ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31:658.58

А. В. Саушев,
Н. В. Широков

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Статья посвящена одной из важнейших задач технической диагностики, такой как определение состояния динамической системы в процессе ее эксплуатации. Рассматриваются методы решения этой задачи применительно к классу электротехнических систем. При этом диагностическими параметрами являются внутренние параметры системы, определяющие состояние ее комплектующих элементов. Показано, что для оценки состояния системы и определения ее запаса работоспособности необходима информация о границе области работоспособности. В работе предполагается задание области работоспособности в виде множества граничных точек, а также в форме аналитического описания ее границы. Получены правила распознавания принадлежности или непринадлежности вектора фактического состояния системы области работоспособности, которые определяются формой ее задания. Проанализированы алгоритмы вычисления запаса работоспособности электротехнической системы. Определены сферы применения каждого алгоритма, которые обусловлены формой задания области работоспособности, ее видом и размерностью пространства диагностических параметров. Разработанные методы и алгоритмы апробированы на тестовых примерах и реальных электротехнических системах.

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

ОДНОЙ из важнейших задач технической диагностики является оценка состояния динамических систем в процессе их эксплуатации. Для электротехнических систем (ЭТС) эта задача сводится, прежде всего, к определению работоспособности или неработоспособности системы. При этом крайне важно решить и еще одну задачу — определить запас работоспособности ЭТС. Известные методы диагностирования состояния ЭТС либо не позволяют решить эту задачу, либо решают ее, но с большой методической погрешностью, которая резко возрастает с увеличением числа диагностических параметров. ЭТС отличаются большим схемным разнообразием и сложностью. Требования, которые предъявляются к их функционированию, постоянно ужесточаются, а режимы работы и условия эксплуатации достаточно часто являются тяжелыми и изменчивыми, о чем свидетельствуют данные, приведенные в работах [1], [2]. Таким образом, задача оценки действительного состояния ЭТС, включая определение с заданной точностью запаса работоспособности системы, в настоящее время приобретает особую актуальность. Для раскрытия сути предлагаемых методов решения поставленной задачи следует остановиться на основных понятиях, используемых в настоящей работе. Под ЭТС, согласно работе [3], будем понимать техническую систему, предназначенную для получения, распределения, преобразования, использования электрической энергии и управления этими процессами.

Элементами ЭТС являются электротехнические устройства (ЭТУ). 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. Таким образом, любое ЭТУ также может рассматриваться как ЭТС.

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

– входные параметры: $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \ldots, u_k, \ldots, u_e)$, характеризующие задающие воздействия $\mathbf{u}(t)$ 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: $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \ldots, v_\rho, \ldots, v_f)$, характеризующие свойства внешней по отношению к ЭТС среды и оказывающие влияние на ее функционирование. К таким воздействиям, например, относятся воздействия окружающей среды: температура, влажность, вибрация и радиация;

– внутренние параметры $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \ldots, X_i, \ldots, X_n)$, характеризующие состояние комплектующих элементов ЭТС, называемые также *первичными параметрами*. К этим параметрам относятся как параметры самих элементов (величины сопротивлений, индуктивностей, емкостей, масс, моментов инерции, жесткостей упругих связей), так и функции этих параметров, имеющие определенный физический смысл (коэффициенты усиления, постоянные времени, соотношения масс);

– внутренние параметры $\mathbf{u}^\upsilon = (u_1^\upsilon, \ldots, u_\kappa^\upsilon, \ldots, u_e^\upsilon)$ и $\mathbf{Z}^\upsilon = (Z_1^\upsilon, \ldots, Z_g^\upsilon, \ldots, Z_c^\upsilon)$, характеризующие, соответственно, сигналы на входах и выходах ЭТУ, входящие как элементы $\upsilon = \overline{1,h}$, где h — число элементов в составе ЭТС;

– выходные параметры $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \ldots, Y_j, \ldots, Y_m)$, характеризующие свойства ЭТС, интересующие потребителя. Они представляют собой параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \ldots, Z_g, \ldots, Z_c)$ 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].

ЭТС может находиться в различных состояниях. Определение категории «состояние» и анализ видов состояний применительно к различным ЭТС рассмотрены в работе [1]. Важнейшим состоянием, которое подлежит распознаванию при диагностировании технических систем, является *работоспособное состояние* (*работоспособность*). Под работоспособным состоянием обычно понимается состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Это определение закреплено ГОСТ 27.002-89 [4]. Вместе с тем, в ГОСТ Р 27.002-2009 [5] работоспособность изделия, под которым можно понимать ЭТС или отдельно взятое ЭТУ, определяется как состояние изделия, способное выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. Данное определение предполагает, что изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для одних функций и в неработоспособном состоянии для других. Таким образом, приведенное определение работоспособности фактически сводится к понятию правильного функционирования, которое было сформулировано в ГОСТ 20911-89 [6].

В настоящей работе, учитывая требования практики, под работоспособностью ЭТС будем понимать такое ее состояние, при котором значения параметров системы, характеризующих способность выполнять заданные функции, находятся в допустимых пределах. Эти пределы неразрывно связаны с условиями работоспособности ЭТС. Прежде чем дать словесную, аналитическую и геометрическую формулировки условий работоспособности ЭТС, введем в рассмотрение опорные значения параметров, характеризующих состояние ЭТС. Для первичных параметров **X** ЭТС такими опорными значениями являются:

$X_{\text{ном}}$ — номинальное значение, которое указывается в инструкциях по обслуживанию на основании расчетов или специальных испытаний для начального периода эксплуатации и служит началом отсчета отклонений. В том случае, если это значение установлено в результате выполнения операции оптимизации по какому-либо критерию, оно также называется *оптимальным значением параметра*;

$X_{\text{доп}}$ — допустимое значение, т. е. установленное инструкцией наибольшее или наименьшее значение параметра, при достижении которого, как правило, резко ухудшается качество функционирования ЭТС;

$X_{\text{пред}}$ — предельное значение, которое может быть обусловлено невозможностью его физической реализации (сопротивление резистора, например, может быть только положительным) или при котором теряется работоспособность функциональных узлов, находящихся на более низком иерархическом уровне относительно элементов рассматриваемой системы. Для ЭТС как совокупности ЭТУ элементами таких устройств, например, являются генератор линейно изменяющегося напряжения, фазосмещающее устройство и др. В пределе на самом низшем иерархическом уровне к таким функциональным узлам относятся активные комплектующие элементы: тиристоры, транзисторы, операционные усилители, оптроны и др. Для опорных значений параметров **X** справедливо соотношение вида

$$|X_{\text{ном}}| < |X_{\text{доп}}| \le |X_{\text{пред}}|.$$

Для выходных параметров **Y** и внутренних параметров $\mathbf{Z}^v$ к опорным параметрам относятся:

