

## 5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В АВИАНИКЕ*(к 30-летию базовой кафедры машинного проектирования  
бортовой электронно-вычислительной аппаратуры СПбГУ ИТМО)*

УДК 681.324

КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ  
ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ В АВИАНИКЕ

Ю.И. Сабо, И.О. Жаринов

Рассматриваются методологические основы направленного проектирования авиационной техники с целью обеспечения практического подобия объектов разработки требованиям тактико-технического задания на примере разработки комплексов бортового оборудования, выполненных в соответствии с основными положениями концепции интегрированной модульной авионики.

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

## Введение

Синтез бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭО) представляет собой проектную процедуру, целью которой является соединение различных элементов, свойств, сторон объекта проектирования в единое целое – комплекс. В результате синтеза создаются проектные решения, обладающие новым качеством относительно своих элементов [1]. Среди всех подходов к решению задачи синтеза наибольшее распространение получили различные методы, принадлежащие к классу комбинаторно-логических. В основе этого подхода лежит организованный перебор в массиве проектных решений, которые между собой являются аналогами. Если четко ограничить требованиями  $\Xi^*$  тактико-технического задания (ТТЗ) характеристики  $\Xi$  объекта проектирования, то множество проектов данной направленности разработки образует класс, который на структурном уровне описания можно рассматривать как обобщенную структуру в общем маршруте проектирования, показанном на рис. 1. Обобщенная структура представляет собой «комбинаторное пространство», в котором находятся различные сочетания элементов, образующих множество структур с тем или иным уровнем подобия требованиям ТТЗ.

Задача синтеза БРЭО формулируется как оптимизационная задача достижения практического подобия, требующая разработки критерия  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*)$ , системы ограничений  $\langle \xi_i \nabla \xi_i^* \rangle, \xi_i \in \Xi, \xi_i^* \in \Xi^*, \nabla \in \{\leq, <, =, \geq, >\}$  и метода решения с целью обеспечения  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*) \rightarrow \min$ .

## Релевантные параметры объекта проектирования

Процедура проектирования БРЭО начинается с высшего уровня – уровня главного конструктора. Главный конструктор оперирует относительно небольшим числом существенно значимых параметров (критериев) проекта  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{\zeta}$ , 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 параметров  $\hat{\Psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{\hat{\psi}}\}$  и множества второстепенных параметров  $\check{\Psi} = \{\psi_{\check{\psi}+1}, \psi_{\check{\psi}+2}, \dots, \psi_{\psi}\}$ , таких, что всегда найдется некоторая

малая скалярная величина  $\varepsilon$  (мера вклада), для которой  $\xi_i(\Psi) = \xi_i(\hat{\Psi}, \varepsilon\check{\Psi})$  или, при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,  $\xi_i(\Psi) = \xi_i(\hat{\Psi}, \varepsilon\check{\Psi}) \approx \xi_i(\hat{\Psi}, 0\check{\Psi}) \approx \xi_i(\hat{\Psi})$ .

