ в допусковую область $\mathbf{D}_z$.

Рассмотрим возможные способы такого отображения. Одним из наиболее простых способов является использование П-отображения [6], [15]. Уравнения $F_z(\mathbf{X})$ при этом получают при помощи специально организованного эксперимента. Полученные уравнения будут иметь вид полиномов, которые, как отмечается в работах [6], [15], имеют порядок не выше второй степени. Далее путем решения данной системы уравнений выражают параметры $\mathbf{X}$ через параметры $\mathbf{Z}$ и подставляют их в уравнение, аналитически описывающее область работоспособности. Полученная зависимость будет представлять собой аналитическое описание допусковой области $\mathbf{D}_z$. Альтернативным вариантом решения задачи является случай, когда область работоспособности задана множеством граничных точек. В результате перебора этих точек, используя уравнения (1), можно получить множество граничных точек, описывающих допусковую область $\mathbf{D}_z$, которую для простоты будем также обозначать $\mathbf{F}$.

В случае аппроксимации области работоспособности линейными функциями задача отображения области $\mathbf{G}$ в допусковую область $\mathbf{D}_z$ существенно упрощается. В этом случае достаточно отобразить для каждой линейной гиперповерхности лишь n граничных точек, по значениям которых может быть получена соответствующая гиперповерхность в пространстве параметров $\mathbf{Z}$. Далее аналогичным образом, следуя методу сужающихся областей [1], [16], [17], осуществляется отображение подобластей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$, и т. д., расположенных эквидистантно друг другу, в пространство параметров $\mathbf{Z}$. Полученные при этом области $\mathbf{D}_{z1}(\mathbf{F}_1), \mathbf{D}_{z2}(\mathbf{F}_2)$ и т. д. будут определять соответствующий запас работоспособности ЭТС [1], [16].

При возможности осуществления контроля непосредственно в пространстве параметров $\mathbf{Y}$ аналогичные отображения областей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ и т. д. производятся в пространство выходных параметров ЭТС. Если область работоспособности задана линейными гиперповерхностями, то для отображения областей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ и т. д. в соответствующие области $\mathbf{D}_{y1}, \mathbf{D}_{y2}$ и т. д. достаточно отобразить лишь по одной любой граничной точке, принадлежащей каждой линейной гиперповерхности, расчеты при этом существенно упрощаются. Для иллюстрации предлагаемого метода без потери общности результата будем для простоты считать, что размерности пространства выходных (измеряемых) и первичных параметров равны двум.

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

Для случая, когда не требуется выполнение операций дифференцирования, а число параметров и ограничений равно двум: $m = n = 2$, область работоспособности аналитически задается известным уравнением [6], [14]:

$$G = 0,5(M + P - |M - P|), \quad (2)$$

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

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

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

Получим уравнение области **F**. С этой целью для каждой гиперповерхности f_j границы области **G**, описываемых для примера уравнениями c, d, e, f , сформируем совокупность N_q граничных точек, равных числу значимых коэффициентов в уравнениях $\rho_j(X_1, X_2) = 0$. По этим точкам получим уравнения кривых I_1, I_2, I_3, I_4 составляющих область **F**:

$$X_i^{(1)} = X_i^{(0)} + (\partial f_j^{(0)}(\mathbf{X}) / \partial X_i) \Delta l_j / |\text{grad} \partial f_j^{(0)}(\mathbf{X})|.$$

При условии, что $h = 2$, получим:

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

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

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

Аналогичным образом определяются границы подобластей $\mathbf{F}_i$. Каждой подобласти $\mathbf{G}_i(\mathbf{F}_i)$ соответствует свой запас работоспособности ЭТС. Так, например, для подобластей $\mathbf{G}_1(\mathbf{F}_1)$, $\mathbf{G}_2(\mathbf{F}_2)$, $\mathbf{G}_3(\mathbf{F}_3)$ запишем:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{F}_1): \lambda_1 \in [0; I_1/I_0]; \quad \mathbf{G}_2(\mathbf{F}_2): \lambda_2 \in [I_1/I_0; I_2/I_0]; \quad \mathbf{G}_3(\mathbf{F}_3): \lambda_3 \in [I_2/I_0; 1].$$

Оценка состояния ЭТС сводится к распознаванию в пространстве R^c параметров $\mathbf{Z}$ принадлежности вектора текущего состояния системы той или иной подобласти $\mathbf{F}_\beta$, $\beta = \overline{1, S}$, 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 $Z_q, q = \overline{1, k}$ в последнее уравнение 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 $F_{\beta+1} > 0$, то вектор текущего состояния ЭТС принадлежит подобласти $\mathbf{F}_\beta$ и запас работоспособности системы равен λ_β . Если $F > 0$, то система неработоспособна. В этом случае осуществляется параметрическая коррекция настраиваемых параметров ЭТС, рассмотренная, например, в работах [18], [19].

Для иллюстрации метода проанализируем простейший пример — делитель напряжения, схема которого приведена на рис. 1.

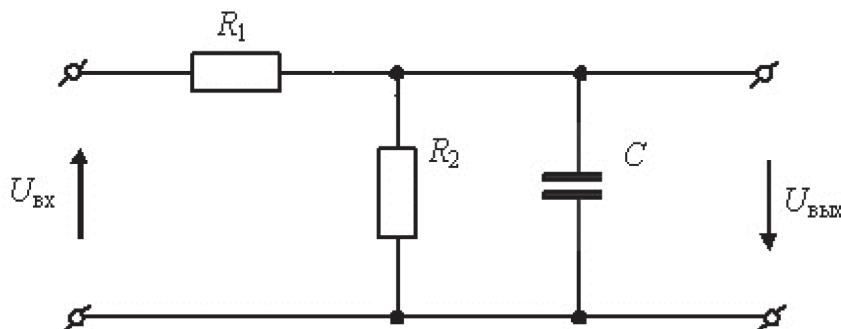


Рис. 1. Принципиальная схема делителя напряжения

Условия работоспособности делителя имеют следующий вид [3]:

$Y_1 = \tau < 0,5 \cdot 10^{-6}$ — постоянная времени перезаряда емкости, с;

$Y_2 = P < 0,1$ — мощность рассеяния, Вт;

$Y_3 = U_{\text{вых}} \in [4; 6]$ — напряжение на выходе делителя, В.