$Y_{\text{доп}}(Z^v_{\text{доп}})$ — допустимое, наибольшее или наименьшее значение параметра, которое определяется техническими требованиями, устанавливаемыми при составлении технического задания на стадии проектирования ЭТУ. Технические требования определяют допустимые уровни показателей качества при функционировании системы. Выход параметров $\mathbf{Y}(\mathbf{Z}^v)$ за установленные для них допустимые пределы приводит к потере работоспособности ЭТС, однако это не означает потерю способности системы выполнять все возложенные на нее функции, а ведет лишь к снижению эффективности ее использования по назначению;

$Y_{\text{пред}}(Z^v_{\text{пред}})$ — предельное значение параметра, т. е. такое расчетное наибольшее или наименьшее его значение, при достижении которого наступает предельное состояние системы и функционирование ее с точки зрения выполнения возложенных на нее функций становится невозможным;

$Y_{\text{кр}}(Z^v_{\text{кр}})$ — критическое значение параметра, при котором работа системы принципиально невозможна.

Для опорных значений выходных параметров **Y** ЭТС и выходных параметров $\mathbf{Z}^v$ ЭТУ выполняется соотношение

$$|Y_{\text{доп}}(Z^v_{\text{доп}})| < |Y_{\text{пред}}(Z^v_{\text{пред}})| \le |Y_{\text{кр}}(Z^v_{\text{кр}})|.$$

Важным результатом анализа является ответ на вопрос о том, выполняются ли условия работоспособности, под которыми понимаются необходимые условия безотказной работы ЭТС, выраженные в виде неравенства.

Можно выделить внешние и внутренние условия работоспособности, устанавливаемые при проектировании ЭТС [7]. Под *внешними условиями* работоспособности будем понимать условия, выполнение которых необходимо для того, чтобы ЭТС функционировала с требуемыми показателями качества. Данные условия определяются заданными соотношениями между выходными параметрами Y системы и техническими требованиями к ним. Под *внутренними условиями* работоспособности будем понимать условия, при которых ЭТУ как элементы ЭТС способны выполнять возложенные на них функции, сохраняя при этом работоспособное состояние. Данные условия определяются заданными соотношениями между внутренними параметрами $\mathbf{Z}^v$ ЭТУ и их допустимыми значениями, а также между первичными параметрами системы **X** и их предельными значениями.

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

$$\begin{aligned} &Y_{j\min} \le Y_j = F_j(\mathbf{X}) \le Y_{j\max},\ j = \overline{1,m};\\ &Z^v_{j\min} \le Z^v_j = F^v_j(\mathbf{X}) \le Z^v_{j\max},\ v = \overline{1,h};\\ &X_{i\min} \le X_i \le X_{i\max},\ i = \overline{1,n}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $Y_{j\max}(Z^{v}_{j\max})$, $Y_{j\min}(Z^{v}_{j\min})$, $Y_j(Z^{v}_j)$ — соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значения j-го выходного (внутреннего) параметра; $F_j(\mathbf{X})$ и $F^{v}_j(\mathbf{X})$ — операторы связи первичных параметров ЭТС с ее выходными Y и внутренними Z параметрами соответственно.

Первое неравенство в системе неравенств (1) является внешним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область $D_Y = \bigcap_{j=1}^{m} D_j$ пространства выходных параметров. Область D_Y имеет вид m-мерного бруса евклидова пространства R^m. Каждому ограничению $D_j = D_{j\min} \bigcap D_{j\max}$ значений выходных параметров, определяемому неравенствами $D_{j\min} = F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ и $D_{j\max} = Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$, $j=\overline{1,m}$ в n-мерном евклидовом пространстве R^n первичных параметров, соответствует область M_j (при одностороннем ограничении — гиперповерхность). Это соотношение можно представить в виде отображения $\Phi_{YX} : D_Y \to M_Y$ множеств $D_Y = \bigcap_{j=1}^{m} D_j$ и $M_Y = \bigcap_{j=1}^{m} M_j$.

Второе неравенство в системе неравенств (1) является внутренним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область $D_Z = \bigcap_{v=1}^{h} D_v$, $v = \overline{1,h}$ пространства внутренних параметров $\mathbf{Z}^v$, которая по виду соответствует области D_Y. Аналогично ранее изложенному, каждому ограничению D_v, согласно отображению $\Phi_{ZX} : D_Z \to M_Z$, в пространстве R^n соответствует допусковая область M_v. При этом $M_Z = \bigcap_{v=1}^{h} M_v$, $v = \overline{1,h}$.

Третье неравенство в системе неравенств (1) также является внутренним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область D_X, которая так же, как и области D_Y и D_Z, имеет форму бруса: $D_X = \left\{\mathbf{X} \in R^n | X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max},\ i = \overline{1,n}\right\}$. Множество $G = D_X \bigcap M_Z \bigcap M_Y$, являющееся пересечением областей D_X, M_Z и M_Y, называют *областью работоспособности*. Эта область определяет множество допустимых значений первичных параметров, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным и внутренним $\mathbf{Z}^v$ параметрам ЭТС.

Диагностическими параметрами в данной работе являются первичные параметры $\mathbf{X}$. Это обусловлено тем, что именно первичные параметры, в конечном счете, определяют состояние ЭТС. Кроме того, лишь в пространстве параметров $\mathbf{X}$ возможно определение важнейшего показателя системы запаса работоспособности, под которым понимается степень приближения вектора фактического состояния системы к его предельно допустимому значению [8]. Методы оценки состояния ЭТС в пространстве измеряемых характеристик, основанные на использовании информации о границе области работоспособности, в настоящей статье не рассматриваются и частично изложены в работах [9], [10].

