

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.396.6.07.019.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАСТРОЙКИ*

О. В. Абрамов

Важное место в общем комплексе мер, направленных на обеспечение требуемых или экстремальных значений показателей качества и надежности технических объектов, занимает настройка и регулировка параметров этих объектов.

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

В большинстве случаев настройка призвана скомпенсировать отклонения параметров технических объектов от расчетных значений, вызванных наличием производственных (технологических) разбросов, нестабильностью параметров, изменениями внешних условий и других воздействий.

В настоящее время известен ряд конструктивных подходов и результатов, связанных с решением задач оптимального проектирования с учетом возможных параметрических возмущений и требований надежности. Однако они относятся главным образом к проектированию не настраиваемых объектов. Вместе с тем предлагаемые методы зачастую не обеспечивают требуемый уровень надежности в условиях имеющихся ресурсов. Причинами этого могут быть, например, жесткие ограничения, накладываемые на выходные параметры устройства техническими условиями, значительный разброс параметров некоторых элементов, низкая временная стабильность параметров, высокие требования к срокам эксплуатации (времени безотказной работы) и т.д.

В этих условиях введение элементов настройки часто оказывается наиболее предпочтительным, а иногда и единственно возможным способом обеспечения требуемых значений показателей качества и надежности. При этом иногда удается существенно ослабить требования к параметрам не настраиваемых элементов и вместе с тем достаточно точно устанавливать в процессе настройки требуемые значения выходных параметров устройства.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект №14-08-00149а.

Рассмотрим более подробно содержание задач настройки параметров и их взаимосвязь с задачей оптимального параметрического синтеза [1–3].

Проектирование технических систем с учетом закономерностей технологических и эксплуатационных вариаций их параметров можно представить в виде последовательности взаимосвязанных этапов.

На *первом* этапе при выбранной структуре системы осуществляется расчет (поиск) параметров ее элементов, при которых обеспечивается выполнение условий работоспособности.

Вторым этапом является анализ работоспособности системы при возможных отклонениях параметров от расчетных значений. Поскольку такие отклонения носят случайный характер, оценка степени выполнения условий работоспособности будет вероятностной (вероятность выполнения условий работоспособности в заданный момент времени или в течение некоторого промежутка времени, среднее время сохранения работоспособного состояния и т.д.).

Если вероятность выполнения условий работоспособности окажется ниже требуемой, то переходят к *третьему* этапу – выбору номинальных значений параметров, при которых обеспечивается максимальная гарантия работоспособности (задача оптимального параметрического синтеза).

Рассмотренные этапы отражают процесс проектирования системы в безнастроечном варианте.

Следующий *четвертый* этап состоит в проектировании системы, для обеспечения работоспособности которой необходимы настроечные параметры. Этот этап сводится, в свою очередь, к решению следующих взаимосвязанных задач:

- анализ необходимости производственной (однократной) и эксплуатационной (многократной) регулировки параметров системы;
- выбор совокупности параметров, которыми наиболее целесообразно осуществлять настройку;
- определение необходимых диапазонов изменения параметров настройки;
- определение моментов времени, в которые необходимо осуществлять эксплуатационные регулировки;
- выбор оптимальных значений параметров, устанавливаемых в процессе настройки, с учетом последующих временных изменений параметров системы.

Один из основных вопросов, возникающих при проектировании технических систем с элементами настройки, состоит в выборе переменных параметров (параметров, которыми наиболее целесообразно осуществлять настройку). Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, выбрать критерий оценки настроечной способности (НС) параметров системы.

В качестве такого критерия можно использовать вероятность успешной настройки системы выбранным параметром или группой параметров [4].

Пусть $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметров элементов (внутренних параметров) системы. Условия и ограничения, накладываемые на возможные изменения внутренних параметров (например, условия физической реализуемости, ограничения на возможные производственные и эксплуатационные отклонения параметров) зададут в пространстве параметров некоторую область Ω , 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 $\mathbf{x} \in \Omega$ оказываются за пределами области работоспособности D .

Предположим, что каким-то образом определены (или заданы) параметры, которыми предполагается осуществлять настройку $\mathbf{r} = \{r_1, \dots, r_k\}$. Настройка будет состоять в изменении параметров $r_1, \dots, r_k$ с целью нахождения таких значений, при которых объект будет работоспособ-

ным. Другими словами, для каждого из векторов $\mathbf{x} \in \Omega$, находящихся вне области D , необходимо путем изменения (коррекции) вектора регулировочных параметров добиться, чтобы

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

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) $\mathbf{x} \in \Omega$ удастся обеспечить выполнения условия (1), т.е. некоторые векторы $\mathbf{x}$ не будут настраиваться совокупностью параметров $r_1, \dots, r_k$.

Будем говорить, что вектор $\mathbf{x}$ *настраиваем* с помощью $\mathbf{r}$, если существуют такие значения настроечных параметров, 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* данной совокупности параметров $\mathbf{r}$. В частности, если все $\mathbf{x} \in \Omega$ настраиваемы с помощью $\mathbf{r}$, то выбранная совокупность настроечных параметров обеспечивает *полную настраиваемость* и, следовательно, обладает наибольшей НС. Очевидно, необходимо ввести некоторый критерий, позволяющий оценить численно настроечную способность любой выбранной совокупности настроечных параметров. Как показано в работе [2], 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: $\text{Pr}_S \mathbf{x} \in \text{Pr}_S D$.

