УДК 621.396.6.07.019.3

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ[1]

О.В. Абрамов

Рассмотрена проблема синтеза аналоговых технических систем, для обеспечения требуемых показателей качества функционирования и надежности которых необходимы элементы настройки. Основное внимание уделено выбору совокупности параметров, которыми наиболее целесообразно осуществлять настройку.

Ключевые слова: алгоритм, надежность, настройка, параметр, оптимизация, работоспособность, техническая система.

ВВЕДЕНИЕ

Один из широко распространенных способов обеспечения требуемых показателей качества функционирования и надежности технических систем заключается в настройке их параметров.

Несмотря на естественное стремление создавать технические объекты, не требующие настройки и регулировки, обойтись без настройки для широкого класса технических систем и устройств не удается и тенденции развития техники не позволяют надеяться, что в обозримом будущем эта проблема будет решена положительно. К числу технических объектов, в которых широко используется настройка и регулировка, относятся радиоэлектронные устройства (аппаратура связи, средства радиолокации и гидроакустики, измерительные приборы и устройства), системы автоматического управления и регулирования, средства мехатроники и др. Важное место занимает настройка и при управлении непрерывными технологическими процессами.

Настройка призвана скомпенсировать отклонения параметров технических объектов от расчетных значений, вызванные наличием производственных (технологических) разбросов, нестабильностью параметров, изменениями внешних условий и других воздействий.

Несмотря на распространенность настраиваемых объектов, теоретические аспекты синтеза таких систем и устройств рассмотрены в настоящее время еще недостаточно. Это приводит к тому, что вопросы настройки решаются, как правило, на интуитивно-эмпирическом уровне, а получаемые результаты зачастую далеки от оптимальных.

В большинстве работ, посвященных вопросам настройки, приведены результаты, относящиеся к технологическому процессу настройки конкретных типов устройств и систем, описываются алгоритмы настройки тех или иных технических объектов. Значительно меньше результатов получено по вопросам синтеза настраиваемых объектов. Практически отсутствуют формальные постановки таких задач, как выбор параметров настройки и диапазонов их изменения, недостаточно проработаны вопросы оптимального выбора значений настраиваемых параметров.

1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАСТРАИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

В соответствии с общей постановкой задачи параметрического синтеза [1] при проектировании настраиваемых объектов необходимо решить следующие основные задачи:

- выбрать оптимальную совокупность переменных (настроечных) параметров;
- определить целесообразные (необходимые) диапазоны их изменения;
- дать рекомендации по выбору значений переменных параметров, устанавливаемых при на-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ДВО РАН (Проекты 09-1-ОЭММПУ-01, 09-1-П2-03).

стройке (в общем случае определить стратегию настройки).

В данной статье остановимся на решении первой задачи.

Пусть $x_1, x_2, ..., x_n$ — набор параметров элементов (внутренних параметров) технического объекта. Набор n чисел $\mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ может быть представлен точкой в n-мерном евклидовом пространстве E^n.

Представим пространство внутренних параметров в виде прямой суммы подпространств: $E^n = R + S$, $R \cap S = \varnothing$, и потребуем, чтобы все элементы подпространства R были ортогональны элементам подпространства S. В этом случае каждое из подпространств будет ортогональным дополнением другого, и размерность $\dim E^n = \dim R + \dim S$.

В качестве R выберем пространство таких внутренних параметров, которые будут использоваться в качестве регулируемых (настроечных):

$$R = \{\mathbf{r}\},$$
$$\mathbf{r} = \{0, ..., x_{\alpha_1}, ..., 0, ..., x_{\alpha_2}, ..., x_{\alpha_k}, ..., 0\},$$

где $x_{\alpha_1}, x_{\alpha_2}, ..., x_{\alpha_k}$ — значения настроечных параметров.

Нетрудно заметить, что ортогональное дополнение S подпространства R образует такие векторы, для которых $x_{\alpha_1} = x_{\alpha_2} = ... = x_{\alpha_k} = 0$. Будем называть S подпространством нерегулируемых параметров. Таким образом, любой элемент $\mathbf{x} \in E^n$ однозначно разлагается в сумму векторов $\mathbf{x} = \mathbf{r} + \mathbf{x}_S$, $\mathbf{r} \in R$, $\mathbf{x}_S \in S$. Эти слагаемые будем называть проекциями вектора $\mathbf{x}$ на подпространства R и S соответственно.