Параметры делителя имеют следующие номинальные значения [3]:

$R_{1\text{ном}} = R_{2\text{ном}} = 0,68 \text{ кОм}$; $C_{\text{ном}} = 1 \text{ нФ}$; $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$ — входное напряжение.

Для наглядности изложения следует предположить, что значение емкости конденсатора в процессе эксплуатации не изменяется и ограничения на значения первичных параметров не учитываются. Установим связь между показателями качества и параметрами делителя. На основе известных из электротехники законов получим:

$$Y_1 = \frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}; Y_2 = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R_1 + R_2}; Y_3 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 + R_2}.$$

Следуя работам [6], [12], запишем аналитическое описание области работоспособности делителя. Учитывая, что сопротивления резисторов выражены в кОм, получим:

$$G = \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \varphi_3 \wedge \varphi_4;$$

$$\varphi_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} - Y_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} - \frac{R_1R_2 \cdot 10^{-6}}{R_1 + R_2}; \varphi_2 = 0,1 - Y_2 = 0,1 - \frac{0,1}{R_1 + R_2};$$

$$\varphi_3 = Y_3 - 4 = \frac{10R_2}{R_1 + R_2} - 4; \varphi_4 = 6 - Y_3 = 6 - \frac{10R_2}{R_1 + R_2}.$$

На основании формулы (2) аналитическое описание области работоспособности, определяющее допустимые пределы изменения первичных параметров R_1 и R_2 для рассматриваемого примера, будет иметь следующий вид:

$$G = 0,25 \left(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - |\varphi_1 - \varphi_2| - |\varphi_3 - \varphi_4| - |\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4| + |\varphi_3 - \varphi_4| - |\varphi_1 - \varphi_2| \right).$$

На рис. 2, а приведены ограничительные линии $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, которые определяют область работоспособности делителя напряжения. Подставляя в уравнение аналитически описывающую область работоспособности функции ограничения, после приведения подобных членов окончательно получим

$$G = 0,25 \left(102,5 - \frac{100 + R_1R_2}{R_1 + R_2} - \left| \frac{100 - R_1R_2}{R_1 + R_2} - 99,5 \right| - \left| \frac{20R_1}{R_1 + R_2} - 10 \right| - \right. \\ \left. - \left| 98,5 - \frac{100R_1}{R_1 + R_2} + \left| \frac{20R_1}{R_1 + R_2} - 10 \right| - \left| \frac{100 - R_1R_2}{R_1 + R_2} - 99,5 \right| \right| \right).$$

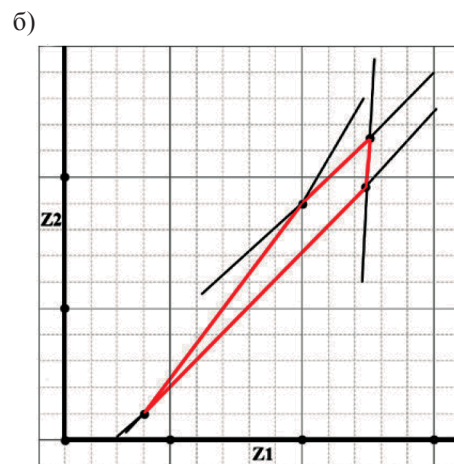
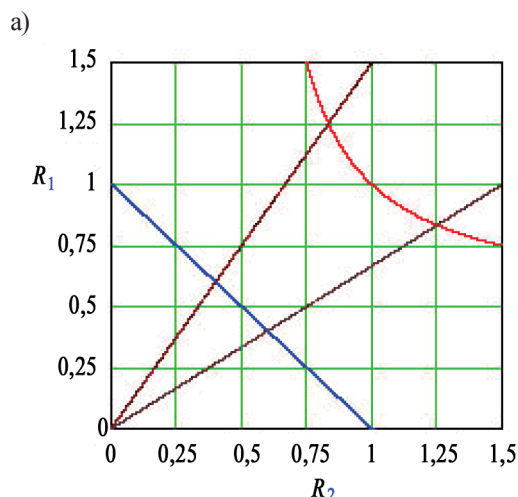


Рис. 2. Область работоспособности делителя напряжения (а) и ее отображение в пространство измеряемых характеристик (б)

Для оценки состояния делителя напряжения достаточно в последнее уравнение подставить текущие значения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 . Схема находится в работоспособном состоянии, если выполняется неравенство $G \geq 0$. В качестве контролируемых параметров будем рассматривать характерные точки переходной характеристики делителя. Установим связь между контролируемыми Z и внутренними X параметрами рассматриваемого устройства. Переходная характеристика схемы определяется следующим уравнением:

$$C_p + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = U_{\text{вх}} / R_1,$$

где p — оператор дифференцирования.

При подаче на вход схемы ступенчатого входного воздействия напряжение на ее выходе будет изменяться по следующему закону:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пр}} \left(1 - e^{-T_i/t^*} \right), \quad (3)$$

где $U_{\text{пр}} = U_{\text{вх}} R_1 / (R_1 + R_2)$; $t^* = C / (U_{\text{вх}} / R_1 - (R_1 + R_2) / R_1 R_2)$; $U_{\text{вх}} = 10$ В.

Переходный процесс носит аperiодический характер. Зная длительность этого процесса, равную $(3 - 4) t^*$, выберем произвольно два момента времени: $T_1 = 0,1$ мкс и $T_2 = 0,2$ мкс. Этим моментам времени будут соответствовать два строго определенных значения выходного напряжения, которые обозначим, соответственно, Z_1 и Z_2 . Установим связь между параметрами Z_1 , Z_2 и $R_1(X_1)$, $R_2(X_2)$. Воспользуемся для этой цели методами теории планирования эксперимента. Ограничимся линейной регрессионной моделью. В соответствии с матрицей полного факторного эксперимента, для $R_1 \in [0,4; 1,25]$ кОм, $R_2 \in [0,4; 1,25]$ кОм. На основании уравнения (3) получим значения функции отклика, приведенные в таблице. Интервалы варьирования сопротивлений R_1 и R_2 устанавливались согласно исходным уравнениям и рис. 2.