Вектор $\mathbf{x}$ может принимать любые значения внутри области Ω . Пусть известно распределение вероятностей этого вектора, заданное плотностью распределения вероятностей $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{x})$.

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

$$P_0 = \underbrace{\int \dots \int}_D f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n < P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{тр}}$ – требуемое значение серийно-пригодности.

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

Плотность распределения ненастраиваемых параметров

$$\phi(\mathbf{x}_S) = \underbrace{\int \dots \int}_k f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} dx_{\alpha_2} \dots dx_{\alpha_k}.$$

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_r . Можно показать, что

$$H_r = P(\text{Pr}_S \mathbf{x} \in \text{Pr}_S D = \underbrace{\int \dots \int}_{\text{Pr}_S D} \phi(x_{S_1}, \dots, x_{S_{n-k}}) dx_{S_1} \dots dx_{S_{n-k}}).$$

Введение понятия настроечной способности и ВУН позволяет количественно оценить, насколько тот или иной параметр (группа параметров) пригоден 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 РЭА, 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 $c(\mathbf{r}) = c(x_{\alpha_1}, \dots, x_{\alpha_k})$, то задачу выбора оптимальной совокупности настроечных параметров можно сформулировать следующим образом.

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

$$\mathbf{r} = \arg \min \{c(x_{d_1}, \dots, x_{d_k}) / H_{\mathbf{r}} \geq H_{\text{тр}}\}, \quad k \in [\overline{1, n}],$$

где $(d_1 \dots d_k)$ – подмножества, по которым находится экстремум; $H_{\text{тр}}$ – требуемое значение вероятности успешной настройки.

Задача 2 (двойственная 1). Найти такие настроечные параметры $r_1, \dots, r_k$, которые обеспечивают максимум вероятности успешной настройки при заданных ограничениях на функцию потерь:

$$\mathbf{r} = \arg \max \{H_{\mathbf{r}} / c(x_{d_1}, \dots, x_{d_k}) \leq c_0\}.$$

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

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

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

Следует отметить, что на практике уже на этапе предварительного анализа удастся 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 [5].

В данной работе была предпринята попытка классификации и формализации некоторых задач, возникающих в процессе оптимального параметрического синтеза технических устройств и систем, для обеспечения необходимого качества функционирования и надежности которых необходимы элементы настройки. Введение количественного критерия оценки настроечной способности параметров – настроечного ресурса – позволяет выбрать рациональное число элементов настройки и дать оценку настраиваемости исследуемых систем.

Основная проблема при практической реализации сформулированных выше задач 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 ради-

кальный 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, 6–8], могут оказаться полезными и при решении задачи синтеза настраиваемых систем.

Список литературы

1. Абрамов, О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
2. Абрамов, О. В. Об использовании параллельных вычислений в задачах оптимального параметрического синтеза / О. В. Абрамов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – Т. 1. – С. 49–52.
3. Абрамов, О. В. Некоторые особенности задачи оптимального параметрического синтеза / О. В. Абрамов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 3–5.
4. Таньков, Г. В. К вопросу оценки погрешности цифрового моделирования упругих деформаций тел вращения / Г. В. Таньков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 248–249.
5. Абрамов, О. В. Выбор параметров настройки технических устройств и систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2011. – № 4. – С. 13–19.
6. Абрамов, О. В. Технология параллельных вычислений в задачах анализа и оптимизации / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева // Проблемы управления. – 2003. – № 4. – С. 11–15.
7. Абрамов, О. В. Параллельные алгоритмы расчета и оптимизации надежности по постепенным отказам / О. В. Абрамов // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 7. – С. 126–135.
8. Горячев, Н. В. Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, М. К. Танатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 70–75.

УДК 621.396.6.07.019.3

Абрамов, О. В.

Проектирование технических систем с элементами настройки / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 51–55.

Абрамов Олег Васильевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела надежности и качества,
Учреждение Российской академии наук,
Институт автоматизации
и процессов управления ДВО РАН
(690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvi.ru

Аннотация. Рассматривается проблема оптимального проектирования технических устройств и систем, для обеспечения требуемого качества функционирования которых необходимо осуществлять настройку их параметров. Сформулированы основные задачи параметрического синтеза настраиваемых систем.

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

Abramov Oleg Vasil'evich

doctor of technical sciences, professor,
the division head of reliability and quality,
The establishment of the Russian academy of sciences,
Institute of automation and control processes
DVO Russian Academy of Science
(690041, 5 Radio street, Vladivostok, Russia)

Abstract. The problem of optimum designing of engineering devices and systems is considered, for maintenance of demanded which quality of functioning it is necessary to carry out adjustment of their parameters. The primary goals arising in the course of parametrical synthesis of adjusted systems are formulated.

Key words: parameter, adjustment, working capacity, engineering system, reliability, parametrical synthesis, optimization.