Условия и ограничения, налагаемые на возможные изменения внутренних параметров (например, условия физической реализуемости, ограничения на возможные производственные и эксплуатационные отклонения параметров) зададут некоторую область Ω в E^n, которой должен принадлежать вектор $\mathbf{x}$ и которую назовем областью возможных значений внутренних параметров.

Пусть $D \in E^n$ — область допустимых изменений внутренних параметров, т. е. множество таких значений внутренних параметров, при которых выполняются условия работоспособности (область работоспособности). Если $\Omega \subset D$, то это означает, что при любых возможных отклонениях параметров от расчетных значений (при любых возможных эксплуатационных и производственных вариациях внутренних параметров) объект будет находиться в работоспособном состоянии и, следовательно, его настройка не требуется.

Необходимость настройки возникает, когда часть векторов $\mathbf{x} \in \Omega$ оказывается за пределами области работоспособности D.

Предположим, что каким-то образом определены (или заданы) параметры, которыми предполагается осуществлять настройку $\mathbf{r} = \{r_1, ..., r_k\}$. Настройка будет состоять в изменении параметров $r_1, ..., r_k$ в целях нахождения таких значений, при которых объект будет работоспособным. Другими словами, для каждого из векторов $\mathbf{x} \in \Omega$, находящихся вне области D, необходимо путем изменения (коррекции) вектора регулировочных параметров добиться, чтобы

$$\mathbf{x}^* = (\mathbf{x}_s + \mathbf{r}^*) \in D, \qquad (1)$$

где $\mathbf{x}^*$ — скорректированный (настроенный) вектор внутренних параметров; $\mathbf{r}^*$ — вектор переменных (настроечных) параметров, после настройки. В дальнейшем будем для простоты записывать результаты настройки в виде $\mathbf{x} + \mathbf{r}$.

Может оказаться, что при выбранных настроечных параметрах $\mathbf{r}$ не для всех точек (векторов) $\mathbf{x} \in \Omega$ удается обеспечить выполнения условия (1), т. е. некоторые векторы $\mathbf{x}$ будут ненастраиваемы совокупностью параметров $r_1, ..., r_k$.

Определение. Будем говорить, что вектор $\mathbf{x}$ *настраиваем* с помощью множества R, если существует такой вектор $\mathbf{r} \in R$, что $(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \in D$. ♦

В зависимости от того, каково множество векторов $\mathbf{x} \in \Omega$, настраиваемых с помощью выбранной совокупности настроечных параметров, можно говорить о *настроечной способности* (НС) множества R. В частности, если все $\mathbf{x} \in \Omega$ настраиваемы с помощью множества R, то выбранная совокупность настроечных параметров обеспечивает *полную настраиваемость* и, следовательно, обладает наибольшей (достаточной) настроечной способностью. Очевидно, необходимо ввести некоторый критерий, позволяющий оценить численно настроечную способность любой выбранной совокупности настроечных параметров. Докажем вначале следующую теорему.

Теорема. Для того чтобы вектор $\mathbf{x}$ был настраиваем, необходимо и достаточно, чтобы его проекция на подпространство ненастраиваемых параметров S принадлежала проекции области работоспособности D на это же подпространство: $\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D$.

Доказательство. Пусть $\mathbf{x}$ — настраиваем. Тогда $\mathbf{x} + \mathbf{r} \in D$, а $\underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D$. Проекция суммы векторов равна сумме проекций $\underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} + \mathbf{r}) = \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} + \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{r}$. Поскольку $\mathbf{r} \in R$, $\mathbf{r} = \mathbf{r} + 0$ $(0 \in S)$ и такое представление единственно, то $\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{r} = 0$ и $\underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} + \mathbf{r}) = \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x}$. Но $\underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D$, следовательно $\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D$. Необходимость доказана.