Для оценки состояния ЭТС в пространстве первичных параметров требуется установить, находятся ли измеренные значения параметров $\mathbf{X}$ в области работоспособности. Область работоспособности может быть задана в виде множества граничных точек или в виде гиперповерхности, ограничивающей область допустимых значений первичных параметров. Для задания области работоспособности массивом граничных точек разработаны методы и реализующие их алгоритмы, основанные на дискретном и непрерывном поиске координат этих точек [7]. Для технической реализации методов поиска и хранения граничных точек требуется достаточно большой объем памяти. Вместе с тем вычислительные возможности современных компьютеров позволяют реализовывать разработанные алгоритмы поиска граничных точек при достаточно большом числе первичных параметров [7], [11]. Точное решение задачи описания области работоспособности гиперповерхностью возможно лишь для простейших систем с небольшим числом параметров [7].

Области работоспособности ЭТС обычно имеют сложную форму и могут быть *невыпуклыми* и *неодносвязными* [7]. В целях контроля состояния системы и для решения задач параметрического синтеза [8] реальную область работоспособности аппроксимируют более простыми фигурами. Известно три основных способа аппроксимации области работоспособности [7].

Первый способ предполагает замену области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом), грани которого параллельны осям координат. Построенная таким образом область работоспособности 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. Если все первичные параметры находятся в пределах своих допусков, то принимается решение о работоспособности системы [12]. Данный способ является наиболее известным и широко применяемым на практике. Вместе с тем, этому способу присущи два существенных недостатка. Во-первых, задача построения гиперпараллелепипеда (бруса) является достаточно сложной и для общего случая, когда область работоспособности является неодносвязной, применительно к рассматриваемой задаче не имеет решения. Во-вторых, и это самое существенное, с ростом размерности пространства первичных параметров методическая погрешность такой аппроксимации резко нелинейно возрастает. Полученные оценки методической погрешности [7] позволяют сделать вывод о том, что при числе параметров $n = 5$ погрешность такой аппроксимации может превышать 90 %. Таким образом, несмотря на свою относительную простоту, данный подход не рекомендуется к использованию для оценки состояния ЭТС.

Второй способ предполагает переход от независимых допусков к зависимым допускам, в виде линейных ограничений. Область работоспособности при этом аппроксимируется линейными гиперповерхностями, что позволяет существенно снизить методическую погрешность. Известные алгоритмы решения задачи рассмотрены в работе [7]. Для аппроксимации области работоспособности линейно-зависимыми допусками, она должна быть задана множеством граничных точек. Известно несколько методов и реализующих их алгоритмов, которые позволяют решить эту задачу. Все они делятся на методы дискретного и непрерывного поиска граничных точек [7].

Третий способ позволяет получить наиболее точную аппроксимацию области работоспособности. Его идея заключается в независимой друг от друга аппроксимации каждой из гиперповерхностей, составляющих область работоспособности. Для этой цели удобно использовать методы планирования эксперимента [13]. Далее, используя свойства логических *R*-функций, в качестве которых, например, выступают полученные в результате проведенного активного эксперимента полиноминальные зависимости, формируется единая аналитическая зависимость, которая с высокой точностью аппроксимирует область работоспособности. Форма области работоспособности при этом может быть произвольной [7], [14].

При разработке методов оценки состояния ЭТС необходимо учитывать исходные данные, размерность системы и априорную информацию о форме и задании области работоспособности. Будем считать, что известны координаты диагностируемых параметров $\mathbf{X}_t$, определяющих точку R_t в их пространстве. Такую информацию обычно получают экспериментальным путем на основе использования разработанных методов идентификации ЭТС, рассмотренных в работах [15], [16].

Методы контроля состояния ЭТС должны иметь критерии, позволяющие распознавать принадлежность любой произвольной точки R_t области работоспособности и оценивать запас работоспособности системы.

При контроле состояния ЭТС по независимым допускам задача решается весьма просто. Координаты точки R_t 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.

Рассмотрим возможные методы решения поставленной задачи.

1. Метод последовательного перебора граничных точек области работоспособности. Данный метод предполагает, что область задана множеством граничных точек. При отсутствии информации, определяющей количественную связь между первичными и выходными параметрами ЭТС, с целью распознавания принадлежности точки R_t области работоспособности объективно требуется натурный эксперимент и соответствующая измерительная аппаратура для проверки условий работоспособности (1). Исследования показали, что можно предложить альтернативные, значительно более удобные и эффективные правила распознавания. Для рассматриваемого случая, когда область работоспособности задана множеством граничных точек, можно воспользоваться методами механической и электрической аналогии [8], разработанными для решения задачи параметрического синтеза ЭТС по критерию запаса работоспособности.

Рассмотрим наиболее общий случай, когда область работоспособности имеет произвольную форму. Оптимальное значение внутренней точки R_0 при этом определяется в процессе поиска по целевой функции:

$$F = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(1\Big/\sum_{i=1}^{n}\left(R_i - X_{ik}\right)^2\right), \qquad (2)$$

где N — общее число граничных точек области работоспособности, задающих ее границу ∂G; n — число первичных (диагностических) параметров; X_{ik} — координаты граничных точек.

Значения функции F вычисляются в точках R_0 (если это значение априорно неизвестно) и R_t. Если $F(R_0) < F(R_t)$, то точка находится вне области работоспособности. В противном случае требуется дополнительный анализ. Если на отрезке прямой, соединяющей точки R_0 и R_t, функция F монотонно уменьшается от значения $F(R_0)$ к значению R_t, то исследуемая точка принадлежит области работоспособности и ЭТС находится в работоспособном состоянии.

Для проверки данного условия достаточно вычислить значение функции F в точке R_1 с координатами, отличающимися от координат точки R_t на величину ΔX_i в направлении к точке R_0. Если $F(R_1) < F(R_t)$, то точка находится в области работоспособности. Действительно, в точке $R_г$ функция F претерпевает разрыв (рис. 1), ее значение стремится к бесконечности. Между точками R_0 и $R_г$ и точками R_t и $R_г$ функция F, как следует из выражения (2), при движении от точки R_0 к точке $R_г$ и от точки R_t к точке $R_г$ является монотонно возрастающей. Таким образом, если условие $F(R_1) < F(R_t)$ не выполняется, то это противоречит исходному утверждению.

