

Ю. А. ГАТЧИН, Б. В. ВИДИН, И. О. ЖАРИНОВ, О. О. ЖАРИНОВ

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассматривается метод автоматизированного проектирования бортового радиоэлектронного оборудования с целью обеспечения практического подобия объекта проектирования требованиям тактико-технического задания.

Ключевые слова: бортовое оборудование, критерий подобия, мера близости.

Введение. Целью синтеза аппаратуры бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) является объединение различных элементов, свойств, сторон объекта проектирования в единое целое — комплекс; в результате создаются проектные решения, обладающие новыми качествами [1].

Для решения задачи синтеза наиболее часто используются комбинаторно-логические методы. В основе этого подхода лежит организованный перебор элементов массива проектных решений-аналогов. Если четко ограничить требованиями тактико-технического задания (ТТЗ) технические характеристики объекта проектирования, то множество проектов данной направленности образует класс, который можно рассматривать как обобщенную структуру.

Обобщенная структура представляет собой „комбинаторное пространство“, в котором находятся в различных сочетаниях элементы, образующие множество структур с тем или иным уровнем соответствия требованиям ТТЗ. В качестве средств описания обобщенной структуры используются табличные, алгебраические, логические, а также сетевые композиционные модели, подлежащие оптимизации в проектных исследованиях.

Постановка задачи. Процедура проектирования БРЭО начинается с уровня главного конструктора, который оперирует относительно небольшим числом существенно значимых параметров (критериев) проекта $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_c$, поэтому на каждом иерархическом уровне проектирования множество всех параметров $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_\Psi\}$ для составляющих объекта проектирования рассматривается [2] как совокупность $\Psi = \{\hat{\Psi}, \check{\Psi}\}$ множества существенных $\hat{\Psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{\hat{\Psi}}\}$ и второстепенных параметров $\check{\Psi} = \{\psi_{\hat{\Psi}+1}, \psi_{\hat{\Psi}+2}, \dots, \psi_\Psi\}$, таких что всегда найдется некоторая малая скалярная величина ε (мера вклада), для которой $\xi_i(\Psi) = \xi_i(\hat{\Psi}, \varepsilon\check{\Psi})$ или, при $\varepsilon \rightarrow 0$, $\xi_i(\Psi) = \xi_i(\hat{\Psi}, \varepsilon\check{\Psi}) \approx \xi_i(\hat{\Psi}, 0\check{\Psi}) \approx \xi_i(\hat{\Psi})$. В итоге в модель проекта включаются только те компоненты $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_c \in \Xi$, которые являются существенными (релевантными) по отношению к цели проектирования.

Рабочая функция проектирования БРЭО в этом случае определяется как

$$F(\xi_1(\Psi, 0), \xi_2(\Psi, 0), \dots, \xi_\zeta(\Psi, 0)) \approx F(\xi_1(\Psi), \xi_2(\Psi), \dots, \xi_\zeta(\Psi)) \rightarrow \min.$$

Если воспользоваться геометрическими аналогиями (рис. 1), то задача синтеза формулируется как задача поиска в ζ -мерном действительном пространстве параметров такой точки

