

УДК 629.76(083.7)

## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СОВЕРШЕНСТВУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМАНДНЫХ ПУНКТОВ

<sup>1</sup>Жеребцов Е.А., <sup>2</sup>Решетников Д.В., <sup>3</sup>Тришункин В.В.

<sup>1</sup>ФГКВБОУ ВО «Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны» Министерства обороны Российской Федерации, Ярославль, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru;

<sup>2</sup>ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru;

<sup>3</sup>Воздушно-космические силы Министерства обороны Российской Федерации, Москва

При принятии обоснованных решений о совершенствовании специальных технических систем командных пунктов необходимо учитывать его моральное старение при одновременном учете многих аспектов (обеспечения качества выполнения целевых задач, повышения надежности оборудования, снижения экономических затрат). В статье предложен способ формирования рационального состава совершенствуемых элементов специальных технических систем командных пунктов. Данный способ предназначен для осуществления синтеза варианта совершенствования специальных технических систем командных пунктов такого, что значения показателей качества соответствуют предъявляемым к ним требованиям. Способ отличается от известных тем, что для оценки качества перспективных вариантов состава совершенствуемых элементов использован обобщенный показатель изменения технического уровня, характеризующий степень совершенства этих вариантов над базовым. Предложенный способ формирования рационального состава совершенствуемых элементов специальных технических систем командных пунктов включает в себя алгоритм оценивания изменения обобщенного технического уровня специальных технических систем командных пунктов и способ решения однокритериальной задачи. Для решения однокритериальной задачи условной оптимизации при нелинейной целевой функции разработан алгоритм, который включает в себя метод  $\Psi$ -преобразования, метод штрафных функций, метод направляющих окрестностей.

**Ключевые слова:** модернизация, совершенствование, рациональный состав элементов, математическое моделирование, технические средства

## METHOD OF FORMING A RATIONAL PART OF IMPROVING ELEMENTS OF SPECIAL TECHNICAL SYSTEMS OF COMMAND POSTS

<sup>1</sup>Zherebtsov E.A., <sup>2</sup>Reshetnikov D.V., <sup>3</sup>Trishunkin V.V.

<sup>1</sup>Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru;

<sup>2</sup>Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru;

<sup>3</sup>Russian Aerospace Defense Forces, Moscow

When making informed decisions on improving the special technical systems of command posts, it is necessary to take into account its moral aging, while taking into account many aspects (ensuring the quality of target tasks, improving the reliability of equipment, reducing economic costs). In the article the method of formation of rational composition of improved elements of special technical systems of command posts is offered. This method is intended for implementation of synthesis of option of improvement of special technical systems of command posts such that values of indicators of quality conforms to the requirements imposed to them. The method differs from the known in that to assess the quality of perspective variants of the composition of the improved elements, a generalized indicator of changes in the technical level characterizing the degree of perfection of these variants over the basic one is used. In addition, the synthesis algorithm of the optimal composition improving items to solve a single-criterion task of conditional optimization with a nonlinear objective function, the algorithm of synthesis of optimal composition improving items, which includes a method  $\Psi$ -conversion, penalty method, the method guides the surrounding area.

**Keywords:** modernization, improvement, a balanced composition of elements, mathematical modeling, hardware

Основными вариантами развития существующих специальных технических систем (СТС) командных пунктов (КП) в условиях жестких требований по оперативности ввода СТС КП в строй и существенных финансовых ограничений являются: модернизация, дооборудование и доработки [1]. Кроме того, отличительной особенностью создания новой инфраструктуры КП является широкомасштабное повторное использование СТС, ранее эксплуатировавшегося или хранившегося

на существующих объектах. Следовательно, необходимо иметь четкое представление, каким образом сформировать рациональный состав совершенствуемых элементов СТС КП. Кроме того, для принятия обоснованных решений о совершенствовании СТС КП необходимо учитывать его моральное старение при одновременном учете многих аспектов (обеспечения качества выполнения целевых задач, повышения надежности оборудования, снижения экономических затрат).