Пусть теперь $\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D$. Существует, очевидно, такой вектор $\mathbf{x}_1 \in D$, что $\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} = \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x}_1$. Рассмотрим вектор $\mathbf{x}—\mathbf{x}_1$. Его проекция на S равна нулю: $\underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) = \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} - \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x}_1 = 0$. Вектор $\mathbf{x}—\mathbf{x}_1$ можно представить в виде суммы проекций $\mathbf{x} - \mathbf{x}_1 = \mathbf{r} + \mathbf{x}_S$, где $\mathbf{r} \in R$, $\mathbf{x}_S \in S$. По определению $\mathbf{x}_S = \underset{S}{\text{Пр}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) = 0$, значит $\mathbf{x} - \mathbf{x}_1 = \mathbf{r}$, т. е. $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x} + (-\mathbf{r})$, но $\mathbf{x}_1 \in D$, $-\mathbf{r} \in R$, следовательно, точка $\mathbf{x}$ настраиваема. Достаточность доказана. ♦

Вектор $\mathbf{x}$ может принимать любые значения внутри области Ω. Пусть известно распределение вероятностей этого вектора, заданное плотностью распределения вероятностей $f(x_1, ..., x_n) = f(\mathbf{x})$.

Будем считать, что необходимость введения настроечных элементов обусловлена низким значением серийнопригодности P_0, т. е. вероятности выхода работоспособных изделий без настройки их параметров:

$$P_0 = \underbrace{\int ... \int}_{D} f(x_1, ..., x_n) dx_1 ... dx_n < P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{тр}}$ — требуемое значение серийнопригодности.

В случае, когда часть параметров отнесена к числу настроечных (выбран вектор настроечных параметров $\mathbf{r} = \{r_1, ..., r_k\}$), случайными остаются лишь ненастраиваемые параметры. Можно говорить, что случайная величина X порождает случайную величину $\mathbf{X}_S$, где $\mathbf{X}_S = \underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{X}$ и $\mathbf{X}_S \in \underset{S}{\text{Пр}}\,\Omega$.

Плотность распределения ненастраиваемых параметров

$$\varphi(\mathbf{x}_S) = \underbrace{\int ... \int}_{k} f(x_1, ..., x_n) dx_{\alpha_1}, dx_{\alpha_2} ... dx_{\alpha_k}.$$

В качестве количественной характеристики настроечной способности выбранной совокупности настроечных параметров (вектора $\mathbf{r}$) естественно принять вероятность того, что случайный вектор $\mathbf{x}$ настраиваем данным вектором настроечных параметров. Назовем ее *вероятностью успешной настройки* (ВУН) и будем обозначать $H_{\mathbf{r}}$.

В соответствии с доказанной теоремой

$$H_{\mathbf{r}} = P\Big(\underset{S}{\text{Пр}}\,\mathbf{x} \in \underset{S}{\text{Пр}}\,D\Big) =$$

$$= \underbrace{\overbrace{\int ... \int}^{n-k}}_{\underset{S}{\text{Пр}}\,D} \varphi(\mathbf{x}_{S_1}, ..., \mathbf{x}_{S_{n-k}}) d\mathbf{x}_{S_1} ... \mathbf{x}_{S_{n-k}}.$$

Введение понятий настроечной способности и ВУН позволяет количественно оценить, насколько тот или иной параметр (группа параметров) пригодны для компенсации возможных случайных отклонений параметров, сравнивать НС отдельных параметров или группы параметров, выбирать настроечные параметры, обеспечивающие требуемую или максимальную настраиваемость. Вместе с тем необходимо учитывать, что сделать переменными (регулируемыми) одни параметры легче, другие — труднее, а некоторые (например, параметры микросхем и других активных компонентов радиоэлектронной аппаратуры, паразитные параметры) — практически невозможно, даже если они обладают высокой НС. Кроме того, как известно, введение настроек увеличивает производственные и эксплуатационные расходы, приводит к некоторому снижению надежности по внезапным отказам и т. д. Все это необходимо учитывать при выборе той или иной совокупности настроечных параметров.

Если ввести некоторую функцию потерь, связанную с выбором той или иной совокупности настраиваемых параметров $c(\mathbf{r}) = c(x_{\alpha_1}, ..., x_{\alpha_k})$, , то задачу выбора оптимальной совокупности настроечных параметров можно сформулировать следующим образом.