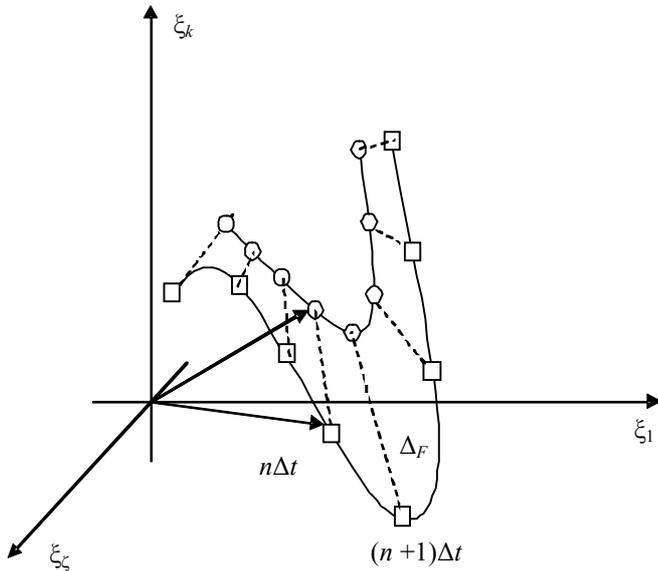


Рис. 1

(набора из ζ значений параметров $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\zeta$), для которой требования ТТЗ просто выполняются, либо выполняются наилучшим образом. На рис. 1 приведены геометрическое представление длины вектора и оценка близости текущего проектного решения (квадраты), соответствующего ТТЗ (кружки), в векторном пространстве (здесь Δ_F — неотрицательно-определенная мера близости функционального обеспечения выбранного варианта БРЭО по отношению к наилучшему Ξ^* — заданному по ТТЗ).

В первом случае требуется, чтобы решение задачи синтеза принадлежало некоторой замкнутой и ограниченной области пространства параметров. Во втором случае решение представляет собой точку

пространства, наилучшую по критерию оптимальности $\Delta_F \rightarrow \min$, который формализует оценку соответствия объекта проектирования требованиям ТТЗ. Если разработана математическая модель объекта проектирования, то по постановке и методам решения задача синтеза в первом случае сводится к задаче оптимизации, а во втором случае — является ей.

Таким образом, задача синтеза формулируется как оптимизационная задача достижения практического подобия, требующая разработки критериев, системы ограничений и метода решения с целью поиска области технических решений, отвечающей ограничению вида

$$\left| F(\xi_1^j, \xi_2^j, \dots, \xi_\zeta^j) - F^* \right| \leq \Delta_F(\Xi - \Xi^*). \quad (1)$$

На рис. 2 представлена автоматизированная модель формирования и исследования решений при целенаправленном проектировании БРЭО.

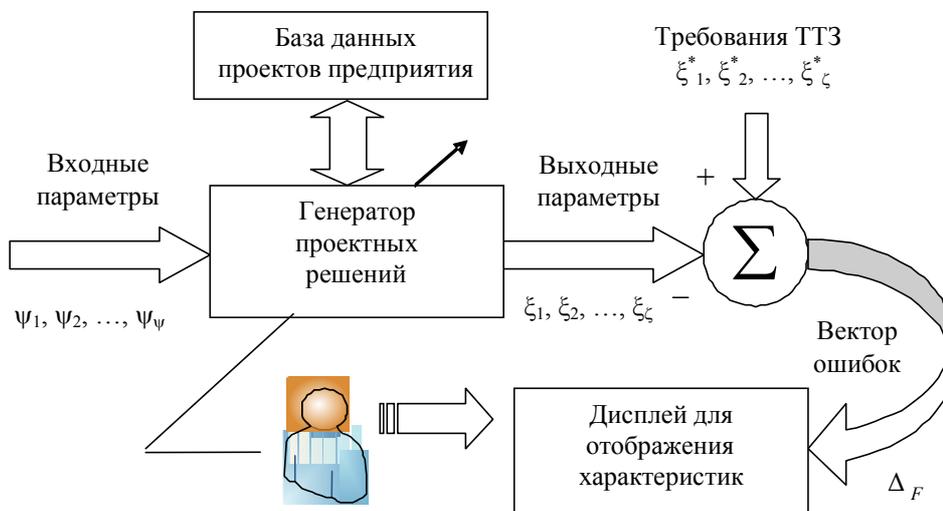


Рис. 2

Подход к решению задачи проектирования и полученные результаты. Идея оптимизации [3, 4] состоит в том, чтобы, начав с любой проектной альтернативы, приближаться к $(\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_\zeta^*)$ по некоторой спиралевидной траектории в пространстве параметров $\Xi = \mathbf{A}\Psi$ (\mathbf{A} — матрица преобразования параметров), что достигается введением числовой меры близости.