Матрица планирования эксперимента для делителя напряжения

№ п/п.	Факторы		Функция отклика	
	X_1	X_2	Z_1 , В	Z_2 , В
1	+	+	2,364	3,610
2	+	–	6,711	7,477
3	–	+	0,909	1,477
4	–	–	4,323	4,908

На основании известных формул расчета коэффициентов аналитических моделей [15] получим следующие регрессионные зависимости:

$$Z_1 = 3,577 + 0,961R_1 - 1,94R_2 - 0,233R_1R_2;$$

$$Z_2 = 4,368 + 1,176R_1 - 1,825R_2 - 0,109R_1R_2.$$

На рис. 2, б приведена допусковая область в пространстве параметров Z .

Выражая из последней системы уравнений первичные параметры R_1 и R_2 через переменные состояния Z_1 и Z_2 , осуществим обратное отображение области F в область M . При этом получим:

$$R_1 = 4,22 + 3,4Z_1 - 3,04Z_2 + \left((4,22 + 3,4Z_1 - 3,04Z_2)^2 - 16,47 + 3,33Z_1 + 7,84Z_2 \right)^{1/2};$$

$$R_2 = -1,61 - 2,01Z_1 - 1,78Z_2 + \left((1,61 + 2,01Z_1 - 1,78Z_2)^2 + 0,46 + 8,62Z_1 - 5,98Z_2 \right)^{1/2}.$$

Наряду с использованием П-отображений [15] для описания ограничивающих гиперповерхностей в неравенствах (1.2), при оптимизации ЭТС, имеющих вид систем управления, можно использовать подход, основанный на построении желаемой частотной характеристики. Однако поскольку построение такой характеристики для системы высокого порядка затруднительно, можно определить желаемую характеристику для системы второго порядка, а затем аппроксимировать

параметры реальной системы так, чтобы они как можно ближе совпали с желаемыми характеристиками.

Пусть для системы второго порядка, характеризующей электропривод постоянного тока, заданы следующие условия работоспособности: $Y_1(t_{\text{пп}}) \leq 0,1$ с — длительность переходного процесса; $Y_2(\sigma) \in [0,025; 0,1]$ с — допустимое перерегулирование; $Y_3(\delta) \leq 0,025$ с — допустимое отклонение от установившегося состояния. Первичными параметрами, определяющими динамические характеристики этой системы, являются собственная частота ω_0 и коэффициент демпфирования ξ . Согласно работе [20], связь между показателями качества и первичными параметрами системы имеет следующий вид:

$$\xi = \ln|1/\sigma| / \left(\pi^2 + \ln^2|1/\sigma| \right)^{1/2}; \quad \omega_0 = \ln|1/\sigma| / \xi t_{\text{пп}}.$$

Систему второго порядка можно представить последовательным соединением апериодического и интегрирующего звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 , охваченными единичной обратной связью. При этом, согласно работе [20], можно записать:

$$T_1 = 1/2\xi\omega_0; \quad T_2 = 2\xi/\omega_0.$$

На основании приведенных уравнений и ограничений, определяемых физической реализуемостью системы и задающих допусковую область **P**, получено:

$$\xi_{\text{max}} = 0,591; \quad \xi_{\text{min}} = 0,761; \quad T_1 = kT_2; \quad T_1 = 1/4\xi^2; \quad k_{\text{max}} = 0,716; \quad k_{\text{min}} = 0,432; \quad T_{1\text{max}} = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$T_{1\text{min}} = 0,5T_{\mu} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad T_{2\text{min}} = 4\xi_{\text{max}}^2 T_1 = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ с},$$

где $T_{\mu} = 0,01$ А — заданное значение некомпенсированной постоянной времени, определяемой тиристорным преобразователем напряжения. Полученные уравнения и заданные ограничения определяют область работоспособности системы, которая приведена на рис. 3.

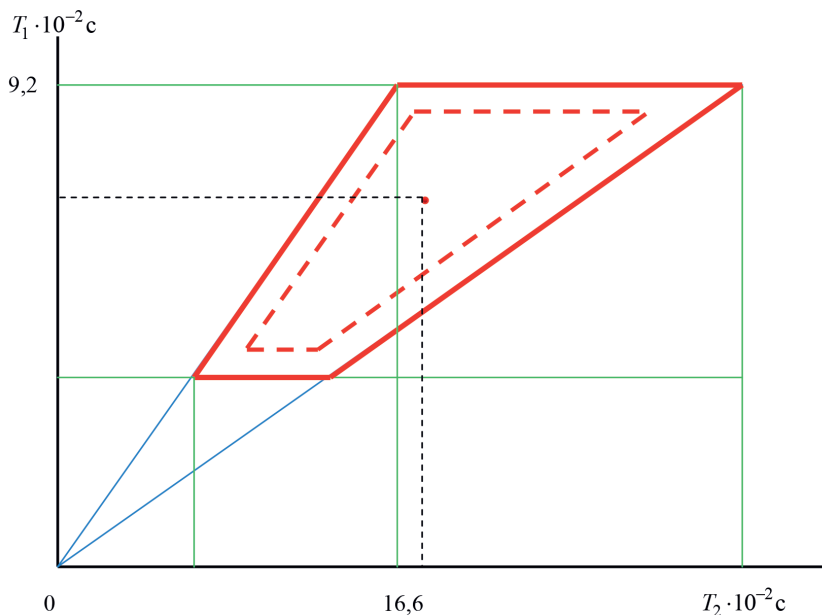


Рис. 3. Область работоспособности системы второго порядка

Последовательное сужение области работоспособности в направлении оптимума на основании метода сужающихся областей [16] позволило определить оптимальные значения параметров $T_1 = 0,92 \cdot 10^{-2}$ с; $T_2 = 1,66 \cdot 10^{-2}$ с. Отображение областей, полученных в процессе реализации алгоритма сужения области работоспособности в пространство контролируемых параметров Z_1 и Z_2 , позволило построить допусковые области, каждой из которых соответствует определенный запас работоспособности системы.