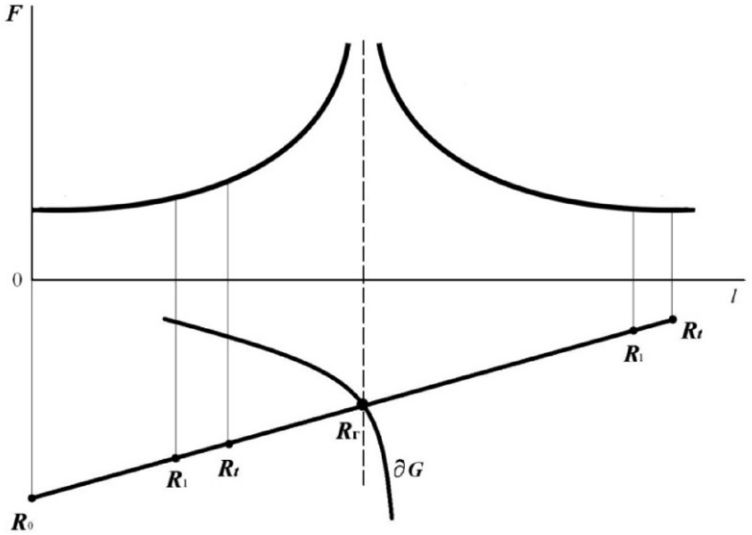

Рис. 1. Форма *F*-критерия для распознавания состояния ЭТС

Для оценки запаса работоспособности данный метод предполагает последовательный анализ всех граничных точек и вычисление расстояний в евклидовом пространстве R^n между каждой

граничной точкой и текущей точкой R_t, определяющей состояние ЭТС в данный момент времени. Наименьшее расстояние, при условии нахождения точки в области работоспособности, будет определять запас работоспособности ЭТС.

Метод требует больших вычислительных и, соответственно, временных затрат. Его идея проста и реализована в виде устройства для определения состояния технических объектов [17]. При числе диагностических параметров $n > 2$ использование данного метода нецелесообразно.

В том случае, если область работоспособности является выпуклой, а также известны координаты оптимальной по критерию запаса работоспособности точки R_0, затраты времени на решение задачи можно существенно сократить, исключив из рассмотрения граничные точки, которые являются для этого случая избыточными.

Суть предлагаемого алгоритма сводится к следующему. Через точку R_0 проводятся взаимно перпендикулярные плоскости $H_1, H_2, \ldots, H_n$, разбивающие область работоспособности на 2^n подобластей $(G_1, G_2, \ldots, G_2^n) \in G$. Далее определяется подобласть $G_i \in G$, которой принадлежит точка R_t. С этой целью определяется знак каждой из координат:

$$(\text{sign}X_i > 0) \vee (\text{sign}X_i < 0), i = \overline{1,n}$$

и на основании полученной информации идентифицируется принадлежность точки R_t к некоторой подобласти G_i.

Граничную точку области работоспособности, наиболее близко расположенную к точке R_t, определяющей состояние ЭТС в рассматриваемый момент времени, назовем *близлежащей точкой*.

Сформулируем и докажем следующую теорему. Если в n-мерном пространстве R^n первичных параметров задана область работоспособности G, точка R_0, определяющая максимально возможный запас работоспособности l_0, и точка R_t, соответствующая реальному техническому состоянию ЭТС в рассматриваемый момент времени, то близлежащая граничная точка $R_t^г$ не принадлежит подобласти $G_i \in G$, координаты точек которой $A_1, ..., A_N$ противоположны по знаку координатам точки R_t.

Для любой граничной точки области работоспособности справедливо неравенство

$$l_г \geq l_0. \tag{3}$$

Предположим противное. Пусть близлежащая граничная точка $R_t^г$ принадлежит подобласти G_i. При этом $R_t^г \in \{A_1, \ldots, A_N\}$, тогда можно записать:

$$l_0 = \sqrt{X_{1г}^2 + \ldots + X_{iг}^2 + \ldots + X_{mг}^2}; \tag{4}$$

$$l_г = \sqrt{X_{1t}^2 + \ldots + X_{it}^2 + \ldots + X_{mt}^2}, \tag{5}$$

где $X_{1г}, ..., X_{iг}, ..., X_{mг}$ — координаты точки $R_t^г$; $X_{1t}, ..., X_{it}, ..., X_{mt}$ — координаты точки R_t.

Так как по условию теоремы $X_{iг}$ и X_{it} имеют разные знаки, каждое слагаемое подкоренного выражения (4) больше, чем величина соответствующего слагаемого подкоренного выражения (5). Отсюда следует, что $l_г < l_0$, что противоречит условию (3). Следовательно, предположение о принадлежности ближайшей граничной точки подобласти G_i является ложным и точка $R_t^г$ не принадлежит подобласти G_i.

Использование предлагаемого алгоритма позволяет существенно сократить число граничных точек области работоспособности, которые используются для анализа при определении запаса работоспособности ЭТС.

2. Адаптивный метод матричного поиска. Метод предполагает, что каждая из функций-ограничений неравенства (1): $Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$, аппроксимирована конечным множеством линейных гиперповерхностей f_j, и допусковая область M задана следующей системой неравенств:

$$\sum_{j=1}^{2m} f_j(\mathbf{X}) \geq 0;\ f_j(\mathbf{X}) = b_{j0} + \sum_{i=1}^{n} b_{ji} X_i \geq 0.$$

Для формирования правила распознавания состояния ЭТС воспользуемся свойствами логических R-функций, к которым относятся линейные гиперповерхности $f_j(\mathbf{X})$ [3]. При этом область работоспособности может быть задана следующим неравенством:

$$(((\varphi_1 \wedge^k_{\alpha 1} \varphi_2) \wedge^k_{\alpha 2} \varphi_3) \wedge^k_{\alpha 3} \ldots) \wedge^k_{\alpha(g-1)} \varphi_d = \wedge^k_{\alpha(g)} \varphi_g \geq 0, \quad \underset{g=1}{\overset{d}{}} \tag{6}$$

где $\wedge^k_{\alpha(g)}$ — R-конъюнкция R-функций φ_g, обеспечивающая возможность взятия k производных; $\alpha(g)$, $g = \overline{1,d}$ — величины, принадлежащие интервалу $\alpha(g) \in [-1; 1]$.

Если все ограничения (1) являются двухсторонними, то $d = 2(m+n)$. При этом для функций-ограничений $f_j(\mathbf{X}): Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ – $\varphi_g = f_j(\mathbf{X})$, $g = j$, $j = \overline{1,2m}$, а для функций-ограничений $f_i(\mathbf{X})$: $X_{i\max} - X_i \geq 0$ и $X_i - X_{i\min} \geq 0$ – $\varphi_g = f_i(\mathbf{X})$, $g = i$, $i = \overline{1,2n}$. В формуле (6) могут быть опущены скобки и конечный результат не будет зависеть от последовательности свертки R-функций φ_g.