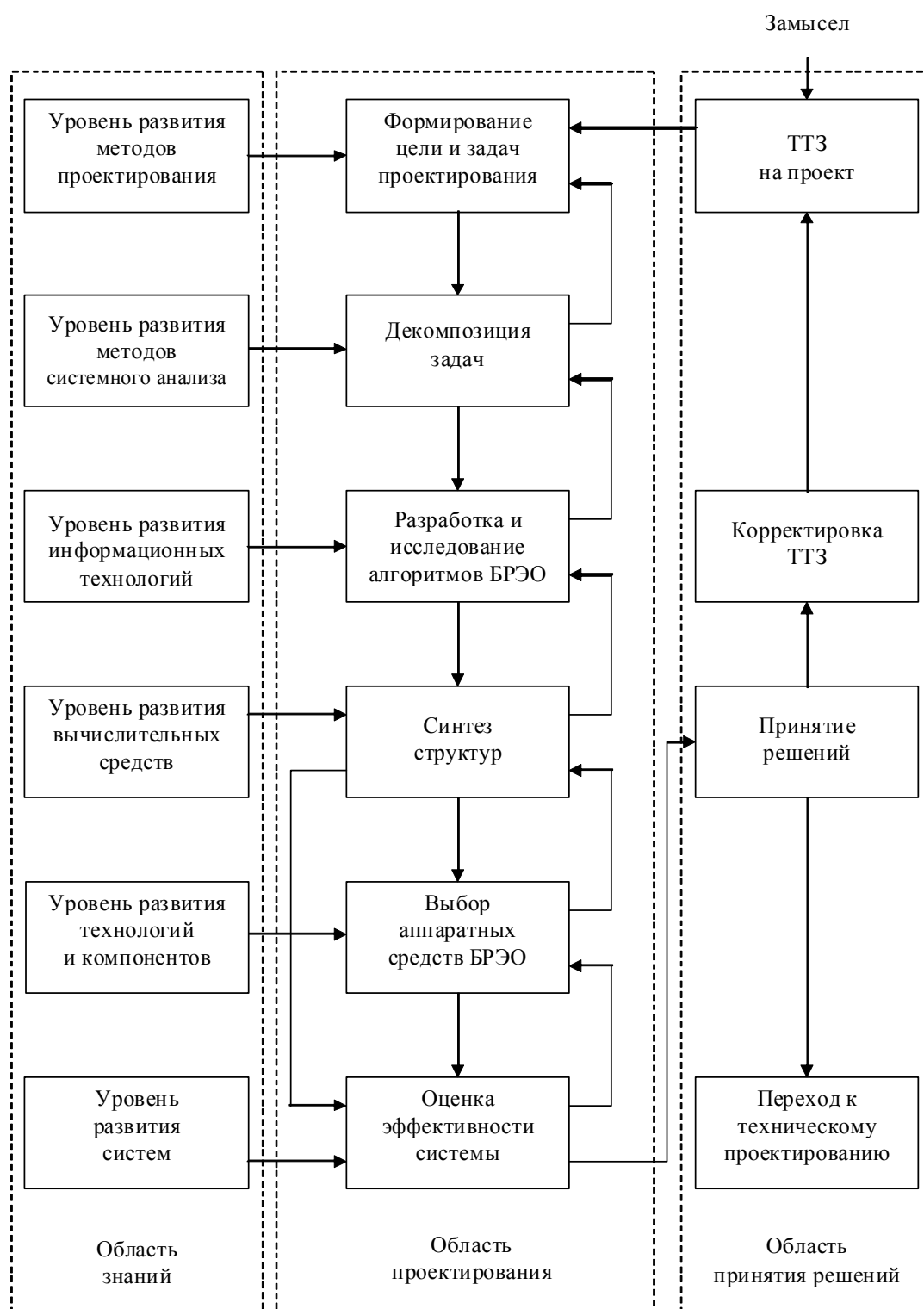


Рис. 1. Маршрут системного проектирования БРЭО

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. 2), то задача синтеза представляется как задача поиска в  $\zeta$ -мерном действительном пространстве параметров такой точки (набора из  $\zeta$  значений параметров  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\zeta$ ), для которой либо просто выполняются требования ТТЗ, либо выполняются наилучшим образом.



Рис. 2. Геометрическое представление длины вектора и оценка близости текущего проектного решения желаемому (заданному по ТТЗ) в векторном пространстве

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  $\Delta_E \rightarrow \min$ , который формализует понятие наилучшего выполнения соответствия объекта проектирования требованиям ТТЗ. Если разработана математическая модель объекта проектирования, то по постановке и методам решения задача синтеза в первом случае сводится, а во втором случае является задачей оптимизации, обеспечивающей выполнение условия

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

где  $\Delta_E$  – неотрицательно определенная мера близости функционального обеспечения выбранного  $j$ -го варианта БРЭО по отношению к наилучшему  $\Xi^*$  (заданному по ТТЗ).

### Критерий подобия проектных решений

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  $\Xi = A\Psi$ , где  $A$  – матрица линейного 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

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

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

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

либо

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

при этом считается, что  $\xi_i(\Psi) \geq \xi_i^*$ ;  $\wp_{\zeta+1}$  определяет цель проектирования — уменьшать оценку близости к желаемым значениям любого из частных показателей или суммарную близость всех критериев к их целевым 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 задает требования ТТЗ жестко,  $\xi_i(\Psi) = \xi_i^*$ ,  $i=m_2+1, m_2+2, \dots, \zeta$ , метрика  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*)$  приводится к виду

$$\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*) = \min_i \{ L(\xi_i, \xi_i^*) \} + \wp_{\zeta+1} \sum_{i=1}^{\zeta} L(\xi_i, \xi_i^*),$$