Для определения параметров регуляторов тока и скорости сопоставим АФЧХ разомкнутой цепи контуров тока и скорости с желаемой характеристикой $\omega_0 = 81 (1/c)$. С этой целью построим АФЧХ желаемой разомкнутой системы для некоторого фиксированного числа точек $\omega_k \in (0; \omega_0)$ при $\omega_0 = 81 (1/c)$

$$W_{\text{раз.жел}}(j\omega) = A(\omega_k) + jB(\omega_k); k = 1, 2, \dots, n_1,$$

где $A(\omega_k) = A_k = -T_1 T_2 \omega_k^2 / \left((T_1 T_2 \omega_k^2)^2 + (T_2 \omega_k)^2 \right)$; $B(\omega_k) = B_k = A_k / T_1 \omega_k$.

Рассмотрим структурную схему контура тока (рис. 4). Пусть частотная характеристика объекта контура тока сформирована и определена для тех же частот, что и желаемая характеристика:

$$W_{\text{об}}(j\omega_k) = K_T W_n(j\omega_k) / (Z_y(\omega_k) + Z_{\text{вн}}(\omega_k)) = C(\omega_k) + jD(\omega_k) = C_k + jD_k.$$

Предположим, что в контуре тока применен ПИ-регулятор с частотной характеристикой

$$W_{\text{РТ}}(j\omega) = K_{\text{РТ}} \frac{1 + T_{\text{РТ}}(j\omega)}{T_{\text{РТ}}(j\omega)} = K_{\text{РТ}} - j \frac{K_{\text{РТ}}}{T_{\text{РТ}}} \frac{1}{\omega} = X_1 - jX_2 \frac{1}{\omega},$$

где неизвестные параметры регулятора тока обозначены как $X_1 = K_{\text{РТ}}$; $X_2 = K_{\text{РТ}} / T_{\text{РТ}}$.

Тогда для разомкнутой цепи контура тока

$$W_{\text{разКТ}}(j\omega_k) = \left(X_1 - jX_2 \frac{1}{\omega_k} \right) (C_k + jD_k) = \left(C_k X_1 + \frac{D_k}{\omega_k} X_2 \right) + j \left(D_k X_1 - \frac{C_k}{\omega_k} X_2 \right).$$

Частотная характеристика разомкнутой цепи контура тока отличается от желаемой характеристики. Для конкретной частоты разность этих характеристик имеет следующий вид:

$$l_k = W_{\text{раз.жел}} - W_{\text{раз.КТ}} = \left(A_k - C_k X_1 - \frac{D_k}{\omega_k} X_2 \right) + j \left(B_k - D_k X_1 + \frac{C_k}{\omega_k} X_2 \right).$$

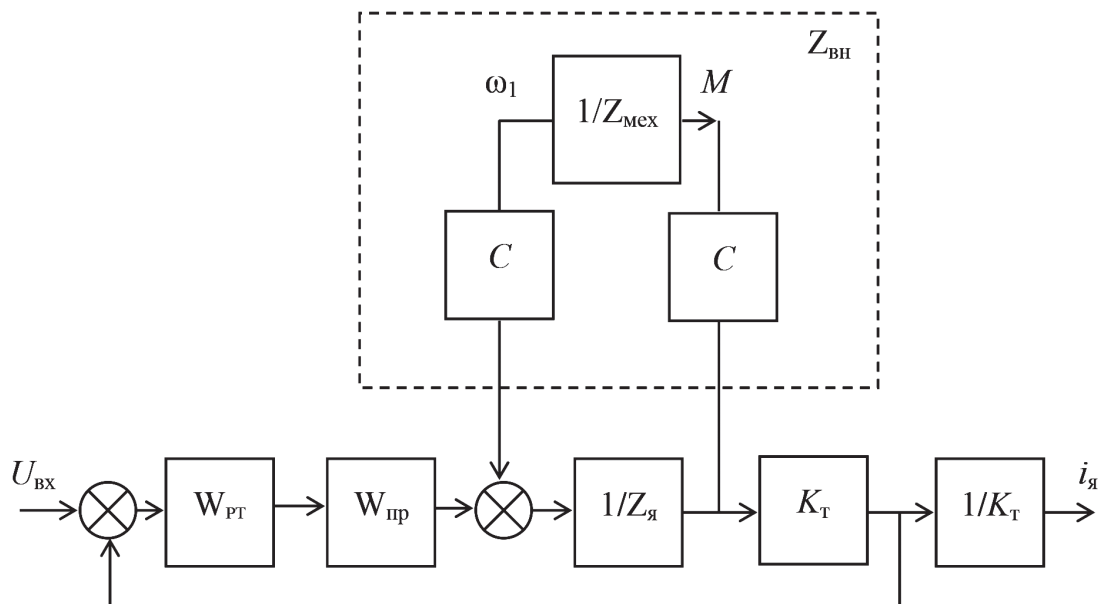


Рис. 4. Структурная схема контура тока

Для определения параметров регулятора тока воспользуемся методом наименьших квадратов. При этом сумма квадрата модуля разности $\Sigma |l_k|^2$, образованная в области существенных частот, должна быть наименьшей. Для этого найдем производные этой суммы по параметрам X_1 и X_2 и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial \sum_1^n |I_k|^2}{\partial X_1} = -2 \sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k) + 2 \sum_1^n (C_k^2 + D_k^2) X_1 = 0;$$

$$\frac{\partial \sum_1^n |I_k|^2}{\partial X_2} = 2 \sum_1^n (B_k C_k - A_k D_k) / \omega_k + 2 \sum_1^n ((C_k^2 + D_k^2) / \omega_k^2) X_2 = 0.$$

Из полученной системы уравнений легко найти параметры X_1 и X_2 и тем самым определить параметры регулятора тока:

$$K_{PT} = X_1 = \frac{\sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k)}{\sum_1^n (C_k^2 + D_k^2)}; \quad T_{PT} = \frac{X_1}{X_2} = \frac{\sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k)}{\sum_1^n (A_k D_k - B_k C_k) \omega_k}.$$

Зная параметры X_1 и X_2 , можно построить частотную характеристику разомкнутого и замкнутого контура тока, на основании которой строится переходный процесс в контуре тока. Аналогично настраивается и регулятор скорости. Для случая, когда область работоспособности аппроксимирована совокупностью линейных гиперплоскостей и известны статистические данные о законах распределения первичных параметров, для решения задачи можно воспользоваться методом пересчета исходной области работоспособности в пространство измеряемых (контролируемых) характеристик, изложенным в работе [21]. Допусковая область в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ также задается в виде линейно-зависимых допусков. Для решения задачи следует использовать рассмотренные в работе [12] методы касательных гиперплоскостей и линейной аппроксимации граничных точек.