Задача 1. При ограничении снизу на вероятность успешной настройки $H_{\mathbf{r}} \geqslant H_{\text{тр}}$ выбрать в качестве настроечных такие параметры, при которых функция потерь минимальна, т. е. найти

$$\mathbf{r} = \arg\min\{c(x_{d_1}, ..., x_{d_k}) | H_{\mathbf{r}} \geqslant H_{\text{тр}}\},$$

$$k \in [\overline{1, n}],$$

где $(d_1, ..., d_k)$ — подмножества $(1, 2, ..., n)$, по которым находится экстремум, $H_{\text{тр}}$ — требуемое значение вероятности успешной настройки. ♦

Задача 2 (двойственная). Найти такие настроечные параметры $r_1, ..., r_k$, которые обеспечивают максимум вероятности успешной настройки при заданных ограничениях на функцию потерь:

$$\mathbf{r} = \arg\max\{H_{\mathbf{r}} | c(x_{d_1}, ..., x_{d_k}) \leqslant c_0\}. \ ♦$$

Если хотя бы один из параметров, входящих в рассматриваемый набор, сделать настраиваемым невозможно, функцию потерь для данного набора можно положить равной $+\infty$.

Во многих случаях функцию потерь можно считать аддитивной

$$c(r) = \sum_{i=1}^{k} c(x_{d_1}).$$

Если при этом параметры $x_{d_1}, ..., x_{d_n}$, с помощью которых предполагается производить настройку, однородны, т. е. можно считать, что связанные с их использованием в качестве настроечных функции потерь одинаковы $c(x_{d_1}) \approx c(x_{d_2}) \approx c(x_{d_3})... = = c(x_{d_k}) = c$, то $c(\mathbf{r}) = kc$, и задача 1 сводится к задаче нахождения минимальной совокупности настроечных параметров, обеспечивающих заданные требования к ВУН.

Отметим, что на практике уже на этапе предварительного анализа удается отбросить принципиально нерегулируемые параметры (элементы) и тем самым существенно ограничить множество параметров, которые могут использоваться в качестве настроечных. На множестве таких параметров функция потерь строго возрастает с увеличением числа переменных параметров. При этом «усилия», затрачиваемые на то, чтобы сделать параметры переменными, как правило, значительно меньше потерь, вызванных необходимостью настройки большим числом параметров. Все это, в большинстве случаев, позволяет свести исходную задачу к задаче минимизации числа настроечных параметров.

2. ВЫБОР МИНИМАЛЬНОЙ СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ

Пусть $R = \{r_i = x_{\alpha_i}, i = 1, 2, ..., n_r\}$ — множество всех параметров, которые могут использоваться в качестве настроечных, и пусть k — некоторое целое число ($1 \leqslant k \leqslant n_r$). Обозначим M_k множество подмножеств $\mathbf{r}_k$ с k элементами. Очевидно, мощность этого множества $|M_k| = C_{n_r}^k$, т. е каждому значению k соответствует $C_{n_r}^k$ возможных вариантов выбора настроечных параметров, отличающихся значением H_{r_k} — вероятности успешной настройки объекта параметрами $\mathbf{r}_k$. Тогда задача выбора минимальной совокупности настроечных параметров формулируется следующим образом:

$$k^0 = \min_{k \in [1, n_r]} \left\{ k | \max_{r_k \subset M_k} H_{r_k} \geqslant H_{\text{тр}} \right\}. \qquad (2)$$

Рассмотрим вопрос о существовании решения задачи (2). Обозначим для краткости $H(k) = \max\limits_{r_k \subset M_k} H_{r_k}$. Очевидно, что $H(k)$ — дискретная неубывающая функция целочисленного аргумента k, так как увеличение числа регулировочных параметров всегда приводит к увеличению (по крайней мере, не может привести к уменьшению) НС. Из этого следует, что при решении задачи может возникнуть одна из следующих ситуаций:

- если $H(n_r) < H_{\text{тр}}$, то задача не имеет решения;
- если при некотором значении k найдется единственный набор $(\alpha_1, ..., \alpha_k)$, для которого $H_{\alpha_1, ..., \alpha_k} \geqslant H_{\text{тр}}$, а $H(k - 1) < H_{\text{тр}}$), решение задачи будет единственным;
- если для некоторого числа настроечных параметров k найдется несколько наборов $(\alpha_1^{(1)}, ..., \alpha_k^{(1)})$, $(\alpha_1^{(2)}, ..., \alpha_k^{(2)})$, таких, что

$$H_{\alpha_1^{(1)}, ..., \alpha_k^{(1)}} \geqslant H_{\text{тр}},\ H_{\alpha_1^{(2)}, ..., \alpha_k^{(2)}} \geqslant H_{\text{тр}}, ...,$$
$$H(k - 1) < H_{\text{тр}},$$

то существует несколько вариантов выбора совокупности параметров настройки (допустимых решений): $\mathbf{r}^{(1)} = \{r_i \equiv \left\{ r_i \equiv x_{\alpha_i}^{(1)} \right\}_{i=1}^{k}$, $\mathbf{r}^{(2)} = \left\{ r_i \equiv x_{\alpha_i}^{(2)} \right\}_{i=1}^{k}$, ... В этом случае для окончательного решения задачи необходимо ввести критерии следующего уровня, позволяющие сравнить варианты по стоимости, предпочтительности одного типа переменных элементов перед другими и др.