Евклидова метрика оценки близости текущей проектной точки с координатами $(\xi_1(\Psi), \xi_2(\Psi), \dots, \xi_\zeta(\Psi))$ к „идеальной точке“ $(\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_\zeta^*)$, являющейся решением задачи синтеза, определяется как

$$\Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{\zeta} (\xi_i(\Psi) - \xi_j^*) \gamma_{ij} (\xi_i(\Psi) - \xi_j^*)}, \quad (2)$$

где $\gamma = [\gamma_{ij}]$ — положительно-определенная матрица. В частном случае, если $\gamma = [\gamma_{ij}]$ — матрица единичного вида, вводится метрика

$$\Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \sqrt{\sum_{i=1}^{\zeta} (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*)^2} \quad (3)$$

либо

$$\Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \min_i \{ \wp_i (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*) \} + \wp_{\zeta+1} \sum_{i=1}^{\zeta} \wp_i (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*), \quad (4)$$

при этом считается, что $\xi_i(\Psi) \geq \xi_i^*$; коэффициент $\wp_{\zeta+1}$ определяет цель проектирования: уменьшать либо оценку близости к требуемым значениям любого из частных показателей, либо суммарную близость всех критериев к желаемым значениям.

Если часть требований ТТЗ ограничивает критерии снизу $\xi_i(\Psi) \geq \xi_i^*$ ($i=1, 2, \dots, m_1$), часть — сверху $\xi_i(\Psi) \leq \xi_i^*$ ($i=m_1+1, m_1+2, \dots, m_2$), а часть жестко вводит требования ТТЗ $\xi_i(\Psi) = \xi_i^*$ ($i=m_2+1, m_2+2, \dots, \zeta$), метрика (4) приводится к виду

$$\Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \min_i \left\{ L(\xi_i, \xi_i^*) \right\} + \wp_{\zeta+1} \sum_{i=1}^{\zeta} L(\xi_i, \xi_i^*), \quad (5)$$

$$L(\xi_i, \xi_i^*) = \begin{cases} \wp_i (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*), & 1 \leq i \leq m_1, \\ \wp_i (\xi_i^* - \xi_i(\Psi)), & m_1 + 1 \leq i \leq m_2, \\ \wp_i \min \left\{ (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*) (\xi_i^* - \xi_i(\Psi)) \right\}, & m_2 + 1 \leq i \leq \zeta. \end{cases} \quad (6)$$

Выражения (4)—(6) определяют систему зависимостей для критерия подобия, отражающих цели проектирования по методу целенаправленного выбора и связывающих релевантные для данной цели параметры объекта проектирования и требования ТТЗ на него. Возможно применить и иные меры близости:

$$\Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \sum_{i=1}^{\zeta} (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*)^2, \quad \Delta_F(\Xi - \Xi^*) = \sum_{i=1}^{\zeta} |\xi_i(\Psi) - \xi_i^*|, \quad (7)$$

и соответствующие им функции принадлежности [5], однако математические свойства функций (3)—(7) подробно изучены, что гарантирует сходимость процесса минимизации, в ходе

которого обеспечивается приближение параметров объекта к $(\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_\zeta^*)$.

Задача проектировщика сводится в данном случае к назначению допустимых границ используемых показателей и собственно организации процесса проектирования.

В общем случае (см. рис.1) векторы Ψ и Ξ являются функциями дискретного $n\Delta t$ или непрерывного времени $\Psi(t)$, $\Xi(t)$ и определяют развивающуюся модель объекта проектирования. При изменении $0 \rightarrow t \rightarrow \infty$ конец вектора $\Xi(t)$ в пространстве релевантных параметров формирует годограф, форма которого определяется функцией $\Xi(t)$. Расстояние между годографами параметров модели объекта проектирования $\Xi(t)$ и их желаемых значений Ξ^* на бесконечном

$$\Delta_F^\infty(\Xi - \Xi^*) = \int_0^\infty (\Xi(t) - \Xi^*) dt \quad (8)$$

или конечном

$$\Delta_F^t(\Xi - \Xi^*) = \int_0^t (\Xi(\tau) - \Xi^*) d\tau \quad (9)$$

интервале определяет степень соответствия релевантных параметров БРЭО и требований ТТЗ на его разработку в качестве критерия подобия.