Для отображения области $\mathbf{G}$ в область $\mathbf{F}$ достаточно определить линейный оператор $\mathbf{B}$ такого преобразования: $\mathbf{V} = \mathbf{Z} \mathbf{B}$, где $\mathbf{Z}$ — h -мерный вектор измеряемых характеристик; $\mathbf{V}$ — n -мерный вектор первичных параметров ЭТС с учетом ошибок линейного преобразования.

Требование линейности оператора $\mathbf{B}$ определяется необходимостью однозначного пересчета области работоспособности и получения в пространстве контролируемых параметров области с линейно-зависимыми допусками. Поставив рассмотренное преобразование в исходную систему линейных неравенств $\sum_{i=1}^n a_{ij} X_i + b_j \leq 0$, задающих область работоспособности в пространстве первичных параметров, получим допусковую область в пространстве контролируемых параметров в виде системы линейных неравенств:

$$\mathbf{aBZ} + \mathbf{b} \leq 0,$$

где $\mathbf{a}$ — матрица коэффициентов неравенств ($r \times n$), задающих область работоспособности; $\mathbf{B}$ — линейный оператор ($n \times h$).

В развернутом виде получим

$$\sum_{g=1}^h Z_g \sum_{i=1}^n a_{ki} B_{ig} + b_k \leq 0, k = \overline{1, r},$$

где B_{ig} — элементы оператора $\mathbf{B}$, h — количество измеряемых характеристик; n — число первичных параметров; r — число неравенств, задающих допусковую область $\mathbf{F}$.

Задание линейного оператора определяется из условия наилучшего приближения вектора $\mathbf{V}$ к вектору параметров $\mathbf{X}$. В качестве оценки степени соответствия этих векторов используется ковариационная матрица ошибки преобразования $\mathbf{R}_\epsilon$.

Оценка методической погрешности при контроле состояния электротехнических систем

Важнейшим показателем контроля состояния ЭТС является достоверность принятия решения по результатам выполненных измерений [8]. Достоверность контроля определяется

погрешностями двух видов: инструментальной и методической. Если способы определения инструментальной погрешности рассмотрены весьма полно, то вопросы оценки методической погрешности, а также возможные пути ее снижения разработаны недостаточно. При аппроксимации реальной границы области работоспособности появляется риск заказчика или риск изготовителя, которые определяют методическую составляющую погрешности [6], [8]. Кроме того, в работах [3], [6] доказано, что при назначении независимых допусков на входные параметры системы методическая погрешность может достигать больших величин. Вместе с тем численные оценки такой аппроксимации нигде подробно не рассматривались. Таким образом, ставится задача разработки методики расчета методической погрешности, на основании которой может быть сделан вывод о возможности или невозможности контроля ЭТС по независимым допускам.

Методика предполагает вычисление оценки методической погрешности $\hat{\mu}$ по формуле

$$\hat{\mu} = |1 - \gamma(V_1/V_2)|, \quad (4)$$

где V_1 и V_2 — объемы областей S_B и G или G и S_0 соответственно, γ — коэффициент, величина которого определяется плотностью вероятности вектора первичных параметров, а также конфигурацией и взаимным расположением областей S и G относительно друг друга [6].

При этом на первом этапе вычисляется отношение объемов V_1/V_2 и для коэффициента $\gamma = 1$ приближенно оценивается значение μ . На втором этапе, в случае его необходимости, определяется значение коэффициента γ и полученная оценка величины μ уточняется. Рассмотрим особенности вычисления относительной величины методической погрешности по формуле (4).

Для построения бруса $S_B(N_B)$ и вычисления его объема разработаны специальные методы [22]. Недостатком этих методов является то, что они применимы лишь в случае, когда область работоспособности является односвязной и выпуклой. Для произвольного случая построить брус можно по рассмотренному в работе [6] алгоритму, предусматривающему наличие информации о границе области работоспособности.

Для построения описанного бруса $S_0(N_0)$ предлагается следующий алгоритм. Из массива граничных точек области работоспособности по каждому первичному параметру $X_i, i = \overline{1, n}$ выделяют точки, соответствующие его максимальному $X_{i\max}$ и минимальному $X_{i\min}$ значениям. В частном случае, когда граница области работоспособности примыкает к граням допусковой области $D_x(P)$, для отдельных параметров могут выполняться равенства $X'_{i\min} = X_{i\min}$ и $X'_{i\max} = X_{i\max}$. Точки, соответствующие $X'_{i\min}$ и $X'_{i\max}$, определяются в процессе построения границы области работоспособности. Грани бруса N_0 описываются уравнениями $X_i = X'_{i\min}$, $X_i = X'_{i\max}$, $i = \overline{1, n}$, а его объем V_2 вычисляется по формуле $V_2 = \prod_{i=1}^n (X_{i\max} - X_{i\min})$.

Объем области работоспособности может быть вычислен точно, при наличии информации о ее границе, и приближенно, при отсутствии такой информации. Рассмотрим приближенные способы вычисления ее объема, которые более удобны для практики. Классическим подходом к решению этой задачи является использование специальных кубатурных формул, основанных на приближенном вычислении n -кратного определенного интеграла. В работе [3] показано, что в этом случае нужно использовать аналитическое описание области работоспособности [6], [12]. При большом числе контролируемых параметров объем области работоспособности следует вычислять, используя метод статистических испытаний, где в качестве расчетных используются квазислучайные точки, составляющие ЛПт-последовательности [23].