Общий алгоритм решения задачи можно представить следующим образом.

Шаг 1. На предварительном этапе исследований выбираем оптимальные значения параметров, при которых обеспечивается максимальная вероятность выполнения условий работоспособности с учетом возможных параметрических возмущений [1, 2]. Если учитываются только технологические отклонения параметров, то критерием оптимальности будет серийнопригодность. В том случае, когда учитываются и эксплуатационные изменения параметров, оптимальными считаются значения параметров, максимизирующие вероятность безотказной работы за заданное время. Полученные номинальные значения принимаем за исходные для всех параметров, в том числе и для тех, которые могут стать настроечными.

Шаг 2. Проверяем пустое множество регулировок, т. е. вариант, когда ни один из параметров не настраивается. Для этого сравниваем полученные значения серийнопригодности P_0 или параметрической надежности $P(T)$ с требуемыми $P_{тр}$. Если $H(0) < H_{тр}$ (здесь $H(0) \equiv P_0$, а $H_{тр} \equiv P_{тр}$), то переходим к рассмотрению варианта настройки одним параметром.

Шаг 3. Проверяем возможность обеспечения заданных требований путем настройки одним из параметров ($k = 1$). Если $H(1) = \max\limits_{i = 1, ..., n_r} H_{x_{\alpha_i}} \geqslant H_{тр}$, то задача решена. В противном случае переходим к рассмотрению пар настроечных параметров.

Шаг 4. Последовательно увеличивая число настроечных параметров на единицу, для каждого из возможных $C_{n_r}^k$ вариантов выбора регулировок оцениваем значение ВУН и сравниваем его с требуемой. В результате такого перебора при некотором минимальном значении k получим решения (наборы индексов параметров α_1, ..., α_k), для которых выполняются требования по настраиваемости. ♦

Понятно, что применение метода прямого перебора может быть оправдано лишь в достаточно простых случаях, когда число параметров, пригодных для настройки, невелико. В общем случае необходима разработка более эффективных направленных процедур поиска оптимальной совокупности регулировочных параметров.

Для осуществления направленной процедуры поиска на множестве R параметров, пригодных в качестве настроечных, необходимо ввести отношение порядка. Естественным представляется ранжирование настроечных параметров в порядке убывания их НС. Можно рассматривать ранги первого порядка, характеризующие НС каждого отдельного параметра, ранги второго порядка, характеризующие НС пар параметров, и т. д. При организации процедуры поиска предпочтение следует всегда отдавать параметрам или их сочетаниям, обладающим более высокой НС.

Если работоспособность разрабатываемого устройства характеризуется состоянием нескольких выходных параметров, то один и тот же внутренний параметр может обладать различной НС при настройке каждого из выходных параметров y_j. Поэтому целесообразно ввести в рассмотрение H_i^j — настроечную способность i-го настроечного параметра по j-му выходному. Составим матрицу вероятностей успешной настройки

$$H = \begin{pmatrix} H_1^1 & H_2^1 & \dots & H_{n_r}^1 \\ H_1^2 & H_2^2 & \dots & H_{n_r}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_1^m & H_2^m & \dots & H_{n_r}^m \end{pmatrix}, \qquad (3)$$

элементы которой могут быть получены в ходе однократного статистического моделирования.

Анализ элементов матрицы H позволяет прежде всего исключить из дальнейшего рассмотрения незначимые в смысле настройки параметры, т. е. такие x_{α_i}, для которых $H_i^j < H_{\min}$, $\forall j = \overline{1, m}$. Далее, используя информацию, заложенную в матрице H как начальную, можно идентифицировать существенные (значимые) регулировочные связи данного объекта и обоснованно выбрать параметры настройки. Суть этой процедуры сводится к следующему.

В зависимости от вида регулировочных связей выделим три типа технических объектов.