Задача минимизации критерия подобия Δ_F (при квадратичной мере (7)) сводится к минимизации суммы квадратов отклонений

$$\sum_{i=1}^{\zeta} (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta_F \left(F^k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\zeta) - F^*(\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_\zeta^*) \right) = \\ = \sum_{i=1}^{\zeta} \wp_i (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*)^2 = \sum_{i=1}^{\zeta} \wp_i \left(\sum_{j=1}^{\Psi} a_{ij} \psi_j - \xi_i^* \right)^2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

где \wp_i — коэффициент значимости параметра ξ_i БРЭО; ψ_j — значение векторного параметра, определяющее соответствующий технико-экономический показатель частной аппаратуры, входящей в БРЭО; a_{ij} — элемент матрицы линейного преобразования $\Xi = \mathbf{A}\Psi$; ξ_i^* — заданное в ТТЗ (желаемое) значение параметра ξ_i БРЭО, состоящего из s подсистем.

В соответствии с [6] задача (11) поиска экстремума квадратичного критерия подобия Δ_F , в которой минимизируется сумма квадратов отклонений

$$\Delta_F(\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^{\zeta} \left(\xi_i^* - \sum_{j=1}^{\Psi} b_j a_{ij} \right)^2 = (\Xi^* - \mathbf{A}\mathbf{B})^T (\Xi^* - \mathbf{A}\mathbf{B}) \rightarrow \min, \quad (12)$$

может быть решена по методу наименьших квадратов (МНК) с использованием неопределенных множителей Лагранжа [6].

Экстремум (12) достигается решением уравнения вида

$$\frac{\partial \Delta_F(\mathbf{B})}{\partial \mathbf{B}} = -2\mathbf{A}^T \Xi^* + 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{B} = 0. \quad (13)$$

Если матрица $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ невырождена, то умножив выражение (13) слева на матрицу

$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$, получим вектор наилучших оценок

$$\mathbf{B}_{\text{МНК}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{\Xi}^* . \quad (14)$$

Таким образом, задача проектирования в этом случае решается путем отыскания автоматизированным способом комбинации элементов $\mathbf{\Xi} = \mathbf{A}\Psi$, в совокупности удовлетворяющих требованиям ТТЗ и наиболее близко соответствующих критерию $\Delta_F \rightarrow \min$ оптимальности проекта.

Предложенный метод проектирования и оптимизации был апробирован на практике при разработке изделий авиационной промышленности в ФГУП СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова в классе

- пультов управления и индикации: ПУИ-74Ц, ПУИ-80С, ПВ-96;
- многофункциональных цветных индикаторов: МФЦИ-0332М, МФЦИ-0333М, МФЦИ-0310;
- бортовых вычислительных машин: БЦВМ90-613, БЦВМ90-604, БЦВМ90-601.

Результаты математического моделирования при выборе проектных решений представлены на рис. 3, как из него следует, массив проектных решений может быть составлен в кортеж $(n \in N)$ по предпочтениям, в котором определяются наиболее близкие требованиям ТТЗ варианты проектных альтернатив по критерию подобия.