Для некоторых ЭТС возможно вычисление коэффициента γ на стадии производства. При этом случайным образом формируется выборка N объектов из их общего числа, составляющих серию. Априорно или в результате специально проведенных испытаний определяется число работоспособных объектов N_1 и вычисляется относительная частота $\alpha_1 = N_1/V_1$. Действительное число рабо-

тоспособных объектов определяется на основании уравнения (1), путем подсчета числа объектов, вектор контролируемых параметров которых принадлежит области работоспособности. При этом относительная частота $\alpha_2 = N_2/V_2$. Коэффициент γ вычисляется как отношение α_1/α_2 . Для вычисления коэффициента γ на стадии эксплуатации необходимо иметь информацию о границе области работоспособности и статистические данные о траектории изменения вектора параметров $\mathbf{X}$ в области $\mathbf{P}$. На основании этих данных определяются моменты времени t_1 и t_2 , для которых относительно начального момента времени t_0 имеет место пересечение траектории движения вектора $\mathbf{X}$ границ областей $\mathbf{N}_0$ и $\mathbf{G}$ соответственно. Далее вычисляются относительные частоты $\alpha_1 = t_1/N_0$, $\alpha_2 = t_2/G$ и коэффициент $\gamma = \alpha_1/\alpha_2$.

Пример. Пусть ЭТС характеризуется двумя контролируемыми параметрами: X_1 и X_2 , с равномерным распределением плотности вероятности и тремя показателями качества: $Y_1 \leq 1$; $Y_2 \leq 10$; $Y_3 \geq 3$. Экспериментальным путем были установлены зависимости, связывающие первичные параметры с показателями качества:

$$Y_1 = 8,25X_1 + 6X_2 + 7,5X_1X_2 - 1,4; \quad Y_2 = 11,83X_1 + 17,52X_2 + 7,3X_1X_2 - 2;$$

$$Y_3 = 2,72X_1 + 0,89X_2 + 0,99X_1X_2 - 2,96.$$

Параметры X_1 и X_2 представлены в уравнениях в относительных единицах. Ограничения на их значения определяют допусковую область $\mathbf{P}$: $|X_1| \leq 1$, $|X_2| \leq 1$.

Используя метод аналитического описания области работоспособности [6], [14], окончательно получим:

$$G = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} 14,36 - 17,36X_1 + 13,41X_2 - 13,81X_1X_2 - | -9,6 + 3,58X_1 - 23,52X_2 - 0,2X_1X_2 | - \\ - | 1,96 + 2,72X_1 - 0,11X_2 + 0,99X_1X_2 | - \left[\begin{array}{l} 14,44 - 22,8X_1 - 9,63X_2 - 15,79X_1X_2 - \\ - | -9,6 + 3,58X_1 - 23,52X_2 - 0,2X_1X_2 | + \\ + | 1,96 + 2,72X_1 - 0,11X_2 + 0,99X_1X_2 | \end{array} \right] \end{array} \right].$$

Граничные точки области работоспособности определялись методом параллельных прямых [6]. Для выбранного шага дискретизации $\Delta X_1 = 0,1$ были определены наибольшее и наименьшее значения первичных параметров, а также площадь S_0 прямоугольника N_0 : $X'_{1,Omax} = 0,7$; $X'_{1,Omin} = -0,5$; $X'_{2,Omax} = 1$; $X'_{2,Omin} = -0,74$; $S_0 \approx 2,09$. Методом диагоналей [1] были определены координаты прямоугольника N_g максимально возможной площади S_B : $X'_{1,Bmax} = 0,2$; $X'_{1,Bmin} = -0,2$; $X'_{2,Bmax} = 0,1$; $X'_{2,Bmin} = -0,6$; $S_B = 0,28$.

Вычислим площадь S области работоспособности $\mathbf{G}$. Сделаем это двумя способами, точно — по известным граничным точкам, и приближенно — используя метод статистического моделирования.

$$S \approx 0,5 \sum_{k=1}^h (q_{i+1} - q'_{i+1} + q_i - q'_i) \Delta X_1 = 0,89,$$

где q_{i+1} , q'_{i+1} , q_i , q'_i — граничные точки области $\mathbf{G}$, соответственно для i -го и $(i+1)$ -го сечений; $S \approx 4d_1/d_2 = 0,88$, где d_1 и d_2 — число квазислучайных точек, принадлежащих, соответственно, областям $\mathbf{G}$ и $\mathbf{P}$.

На рис. 5 показана граница области работоспособности, аппроксимирующие ее вписанный N_g и описанный N_0 прямоугольники и построенная ЛПТ последовательность квазислучайных точек при их общем числе $d_2 = 32$. На основании формулы (4) методическая погрешность, определяющая риск заказчика, равна 57 %, а риск изготовителя — 68 %. Относительная погрешность вычисления площади области работоспособности методом статистического моделирования не превышает 1,2 %.