Определим *первый* тип объектов следующим образом: среди множества допустимых для настройки параметров имеются такие, которые могут эффективно использоваться для одновременной регулировки всех выходных параметров. Критерием эффективности служит значение ВУН H_i^y. Все выходные параметры таких объектов обычно имеют одинаковый физический смысл, а соответствующие функционалы $y_j(\mathbf{x}_s, \mathbf{r})$, $j = \overline{1, m}$, — единое математическое определение. В качестве примера можно привести устройство, работоспособность которого определяется желаемым видом частотной характеристики, заданной в достаточно узкой полосе частот Δf. Значение коэффициента передачи (или затухания) на отдельной частоте $f_j \in \Delta f$ определяет выходной параметр y_j. При этом имеются параметры r_i, изменение которых позволяет получить требуемый вид частотной характеристики.

К устройствам этого же типа можно отнести и такие, для которых может быть составлен обобщенный показатель качества функционирования $G = G(y_1, ..., y_m)$ и определено условие работоспособности по этому показателю.

Задача выбора минимальной группы параметров, предпочтительных для настройки объектов данного типа, решается аналогично случаю одного выходного параметра. Параметры r_i, для которых необходимо оценить H_i^y, несложно выделить, анализируя матрицу (3). Расположим r_i в порядке убывания соответствующих им ВУН. Тогда, последовательно увеличивая на единицу число одновременно варьируемых при настройке параметров, находим решение, обеспечивающее требуемую ВУН объекта. При этом для всякого числа k наилучшей будем считать совокупность первых k параметров.

К объектам *второго* типа отнесем такие, среди множества параметров R которых имеются параметры (группы параметров), каждый (каждая) из которых может эффективно использоваться для регулировки «своего» выходного параметра (или одновременной, как в устройствах первого типа, регулировки «своей» группы выходных параметров). При этом взаимное влияние этих регулировок несущественно или отсутствует вообще.

Выходные параметры таких объектов y_1, y_2, ... либо имеют различный физический смысл (разное математическое определение соответствующих функционалов, например, длительность генерируемых импульсов и частота их следования), либо существенно разнесены по области их определения (например, частотную характеристику в области нижних частот формируют одни параметры, а в области верхних — другие).

Идентификация связей второго типа производится непосредственно по матрице H и не представляет сложности. Очевидно, что в рассматриваемом случае возможна раздельная регулировка выходных параметров (или их групп). Это предопределяет и естественную декомпозицию задачи выбора оптимальной совокупности настроечных параметров.

Для объектов *третьего* типа характерно существование параметров, обладающих высокой НС по каждой из нескольких групп выходных параметров, но малой НС по их совокупности. Другими словами, изменением некоторых параметров можно с высокой вероятностью настраивать либо одну группу параметров (при этом расстраиваются другие), либо наоборот, но не все группы одновременно. Такие связи будем называть альтернативными.

В случае альтернативного влияния регулировок оптимальный выбор параметров настройки представляет собой наиболее сложную задачу. Методика ее решения во многом определяется особенностями конкретного проектируемого объекта и результатами анализа матрицы H. Процедура выбора настроек будет носить итеративный характер с оценкой на каждом шаге вероятности успешной настройки всех выходных параметров $\mathbf{y}$.

Рассмотренные три основные схемы влияния регулировок могут на практике встречаться в одном и том же объекте в различных комбинациях. В таких случаях для конкретного выбора настроек необходим детальный предварительный анализ проектируемого объекта в целях выявления всех существенных связей. В итоге процедура выбора совокупности настроечных параметров составляется в виде последовательности алгоритмов, ориентированных на различные схемы влияния. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать параметрам, выбираемым из связей первого типа, затем, при необходимости, второго и, наконец, третьего. Такой подход позволяет, с одной стороны, получить решение наиболее простым образом, а с другой — обеспечить в дальнейшем, на этапе производства изделий, наименьшую трудоемкость их регулировки.