Для построения R-конъюнкции можно воспользоваться формулой [7]:

$$\varphi_1 \wedge \varphi_2 = 0{,}5\left(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|\right). \tag{7}$$

В развернутой форме записи функция $G(\mathbf{X})$, аналитически описывающая область работоспособности G, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} G(X) = \varphi_{(d)} = 0{,}5\left(\varphi_{(d-1)} + \varphi_d - |\varphi_{(d-1)} - \varphi_d|\right); \\ \varphi_{(d-1)} = 0{,}5\left(\varphi_{(d-2)} + \varphi_{d-1} - |\varphi_{(d-2)} - \varphi_{d-1}|\right); \\ \ldots \\ \varphi_{(g)} = 0{,}5\left(\varphi_{(g-1)} + \varphi_g - |\varphi_{(g-1)} - \varphi_g|\right); \\ \ldots \\ \varphi_{(3)} = 0{,}5\left(\varphi_{(2)} + \varphi_3 - |\varphi_{(2)} - \varphi_3|\right); \\ \varphi_{(2)} = 0{,}5\left(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|\right). \end{cases} \tag{8}$$

Приравнивая функцию $G(\mathbf{X})$ нулю, получим уравнение $G(\mathbf{X}) = 0$, описывающее границу области работоспособности ЭТС. Записывая функцию $G(\mathbf{X})$ в виде R-конъюнкции функций $M(\mathbf{X})$ и $P(\mathbf{X})$, которые описывают, соответственно, области M и P, получим

$$G(\mathbf{X}) = 0{,}5\left(M(\mathbf{X}) + P(\mathbf{X}) - |M(\mathbf{X}) - P(\mathbf{X})|\right) \geq 0. \tag{9}$$

Для аналитического описания областей M и P в системе уравнений (8) нужно произвести следующие замены: $g = j$, $d = 2m$, $G(\mathbf{X}) = M(\mathbf{X})$ — для описания области M и $g = i$, $d = 2n$, $G(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X})$ — для описания области P. В случае если $m = n = 2$, а первичные параметры заданы в относительных единицах, причем $X_{1\min} = X_{2\min} = -1$, $X_{1\max} = X_{2\max} = 1$, области P и M запишутся в виде следующих неравенств:

$$P(\mathbf{X}) = 0{,}5(2 - |X_1| - |X_2| - ||X_2| - |X_1||) \geq 0;$$

$$\begin{aligned} M(\mathbf{X}) = 0{,}25(&Y_{1\max} + Y_{2\max} - Y_{1\min} - Y_{2\min} - |2F_1(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}| - \\ &- |2F_2(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |Y_{1\max} + Y_{2\min} - Y_{1\min} - Y_{2\max} + \\ &+ |2F_1(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |2F_2(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}||) \geq 0. \end{aligned}$$

В работе [18] получено уравнение границы области G_μ, расположенной эквидистантно области G и внутри нее. При этом граничные точки областей Gи G_μ располагаются относительно друг друга по направлению градиента к функции $G(\mathbf{X})$ на одинаковом расстоянии l.

Рассмотрим две граничные точки: $N \in f_j(\mathbf{X}) \in M$ и $N^{\mu} \in f_j^{\mu}(\mathbf{X}) \in M_{\mu}$. Координаты точки N^{μ} можно выразить через координаты точки N по формуле

$$X_i^{\mu} = X_i + \frac{\left(\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i\right)l}{\left|\operatorname{grad} f_j(\mathbf{X})\right|} = X_i + \frac{b_{ji}}{\left|\operatorname{grad} f_j(\mathbf{X})\right|}l, \quad \operatorname{grad} f_j(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} b_{ji}^2},$$

откуда

$$f_j^{\mu}(\mathbf{X}) = f_j(\mathbf{X}) - \left|\operatorname{grad} f_j(\mathbf{X})\right| l. \tag{10}$$

Область M_{μ} аналитически описывается аналогично области M по формуле (8), в которой $\varphi_g = f_j^{\mu}(\mathbf{X})$, а функция M заменяется функцией M_{μ}. В том случае, если граничная точка принадлежит области P, координаты точки N^{μ} определяются выражением $X_i^{\mu} = X_i \pm l$. Аналитическое описание области P_{μ} аналогично описанию области P, при этом $\varphi_g = f_i^{\mu}(\mathbf{X})$. Из формулы (6) следует, что $G_{\mu} = 0{,}5\left(M_{\mu} + P_{\mu} - \left|M_{\mu} - P_{\mu}\right|\right) \geq 0$.

Критерий распознавания состояния ЭТС имеет следующий вид:

$$G_l(\mathbf{X}) = 0{,}5\left(M_l(\mathbf{X}) + P_l(\mathbf{X}) - \left|M_l(\mathbf{X}) + P_l(\mathbf{X})\right|\right). \tag{11}$$

В формуле (11) функция $M_l(\mathbf{X})$ вычисляется аналогично функции $M_{\mu}(\mathbf{X})$. Для этого в формуле (8), как это доказано в работе [18], следует заменить φ_g на $\varphi_j^l(\mathbf{X})$, а вместо $M(\mathbf{X})$ писать $M_l(\mathbf{X})$. Функция $P_l(\mathbf{X})$ тождественно равна функции $P_{\mu}(\mathbf{X})$.

Пример. Пусть первичные параметры ЭТС выражены в относительных единицах, область работоспособности совпадает с областью M и определяется ограничениями:

$$f_1(X_1, X_2) = X_1 + 4X_2 - 1 \geq 0;\ f_2(X_1, X_2) = -X_1 + 2X_2 + 0{,}2 \geq 0;$$
$$f_3(X_1, X_2) = 3X_1 - 2X_2 + 0{,}2 \geq 0;\ f_4(X_1, X_2) = -7X_1 - 6X_2 + 8{,}8 \geq 0;$$
$$G(\mathbf{X}) = f_1(X_1, X_2) \wedge f_2(X_1, X_2) \wedge f_3(X_1, X_2) \wedge f_4(X_1, X_2).$$