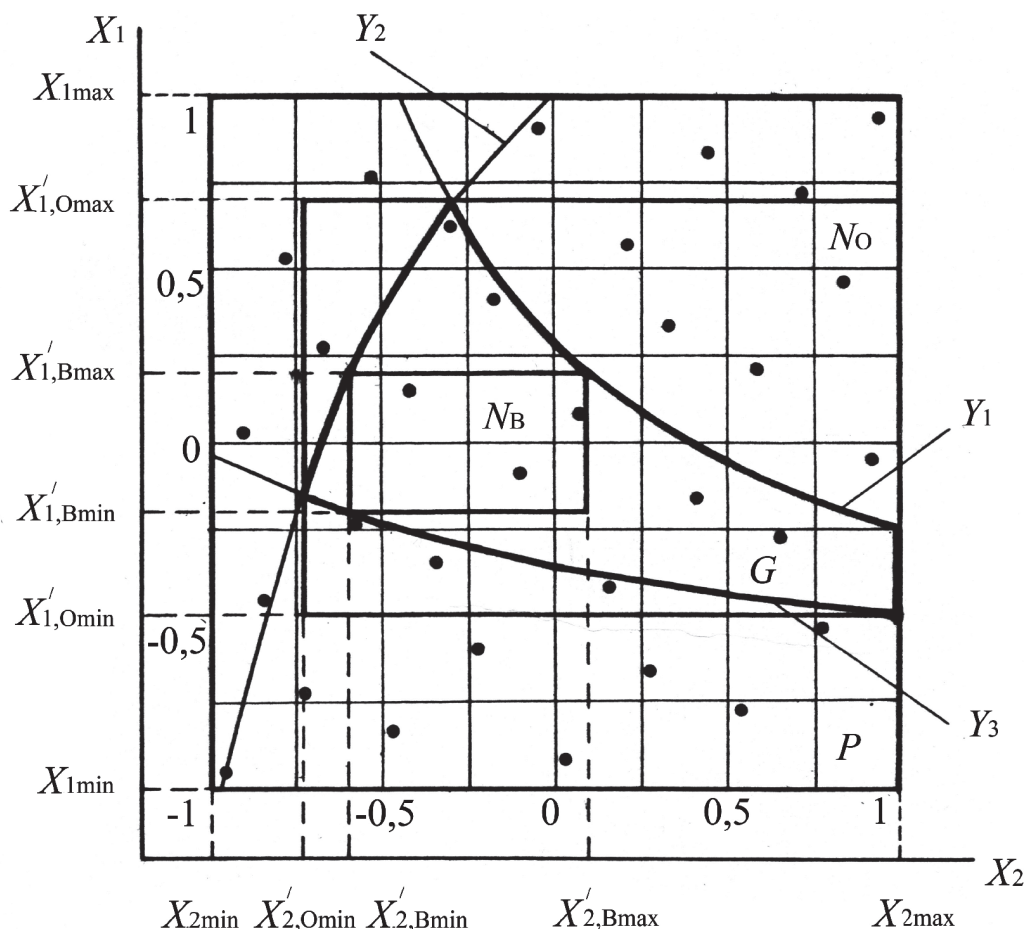


Рис. 5. Иллюстрация процесса вычисления методической погрешности

Для ЭТС, имеющих блочную структуру, для оценки их состояния и определения запаса работоспособности следует дополнительно к рассмотренным алгоритмам использовать специальную процедуру спиральной развертки, рассмотренную в работе [7].

Выводы

1. Изложенные в работе метод и алгоритмы контроля состояния электротехнических систем, в отличие от известных методов, позволяют эффективно и с высокой достоверностью в режиме онлайн не только распознавать работоспособное и неработоспособное состояния системы в процессе эксплуатации, но и оценивать ее запас работоспособности. Метод основан на использовании информации о границе области работоспособности и отображении её в пространстве измеряемых характеристик системы.

2. Методическая погрешность контроля состояния электротехнических систем в процессе эксплуатации может быть вычислена при помощи рассмотренной в статье методики, которая предусматривает использование метода статистических испытаний и аналитическое описание области работоспособности системы. С целью повышения эффективности методики при реализации статистических испытаний применяется процедура формирования квазислучайных точек, составляющих ЛПт-последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

2. *Калявин В. П.* Надежность и диагностика элементов электроустановок / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. — СПб.: Элмор, 2009. — 336 с.
3. *Саушев А. В.* Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем / А. В. Саушев // Информатика и системы управления. — 2012. — № 3 (33). — С. 120–131.
4. *Портнягин Н. Н.* Применение метода исключения варьируемого параметра при решении задач диагностики / Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке. — М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2009. — 165 с.
5. *Пюкке Г. А.* Стохастические модели и методы анализа работоспособности объектов судового электрооборудования / Г. А. Пюкке, С. О. Федоров // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2013. — № 26. — С. 28–38.
6. *Саушев А. В.* Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
7. *Саушев А. В.* Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156.
8. *Катуева Я. В.* Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катуева, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
9. *Евланов Л. Г.* Контроль динамических систем / Л. Г. Евланов. — М.: Наука, 1979. — 432 с.
10. *Иншаков А. Н.* Допусковый анализ при проектировании сложных технических систем / А. Н. Иншаков, С. А. Иншаков // Информационные технологии. — 1997. — № 1. — С. 34–39.
11. *Шило Г. Н.* Назначение интервальных допусков методом отображений / Г. Н. Шило // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2009. — Т. 52. — № 5. — С. 24–34.
12. *Саушев А. В.* Методы линейной аппроксимации граничных точек областей работоспособности технических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 41–51.
13. *Saushev A. B.* Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range / A. B. Saushev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2013. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.
14. *Саушев А. В.* Математическое описание областей работоспособности электромеханических систем / А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 6. — С. 7–13.
15. *Саушев А. В.* Отображение статических и динамических свойств электротехнических систем полиномиальными функциями / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 54а–62.
16. *Саушев А. В.* Метод и алгоритмы параметрического синтеза электротехнических систем по критерию запаса работоспособности / А. В. Саушев // Информационные технологии. — 2012. — № 12. — С. 24–29.
17. *Саушев А. В.* Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
18. *Абрамов О. В.* Выбор минимальной совокупности настроечных параметров / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2015. — № 2 (44). — С. 23–32.
19. *Саушев А. В.* Синтез настраиваемых электротехнических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 46–56.
20. *Михайлов О. П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О. П. Михайлов. — М.: Машиностроение, 1990. — 304 с.
21. *Дятлов В. А.* Контроль динамических систем / В. А. Дятлов, А. Н. Кабанов, Л. Т. Милов. — Л.: Энергия, 1978. — 88 с. — (Библиотека по автоматике; вып. 592, б).
22. *Абрамов О. В.* Параметрическая коррекция систем управления / О. В. Абрамов, Ф. И. Бернацкий, В. В. Здор. — М.: Энергоиздат, 1982. — 175 с.
23. *Антонова Г. М.* Сеточные методы равномерного зондирования для исследования и оптимизации динамических стохастических систем / Г. М. Антонова. — М.: Физматлит, 2007. — 224 с.

METHOD OF CONDITION MONITORING OF ELECTRICAL SYSTEMS MEASURED CHARACTERISTICS OF TEST DIAGNOSTICS

Article is devoted to the solution of one of the most important tasks of the technical diagnostics of electrotechnical systems devoted to determination of their condition in the course of adjustment and operation.