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

Выражения для  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*)$  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. Наибольшее распространение на практике получила [5] квадратичная мера:

$$\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*) = \sum_{i=1}^{\zeta} (\xi_i(\Psi) - \xi_i^*)^2.$$

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

В общем случае (см. рис. 2) векторы  $\Psi$  и  $\Xi$  являются функциями 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  $\Xi(t)$ . Расстояние между годографами параметров модели объекта проектирования  $\Xi(t)$  и их желаемых значений  $\Xi^*$  на бесконечном,

$$\Delta_{\Xi}^{\infty}(\Xi - \Xi^*) = \int_0^{\infty} (\Xi(t) - \Xi^*) dt,$$

или конечном,

$$\Delta_{\Xi}^t(\Xi - \Xi^*) = \int_0^t (\Xi(\tau) - \Xi^*) d\tau,$$

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

Задача минимизации критерия подобия  $\Delta_{\Xi}$  при квадратичной мере  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*)$  сводится к минимизации суммы квадратов отклонений

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

или

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

где  $\wp_i$  – элемент вектора концепций по параметру  $\xi_i$  БРЭО;  $\psi_i$  – значение векторного параметра, определяющее соответствующий технико-экономический показатель частной аппаратуры  $\mathbf{S}_k$ , входящей в БРЭО;  $a_{ij}$  – элемент матрицы линейного преобразования  $\Xi = A\Psi$ ;  $\xi_i^*$  – заданное в ТТЗ значение (желаемое) параметра  $\xi_i$  БРЭО, состоящего из  $s$  подсистем. В соответствии с [6] задача  $\Delta_{\Xi}(F^k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{\zeta}) - F^*(\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_{\zeta}^*)) \rightarrow \min$  поиска экстремума квадратичного критерия подобия  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*)$  сводится к задаче, в которой минимизируется сумма квадратов отклонений

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

имеющей решение по методу наименьших квадратов с использованием неопределенных множителей Лагранжа [6]. Минимум  $\Delta_{\Xi}(\mathbf{B})$  достигается при дифференцировании  $\Delta_{\Xi}(\mathbf{B})$  по  $\mathbf{B}$ :

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

Если матрица  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  не вырождена, то, умножив уравнение  $2\mathbf{A}^T \Xi^* - 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{B} = 0$  слева на матрицу  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ , получим вектор наилучших оценок в виде

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

Таким образом, задача проектирования в этом случае решается отысканием автоматизированным способом комбинации элементов  $\Xi = A\Psi$ , в совокупности удовлетворяющих требованиям ТТЗ и наиболее близко соответствующих критерию  $\Delta_{\Xi}(\Xi - \Xi^*) \rightarrow \min$  оптимальности проекта.

### Заключение

Предложенный критерий подобия проектных решений требованиям ТТЗ был апробирован на практике при разработке изделий авиационной промышленности в ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова в классах:

– пультов управления и индикации ПУИ,

- многофункциональных цветных индикаторов МФЦИ,
- бортовых вычислительных машин БЦВМ.