На основании (5) целевая функция будет иметь следующий вид:

$$G_l(\mathbf{X}) = 0{,}5\left(\varphi_{12}(X_1, X_2) + \varphi_{34}(X_1, X_2) - \left|\varphi_{12}(X_1, X_2) - \varphi_{34}(X_1, X_2)\right|\right);$$
$$\varphi_{12}(X_1, X_2) = 0{,}5\left(\varphi_1(X_1, X_2) + \varphi_2(X_1, X_2) - \left|\varphi_1(X_1, X_2) - \varphi_2(X_1, X_2)\right|\right);$$
$$\varphi_{34}(X_1, X_2) = 0{,}5\left(\varphi_3(X_1, X_2) + \varphi_4(X_1, X_2) - \left|\varphi_3(X_1, X_2) - \varphi_4(X_1, X_2)\right|\right);$$
$$\varphi_1(X_1, X_2) = f_1(X_1, X_2)/\operatorname{grad} f_1(X_1, X_2) - l = \left(X_1 + 4X_2 - 1\right)/\sqrt{17};$$
$$\varphi_2(X_1, X_2) = f_2(X_1, X_2)/\operatorname{grad} f_2(X_1, X_2) - l = \left(-X_1 + 2X_2 + 0{,}2\right)/\sqrt{5};$$
$$\varphi_3(X_1, X_2) = f_3(X_1, X_2)/\operatorname{grad} f_3(X_1, X_2) - l = \left(3X_1 - 2X_2 + 0{,}2\right)/\sqrt{13};$$
$$\varphi_4(X_1, X_2) = f_4(X_1, X_2)/\operatorname{grad} f_4(X_1, X_2) - l = \left(-7X_1 - 6X_2 + 8{,}8\right)/\sqrt{85}.$$

Оценка состояния ЭТС осуществляется следующим образом. Если вычисленное значение функции $G_l(\mathbf{X})$ положительное, то ЭТС находится в работоспособном состоянии, если отрицательное, то система неработоспособна. Если значения параметров $\mathbf{X}$ выражены в относительных единицах, то вычисленное значение функции будет характеризовать относительное значение запаса работоспособности ЭТС, принадлежащее интервалу [–1; 1].

Для определения запаса работоспособности метод предполагает последовательное зондирование пространства R^n диагностических параметров $\mathbf{X}$ ЭТС. Направления зондирования определяются заданной исходной матрицей M($\mathbf{X}$) координат первичных параметров, а величина отклонения опытных точек от исходного значения $\mathbf{X}_t$ зависит от результатов предыдущих опытов. Матрица M($\mathbf{X}$) включает $N = 2^n + 2n$ направлений поиска. Выбор числа N обусловлен тем, что при аналитическом описании гиперповерхностей $f_j(\mathbf{X})$, составляющих область работоспособности ЭТС, в большинстве случаев используются полиномы второго порядка, для построения которых используется N точек, составляющих ядро и звездные точки планов второго порядка. При этом точность аппроксимации области работоспособности будет соизмеримой с точностью поиска ве-

личины запаса работоспособности ЭТС. Предлагаемый алгоритм, реализующий данный метод, поясняется блок-схемой (рис. 2).

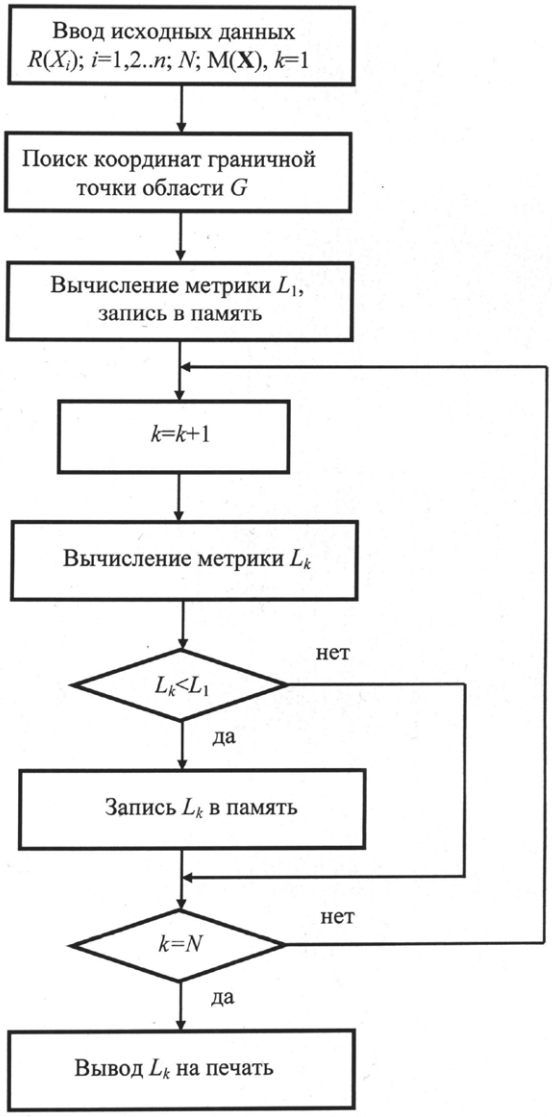

Рис. 2. Алгоритм адаптивного матричного поиска запаса работоспособности ЭТС

Вначале осуществляется поиск расстояния от точки с координатами $\mathbf{X}_t$ до границы области работоспособности в положительном направлении изменения координаты параметра X_1 при фиксированных значениях остальных параметров. В целях поиска предлагается использование метода «золотого сечения», имеющего наибольшую эффективность среди известных одномерных методов поиска экстремума унимодальных функций [19]. Полученное значение l_1 записывается в память компьютера. На последующих N-1 этапах поиска в качестве величины l_i, i = 1, 2, … , N-1 выбирается наименьшее из полученных значений l_i на предыдущих этапах поиска. Для оценки принадлежности исследуемой точки области работоспособности используется функция $G(\mathbf{X})$.

3. Оценка состояния ЭТС на основе метода сужающихся областей. Метод сужающихся областей разработан для решения задачи параметрического синтеза ЭТС по критерию запаса работоспособности [8], [20]. Основным достоинством рассматриваемого метода является принципиальная возможность поиска глобального оптимума при произвольной форме области работоспособности. Метод предусматривает последовательное сужение исходной области работоспособности до тех пор, пока она не выродится в точку. Для аналитического описания границы области работоспособности G_1, G_2, … G_k, …, G_s, на каждом k-м шаге поиска используется математический

аппарат *R*-функций [7]. Указанным областям соответствуют запасы работоспособности ЭТС l_1, l_2, … , l_k, … , l_s (в относительных единицах λ_1, λ_2, …, λ_k, …, λ_s). Например, при $S = 3$ для подобластей $G_1 : \lambda_1 \in [0;\ l_1/l_0]$; $G_2 : \lambda_2 \in [l_1/l_0\,;\ l_2/l_0]$; $G_3 : \lambda_3 \in [l_2/l_0\,;\ 1]$. Для диагностирования состояния ЭТС достаточно по рассмотренному ранее критерию установить принадлежность вектора фактического состояния системы $\mathbf{X}_t$, определяемого координатами точки R_t той или иной области G_k.