Важный элемент предлагаемой методики выбора параметров настройки составляет определение ВУН отдельных или всех выходных параметров $\mathbf{y}$ тем или иным настроечным параметром (или их совокупностью $\mathbf{r}$). В общем случае оценка этой вероятности может быть получена на основе алгоритмов статистического моделирования (Монте-Карло). При этом каждая реализация вектора параметров $\mathbf{x}$, для которой не выполняются условия работоспособности $\mathbf{x} \notin D$, должна быть исследована на настраиваемость проверяемыми параметрами $\mathbf{r}$. Процесс настройки при этом сводится к поиску значения $\mathbf{r}^*$, обеспечивающего настроенное состояние объекта. Соответствующую задачу можно сформулировать как задачу нелинейного программирования следующего вида:

$$\mathbf{r}^* = \arg\left[\min_{r \in R}\ \max_{j \in [1,\, m]} S_j(\mathbf{r})\right],$$

где $S_j(\mathbf{r})$ — оценка «степени выполнения» j-го условия работоспособности. Такая постановка задачи позволяет ответить на вопрос о возможности одновременной настройки всех рассматриваемых выходных параметров.

Отметим, что рассмотренная методика выбора настроечных параметров позволяет решать задачу обеспечения как производственной, так и эксплуатационной настраиваемости изделий. Можно указать, по крайней мере, два подхода к решению задачи.

Первый подход применим в тех случаях, когда эксплуатационные изменения параметров за рассматриваемое время T могут быть приведены к моменту $t = 0$. Способы осуществления такой операции достаточно подробно исследованы и часто используются в теории точности. Задача выбора параметров настройки сводится к рассмотренной ранее, а выбранная совокупность настроечных параметров обеспечит требуемую настраиваемость (ВУН) в любой момент времени эксплуатации $t \notin [0,\ T]$.

Во втором подходе полагаются известными моменты проведения настроечных мероприятий $t_{\text{п}\mu}$. Выбираемая совокупность настроечных параметров должна обеспечить требуемую настраиваемость как при $t = 0$, так и в любой момент времени $t_{\text{п}\mu}$:

$$H_{\alpha_1,\ \dots,\ \alpha_k}(t_{\text{п}\mu}) \geqslant H_{\text{тр}\mu},$$

$$H_{\alpha_1,\ \dots,\ \alpha_k}(t_{\text{п}\mu}) =$$

$$= \underbrace{\overbrace{\int \dots \int}^{n-k}}_{D_x} \varphi(x_{S_1},\ \dots,\ x_{S_{n-k}},\ t_{\text{п}\mu})dx_{S_1} \dots dx_{S_{n-k}},$$

где $\varphi(x_{S_1},\ \dots,\ x_{S_{n-k}},\ t_{\text{п}\mu})$ — плотность распределения параметров x_S в момент времени $t_{\text{п}\mu}$; $H_{\text{тр}\mu}$ — требуемое значение ВУН в момент времени $t_{\text{п}\mu}$.

Такой подход к выбору настроечных параметров позволяет, в частности, формализовать задачу рационального разделения регулировок на производственные и эксплуатационные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была предпринята попытка формализации задачи оптимального параметрического синтеза технических устройств и систем, в целях обеспечения необходимого качества функционирования и надежности которых необходимы элементы настройки. Введение количественного критерия оценки настроечной способности параметров — настроечного ресурса позволяет минимизировать число элементов настройки и дать оценку настраиваемости исследуемых систем.

Основная проблема при практической реализации рассмотренного подхода состоит в высокой вычислительной трудоемкости многократного расчета настроечной способности параметров (вероятности успешной настройки), а также возникающих в процессе поиска решения оптимизационных задач. Вместе с тем в последние годы стал активно развиваться достаточно радикальный путь преодоления проблемы трудоемкости решения сложных вычислительных задач, в основе которого лежит идея распараллеливания процессов поиска конечного результата. Параллельные алгоритмы многовариантного анализа, статистического моделирования и поисковой оптимизации, приведенные в работах [2—4], могут оказаться полезными и при решении задачи синтеза настраиваемых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 3—8.
2. *Катуева Я.В.* Параллельный алгоритм дискретной оптимизации на множестве номиналов параметров в задаче параметрического синтеза // Информатика и системы управления. — 2005. — № 1. — С. 114—121.
3. *Назаров Д.А.* Использование распределенных вычислений при построении области работоспособности // Информатика и системы управления. — 2008. — № 1. — С. 142—151.
4. *Абрамов О.В.* Параллельные алгоритмы расчета и оптимизации надежности по постепенным отказам // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 7. — С. 126—135.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Ф. Пащенко.

Абрамов Олег Васильевич — д-р техн. наук, зав. отделом, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, ☎(4232) 31-02-02, ✉ abramov@iacp.dvo.ru.