Diagnostic parameters are output parameters of system in the mode of its test diagnosing. It is shown that information on border of area of working capacity is necessary for assessment of a condition of system and determination of its inventory of working capacity. Three main methods of approximation of area of working capacity are allocated and are considered. The essence of a method of control of a condition of electrotechnical systems according to their output characteristics reveals. Possible methods of a task of area of working capacity are analyzed. Algorithms of display of area of working capacity and others the dopuskovykh of areas from space of parameters of the completing system elements are given to space of its days off, the measured characteristics. For the purpose of display of areas from space of internal parameters of system in space of its output parameters use of the factorial models created on the basis of an experiment planning method is offered. Rules of recognition of accessory or not accessory of a vector of actual state of system of its area of working capacity are received, and also to dopuskovy areas which characterize specific values of an inventory of operability of system and are determined by a form of its task. For the electrotechnical systems having an appearance of management systems the alternative method of receipt of the equations of the hypersurfaces limiting area of working capacity, based on creation of the desirable frequency characteristic is considered. The example of synthesis of a management system of the electric drive of a direct current with subordinate regulation of coordinates is given. For a case when the area of working capacity is approximated by set of linear hyperplanes and statistical data on the distribution laws of primary parameters of system are known, the statistical method of recalculation of initial area of working capacity in space of the measured (controlled) characteristics is considered. The technique of assessment of a methodical error of determination of a condition of electrotechnical systems based on a method of statistical modeling and use of LPt sequences on the basis of which the set of pseudorandom points is created is stated. The offered technique is illustrated by an example.

Keywords: electrical system, the area of health status monitoring, performance margin, diagnostic parameters.

REFERENCES

1. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jeлектrotehnicheskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
2. Kaljavin, V. P., and L. M. Rybakov. *Nadezhnost i diagnostika jelementov jelektroustanovok*. SPb.: Jelmor, 2009.
3. Saushev, A. V. "Analytical method of tolerancing for parameters of dynamic systems." *Information Science and Control Systems* 3(33) (2012): 120–131.
4. Portnjagin, N. N., and G. A. Pjukke. *Primenenie metoda iskljuchenija variruemogo parametra pri reshenii zadach diagnostirovaniya*. M.: Iz-vo «Akademija Estestvo-znaniya», 2009.
5. Pjukke, G. A., and S. O. Fedorov. "Stochastic models and operability analysis of ship electrical equipment units." *Bulletin of Kamchatka State Technical University* 26 (2013): 28–38.
6. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jeлектrotehnicheskikh sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.
7. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. "Diagnosing of the condition of electrotechnical systems in space of parameters of their elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 143–156.
8. Katueva, Ya. V., and D. A. Nazarov. "The Methods of Parametric Synthesis Based on Grid Representation of a Region of Acceptability." *Information Technologies* 21.9 (2015): 651–656.
9. Evlanov, L. G. *Kontrol dinamicheskikh sistem*. M.: Nauka, 1979.
10. Inshakov, A. N., and S. A. Inshakov. "Dopuskovyj analiz pri proektirovanii slozhnyh tehicheskikh system." *Information Technologies* 1 (1997): 34–39.
11. Shilo, G. N. "Naznachenie intervalnyh dopuskov metodom otobrazhenij." *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radiojelektronika* 52.5 (2009): 24–34.
12. Saushev, A. V. "Methods of linear approximation of boundary points of areas of operability of technical systems." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3(19) (2013): 41–51.
13. Saushev, A. V. "Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range." *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 49.1 (2013): 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.
14. Saushev, A. V. "The Mathematical Description of Areas of Working Capacity of Electromechanical Systems." *Mechatronics, Automation, Control* 6 (2013): 7–13.
15. Saushev, A. V. "Display of static and dynamic properties of electrotechnical systems by polynomial functions." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2012): 54a–62.

16. Saushev, A. V. "Method and algorithms of parametrical synthesis of electrotechnical systems by criterion of a stock of working capacity." *Information Technologies* 12 (2012): 24–29.
17. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admissions of multiple parameter systems." *Informacionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy* 3 (2015): 65–73.
18. Abramov, O. V. "Selection of the minimum set of adjusting parameters." *Information Science and Control Systems* 2 (44) (2015): 23–32.
19. Saushev, A. V. "Synthesis of adjusted electrotechnical systems." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2012): 46–56.
20. Mihajlov, O. P. *Avtomatizirovannyj jelektroprivod stankov i promyshlennyh robotov*. M.: Mashinostroenie, 1990.
21. Djatlov, V. A., A. N. Kabanov, and L. T. Milov. *Kontrol dinamicheskikh sistem*. L.: Jenergiya, 1978.
22. Abramov, O. V., F. I. Bernackij, and V. V. Zdor. *Parametricheskaja korrekciya sistem upravlenija*. M.: Jenergoizdat, 1982.
23. Antonova, G. M. *Setochnye metody ravnomernogo zondirovaniya dlja issledovaniya i optimizacii dinamicheskikh stohasticheskikh sistem*. M.: Fizmatlit, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Бова Елена Владимировна — доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Гаспарян Каджик Корюнович — аспирант.
Научный руководитель:
Саушев Александр Васильевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Aleksandr Vasil'evich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Bova Elena Vladimirovna — associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Gasparjan Kadzhik Korjunovich — postgraduate.
Supervisor:
Saushev Aleksandr Vasil'evich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 октября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-184-205
УДК 621.396

**А. Н. Маринич,
А. В. Припотнюк,
Ю. М. Устинов**

МОНИТОРИНГ СУДОВ НА ТРАССАХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В статье рассматривается возможность использования спутниковых систем связи для целей мониторинга судов в высоких широтах. Показано, что возрастающая роль Арктики в экономике обуславливает необходимость надежной и бесперебойной связи контроля положения судов. Приводятся проблемы, стоящие перед традиционной высокочастотной связью в высоких широтах. Высказывается предположение о необходимости использования спутниковой связи, альтернативной системе ИНМАРСАТ. Показано, что текущее состояние систем мониторинга основывается на возможностях системы ВИКТОРИЯ с использованием систем связи ИНМАРСАТ и АРГОС. Проводится общая оценка спутниковых низкоорбитальных и среднеорбитальных систем связи с круговыми орбитами для решения задач мониторинга. Срав-