В том случае, если информация о границах областей G_1, G_2, …, G_k, …, G_s отсутствует и имеется только аналитическое описание области работоспособности, причем каждая составляющая ее гиперповерхность аппроксимирована классом гиперсфер [7], [21], предлагается использовать следующий алгоритм оценки состояния ЭТС.

На первом этапе определяется принадлежность или непринадлежность точки R_t, области работоспособности. Для этого координаты исследуемой точки подставляются в формулу аналитического описания области работоспособности на основе логических *R*-функций. При этом, как отмечалось выше, положительный результат означает, что точка принадлежит области работоспособности и ЭТС находится в работоспособном состоянии. В противном случае ЭТС неработоспособна.

На втором этапе определяется гиперсфера, которая является ближайшей к точке R_t,. В работе [21] доказано, что для этой цели достаточно сравнить численные значения *R*-функций, определяющие каждую гиперсферу, при подстановке в их выражения координат точки R_t. Меньшее значение определит гиперсферу, которая останется для дальнейшего анализа.

На третьем этапе определяется запас работоспособности l ЭТС. Легко видеть, что

$$l = |R - L|,$$

где *R* — радиус гиперсферы, оставленной для анализа; *L* — расстояние между точкой R_t и центром гиперсферы.

Рассмотренный алгоритм отличается малыми затратами времени и возможностью практической реализации при большом числе диагностических параметров. При $n > 10$ его достоинства часто являются решающими при выборе алгоритма контроля ЭТС.

В заключение рассмотрим алгоритм, позволяющий уточнить полученную с помощью рассмотренных ранее методов оценку запаса работоспособности ЭТС. При этом шаг поиска алгоритма, реализующего процедуру спиральной развертки, определяется необходимой погрешностью вычисления запаса работоспособности ЭТС.

Алгоритм спиральной развертки был разработан для решения задачи поиска первой граничной точки, принадлежащей области работоспособности при ее задании в виде множества граничных точек и изложен в работах [7], [22]. Геометрическая иллюстрация метода приведена на рис. 3.

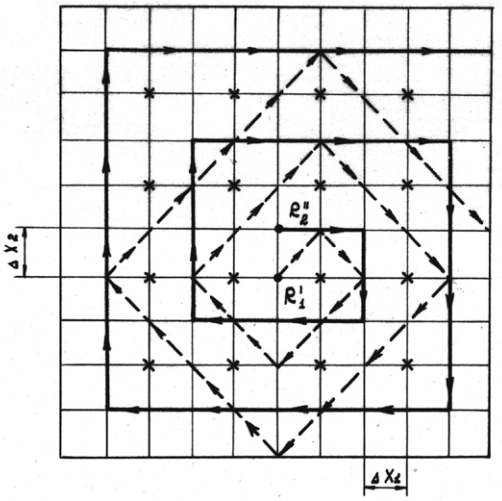

Рис. 3. Графическая реализация метода спиральной развертки:
—— показана спиральная развертка, осуществляемая с двойным шагом;
– – – – спиральная развертка по диагонали;
* — точки, исключенные из рассмотрения на основании доказанной в работе [7] теоремы

Выбор точек для анализа принадлежности их области G осуществляется по спирали, начиная с точек R_1' и R_1'' по следующему правилу:

$$R\nu = 0{,}125\Delta X_i'\left[2\nu'+1+(-1)^{(\nu'-1)}\right](-1)^{(\nu''-1)}\left[(-1)^{(\nu-1)}+1\right]+$$
$$+\,0{,}125\Delta X_i\left[2\nu'+1+(-1)^{(\nu'-1)}\right](-1)^{(\nu''-1)}\left[(-1)^{\nu}+1\right];$$
$$i = 0{,}5(-1)^{\nu'}+1{,}5;\ \nu' = \mathbf{E}(0{,}5\nu+0{,}5);\ \nu'' = \mathbf{E}(0{,}25\nu+1);\nu = 1, 2, 3\ldots .$$

Переход от координат $0X_1'X_2'$ к координатам $0X_1X_2$ выполняется по известным формулам [7], и для угла поворота между осями X_i' и X_i, равного 0,25π, получим $X_1' = (X_1 + X_2)/\sqrt{2}$ и $X_2' = (X_1 - X_2)/\sqrt{2}$.

Выводы

1. Рассмотренные в работе методы и алгоритмы диагностирования состояния ЭТС позволяют с высокой достоверностью не только оценить работоспособность системы, но и определить запас ее работоспособности.

2. Эффективность алгоритмов была подтверждена тестовыми примерами и исследованиями реальных ЭТС, включая элементы автоматизированных электроприводов и системы их управления.

3. Достоинством алгоритмов является не только их низкая методическая погрешность, но и малые затраты времени на их программную и техническую реализацию, что позволяет диагностировать многопараметрические ЭТС в режиме онлайн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саушев А. В.* Методы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 215 с.

2. *Елтышев Д. К.* Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования / Д. К. Елтышев // Информатика и системы управления. — 2015. — № 1 (43). — С. 72–82.

3. *Саушев А. В.* Морфологический анализ категории электротехническая система / А. В. Саушев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 193–201.

4. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990.

5. ГОСТ 27.002–2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990.

6. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 1990.

7. *Саушев А. В.* Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.

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

9. *Саушев А. В.* Идентификация и контроль состояния систем управления на основе информации о границе области работоспособности / А. В. Саушев // Материалы Международной науч.-техн. конференции «Автоматический контроль и автоматизация технологических процессов». — Минск: Белорусский гос. тех. ун-т, 2012. — С. 151–155.

10. *Саушев А. В.* Метод оценки состояния электротехнических систем на стадии эксплуатации / А. В. Саушев // Материалы XI Международной науч.-практ. конференции. «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий». — М.: НИУ ВШЭ, 2014. — С. 489–491.

11. *Катуева Я. В.* Алгоритмы анализа области работоспособности, заданной в матричной форме / Я. В. Катуева, Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. — 2005. — № 2 (10). — С. 118–128.