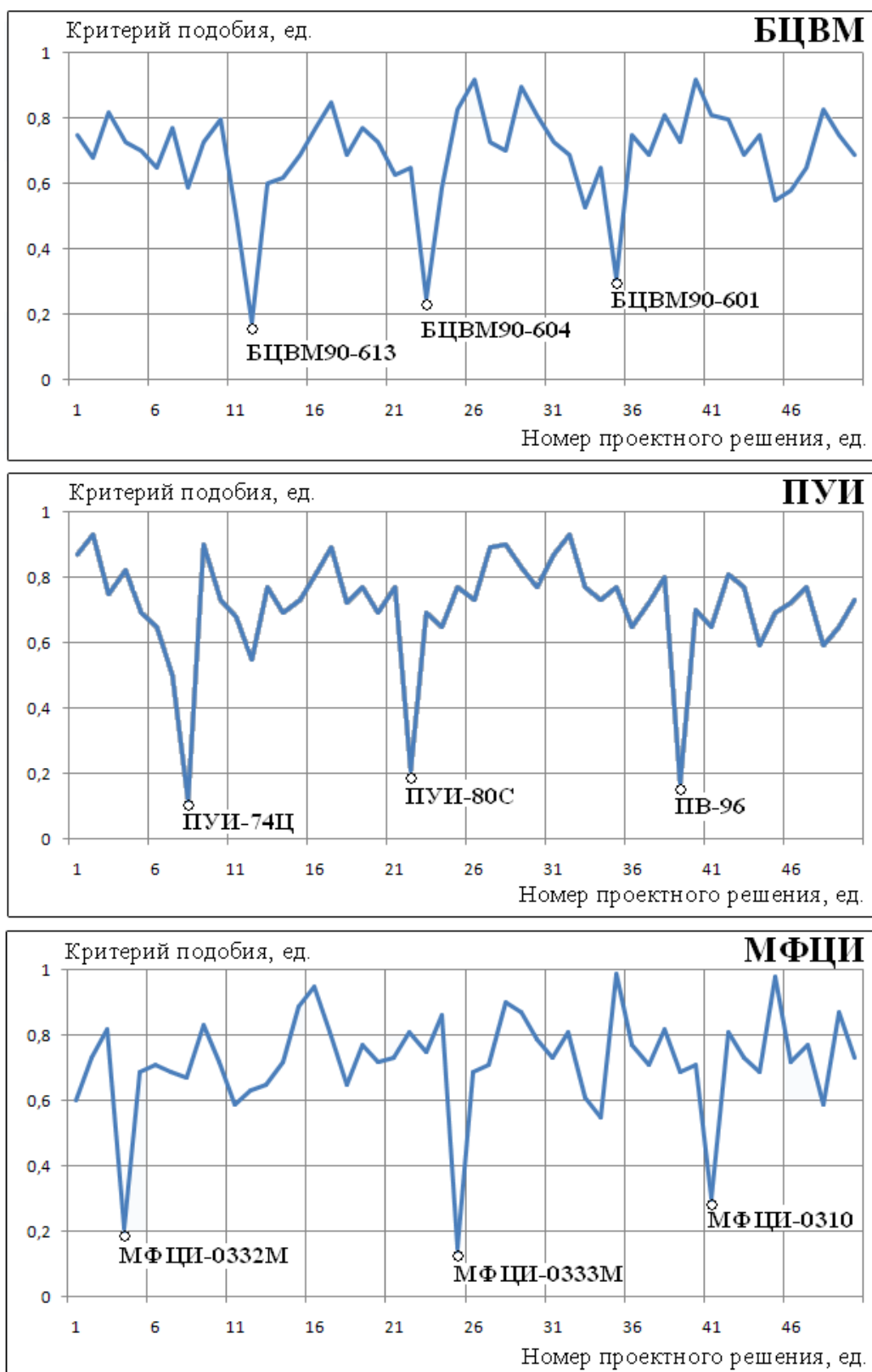


Рис. 3. Результаты моделирования при выборе проектного решения бортового оборудования

Результаты математического моделирования и выбора проектных решений представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3, массив проектных решений может быть составлен в кортеж по предпочтениям, в котором определяются наиболее близкие требованиям ТТЗ варианты проектных альтернатив по критерию подобия. В частности, отмечены номера проектных решений изделий класса БЦВМ (бортовых цифровых вычислительных машин), получивших внедрение в промышленную эксплуатацию: БЦВМ90-613, БЦВМ90-604, БЦВМ90-601. Аналогично производился выбор при проектировании в классе изделий ПУИ (пульты управления и индикации) – проектные решения: ПУИ-74Ц, ПУИ-80, ПВ96, и в классе многофункциональных цветных индикаторов МФЦИ – проектные решения: МФЦИ-03332М, МФЦИ-0333М, МФЦИ-0310.

### Литература

1. Божко А.Н., Толпаров А.Ч. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/13845.html>, свободный, язык русский, дата обращения 10.01.2010.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
3. Губанов В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрономии. – 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 / Автореферат диссертации ... доктора техн. наук по спец. 05.11.16. – Тула, 2007. – 40 с.
6. Чебраков Ю.В. Теория оценивания параметров в измерительных экспериментах. – СПб: СПб ГУ (институт химии), 1997. – 300 с. (серия: Физика, химия и технология материалов. Вып. №1).

*Сабо Юрий Иванович*

– СПб ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», главный конструктор, доктор технических наук, профессор, [postmaster@elavt.spb.ru](mailto:postmaster@elavt.spb.ru)

*Жаринов Игорь Олегович*

– СПб ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», главный специалист, кандидат технических наук, доцент, [igor\\_rabota@pisem.net](mailto:igor_rabota@pisem.net)