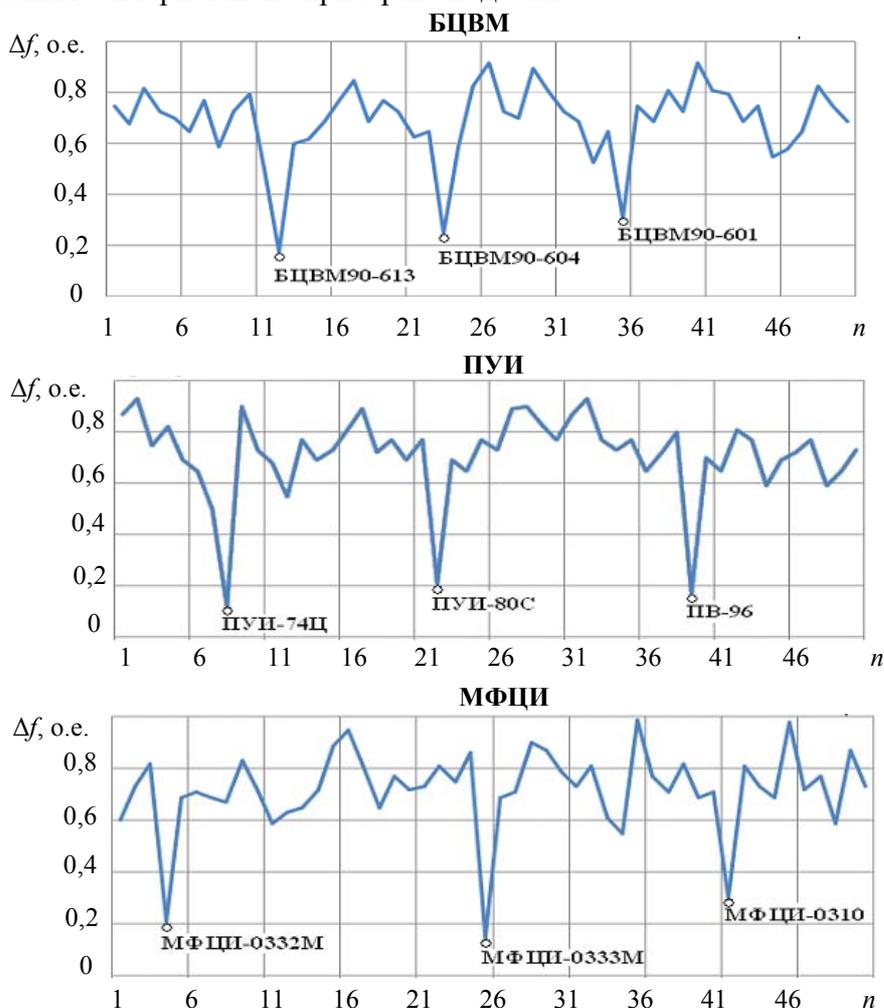


Рис. 3

Заключение. Множество технико-экономических показателей БРЭО как объекта проектирования составляют два вида векторов: существенно значимых (релевантных) и

второстепенных параметров. Функция принадлежности каждого параметра определяется целью проектирования.

Множество релевантных параметров проекта образуют систему координат, в которой вектор релевантных параметров объекта проектирования формирует во времени годограф. Мера близости годографа релевантных параметров и требований ТТЗ в выбранной системе координат определяет показатель подобия текущего проектного решения заданному.

Методология проектирования БРЭО рассматривается как оптимизационная проблема поиска экстремума с показателем подобия в качестве целевой функции. Оптимизация проводится в пространстве релевантных параметров. Поиск экстремума осуществляется по методу наименьших квадратов с применением метода неопределенных множителей Лагранжа.

Важнейшей проблемой автоматизации процесса разработки БРЭО является формализация механизмов генерации проектных альтернатив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божко А. Н., Толпаров А. Ч. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью [Электронный ресурс]: <<http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/13845.html>>.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
3. Губанов В. С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астронометрии. СПб: Наука, 1997. 318 с.
4. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 367 с.
5. Курочкин С. А. Методология проектирования информационно-измерительных систем тренажеров подвижных наземных объектов. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 2007. 40 с.
6. Чебраков Ю. В. Теория оценивания параметров в измерительных экспериментах. СПб: СПбГУ, 1997. 300 с.

Сведения об авторах

- Юрий Арменакович Гатчин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: gatchin@ifmo.ru
- Борис Викторович Видин** — канд. техн. наук, профессор; ФГУП СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова; зам. главного конструктора; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru
- Игорь Олегович Жаринов** — канд. техн. наук, доцент; ФГУП СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова; главный специалист; E-mail: igor_rabota@pisem.net
- Олег Олегович Жаринов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра вычислительных и электронных систем; E-mail: zharinov@hotbox.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию
18.01.10 г.