12. *Абрамов О. В.* Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2011. — № 2. — С. 4–15.

13. *Саушев А. В.* Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: СПб. гос. ун-т водных коммуникаций, 2012. — 272 с.

14. *Саушев А. В.* Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем / А. В. Саушев // Информатика и системы управления. — 2012. — № 3. — С. 120–131.

15. *Алексеев А. А.* Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. — М.: Академия, 2009. — 352 с.

16. *Нивин А. Е.* Синтез ортогональных фильтров при статистической идентификации динамических систем / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Приборостроение. — 2013. — № 10. — С. 5–11.

17. Пат. SU 1354163 A1 СССР, G 05 B 23/02. Устройство для диагностирования технического объекта / В. А. Воловиков, И. А. Краснов, А. В. Саушев, Н. В. Широков. — № 1354163; Заявл. 31.03.1986; Опубл. 23.11.1987. Бюл. № 43. — 5 с.

18. *Саушев А. В.* Параметрический синтез технических систем на основе линейной аппроксимации области работоспособности / А. В. Саушев // Автометрия. — 2013. — Т. 49. — № 1. — С. 61–67.

19. *Реклейтис Г.* Оптимизация в технике: в 2 т. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 351 с.

20. *Саушев А. В.* Метод и алгоритмы параметрического синтеза электротехнических систем по критерию запаса работоспособности / А. В. Саушев // Информационные технологии. — 2012. — № 12. — С. 24–29.

21. *Саушев А. В.* Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев. // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.

22. *Саушев А. В.* Комплексный подход к проблеме повышения параметрической надежности систем управления судовых электростанций / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А. Н. Крылова «Вопросы обеспечения надежности и диагностирования судовых технических средств». — 1988. — № 454. — С. 18–23.

DIAGNOSING OF THE CONDITION OF ELECTROTECHNICAL SYSTEMS IN SPACE OF PARAMETERS OF THEIR ELEMENTS

One of the most important problems of technical diagnostics is definition of a condition of dynamic system in the course of its operation. In article methods of the solution of this task in relation to a class of electrotechnical systems are considered. Thus as diagnostic parameters the internal parameters of system defining a condition of its accessories of elements are considered. It is shown that information on working capacity area border is necessary for an assessment of a condition of system and definition of its stock of working capacity. In work the working capacity area task in the form of a set of boundary points, and also in the form of the analytical description of its border is considered. Rules of recognition of accessory or not accessory of a vector of an actual state of system of area of working capacity which are defined by a form of its task are received. Algorithms of calculation of a stock of operability of electrotechnical system are considered. Scopes of each algorithm which are caused by a working capacity area task form, its look and dimension of space of diagnostic parameters are defined. The developed methods and algorithms are approved on test examples and real electrotechnical systems.

Keywords: electrotechnical system, working capacity area, control of a state, working capacity stock, diagnostic parameters.

REFERENCES

1. Saushev, A. V. *Metody upravlenija sostojaniem jelektrotehnicheskih sistem obektov vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014.

2. Eltyshev, D. K. “Intellectualization of diagnostics of electric machinery.” *Information Science and Control Systems’* 1(43) (2015): 72–82.

3. Saushev, A. V. “Morphological analysis of category «Electrotechnical system».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 193–201.

4. Russian Federation. GOST 27.002–89. Nadezhnost v tehnike. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. M.: Izd-vo standartov, 1990.

5. Russian Federation. GOST 27.002–2009. Nadezhnost v tehnike. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. M.: Izd-vo standartov, 1990.

6. Russian Federation. GOST 20911–89. Tehnicheskaja diagnostika. Terminy i opredelenija. M.: Standartinform, 1990.

7. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskih sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.

8. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelektrotehnicheskih ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.

9. Saushev, A. V. "Identifikacija i kontrol sostojanija sistem upravlenija na osnove informacii o granice oblasti rabotosposobnosti." *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Avtomaticheskij kontrol i avtomatizacija tehnologicheskih processov»*. Minsk: Belorusskij gos. teh. un-t, 2012: 151–155.

10. Saushev, A. V. "Metod of an assessment of a condition of electrotechnical systems at an operation stage." *Materials of XI International Scientific and Practical Conference "Innovations based on Information and Communication Technologies"*. M.: NIU VShJe, 2014: 489–491.

11. Katuyeva, Ya. V., and D. A. Nazarov. "Analysis algorithms of work field given in matrix form." *Information Science and Control Systems* 2(10) (2005): 118–128.

12. Abramov, O. V. "Monitoring and forecasting of technical condition of systems of responsible appointment." *Information Science and Control Systems'* 2 (2011): 4–15.

13. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelektrotehnike*. SPb.: S.-Peterb. gos. un-t vodnyh kommunikacij, 2012.

14. Saushev, A.V. "Analytical method of tolerancing for parameters of dynamic systems." *Information Science and Control Systems'* 3 (2012): 120–131.

15. Alekseev, A. A., Ju. A. Korablev, and M. Ju. Shestopalov. *Identifikacija i diagnostika sistem*. M.: Akademija, 2009.

16. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. "Sintez ortogonalnyh filtrov pri statisticheskoj identifikacii dinamicheskih system." *Priborostroenie* 10 (2013): 5–11.

17. Volovikov V. A., I. A. Krasnov, A. V. Saushev, and N. V. Shirokov. Ustrojstvo dlja diagnostirovanija tehnicheskogo obekta. Patent 1354163. Publ. 23 Nov. 1987.

18. 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.

19. Reklejtis, G., A. Rejvindran, and K. Rjegsdel. *Optimizacija v tehnike. Tom 1*. M.: Mir, 1986.

20. Saushev, A. V. Metod and algorithms of parametrical synthesis of electrotechnical systems by criterion of a stock of working capacity *Information technologies* 12 (2012): 24–29.

21. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admissions of multiple parameter systems." *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.

22. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. "Kompleksnyj podhod k probleme povyshenija parametricheskoj nadezhnosti sistem upravlenija sudovyh jelektrostancij." *Sbornik nauchnyh trudov NTO im. akad. A. N. Krylova «Voprosy obespechenija nadezhnosti i diagnostirovanija sudovyh tehnicheskih sredstv»* 454 (1988): 18–23.

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
Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
shirokovn@inbox.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
Shirokov Nikolaj Viktorovich — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
shirokovn@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2016 г.