Проведенный анализ современного состояния научно-методического аппарата формирования рационального состава совершенствуемых элементов сложных технических систем, к которым можно отнести СТС КП, выявил значительное количество литературы, посвященное различным аспектам этой проблемы [1–3]. Однако существует необходимость дальнейшего развития научно-методического обеспечения в направлении наиболее полного учета особенностей объекта исследования, а также технических и экономических аспектов условий его применения [4].

Исследование процессов совершенствования представляет собой двухкомпонентную проблему, которая состоит из задачи оценивания уровня развития СТС и задачи синтеза перспективной СТС.

*Алгоритм оценивания изменения обобщенного технического уровня СТС КП*

Научно-технический прогресс в области развития технических систем привел к постоянному улучшению всего спектра количественных и качественных показателей. Это относится и к СТС КП. Вместе с тем остро стоит вопрос об оценке технического уровня существующих СТС КП, а также как он изменится при их модернизации.

В общем случае, технический уровень представляет собой совокупность технических показателей качества СТС, характеризующих его соответствие лучшим отечественным и зарубежным образцам с учетом перспектив развития техники и технологий. То есть для определения абсолютного значения требуется привлечение большого массива информации из различных отраслей науки и техники. Для решения частных задач можно ограничиться определением изменения технического уровня СТС КП.

Для того чтобы свести к обобщенному показателю ряд частных показателей, их необходимо привести к безразмерной шкале, т.е. каждому показателю  $r_i$ , имеющему размерность и свою шкалу измерения, ставится в соответствие  $i$ -е значение безразмерно показателя  $p_i$  шкалы [2]:

$$p_i = \frac{|r_i^{\text{нов}} - r_i^{\text{ст}}|}{r_i^{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где  $r_i^{\text{нов}}$  – новое значение  $i$ -го показателя;  $r_i^{\text{ст}}$  – старое значение  $i$ -го показателя.

Этот показатель  $p_i$  показывает относительное изменение  $i$ -го показателя при выборе стратегии проведения совершенствования по сравнению с  $i$ -м показателем действующей СТС КП.

Старое (базовое) значение  $i$ -го показателя может быть получено в результате тех-

нического и экономического мониторинга или взято из технической документации (Формуляр, Паспорт, Техническое описание и пр.).

Новое значение  $i$ -го показателя рассчитывается при помощи различных физико-статистических методов, т.е. по каждому выбранному показателю проводится расчет значений в зависимости от варианта совершенствования

$$r_i^{\text{нов}} = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}), \quad (2)$$

где  $x_{ji}$  –  $i$ -й показатель  $j$ -го элемента СТС;  $n$  – количество элементов СТС.

При оценивании технического уровня используются лишь некоторые показатели качества, которые относительно полно характеризуют качество или исследуемый аспект качества СТС.

Для формирования определяющих показателей качества было предложено выделить совокупность операций: построение «морфологического ящика», отбор важных параметров и формирование иерархической структуры качества объекта.

Выбранные параметры обладают разной степенью важности в случае применения исследуемого объекта по целевому назначению, в связи с этим необходимо ввести коэффициенты относительной важности параметра.

Коэффициенты относительной важности параметра  $\omega_i$  могут быть назначены лицом, принимающим решение, или в результате обработки матриц парных сравнений методом собственных значений, разработанный Т. Саати

$$p_{\omega i} = \omega_i \cdot p_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

В результате преобразований (1)–(3) получаем параметр относительного изменения  $i$ -го параметра СТС КП, масштабированный в зависимости от предпочтений группы экспертов.

Таким образом, в показателе изменения обобщенного технического уровня отражено изменение ключевых показателей СТС, т.е.

$$\Delta P^{\text{Общ}} = F(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (4)$$

или

$$\Delta P^{\text{Общ}} = \frac{\left( \sum_{j=1}^{N-M} (\omega_j \cdot p_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\left( \sum_{i=1}^M (\omega_i \cdot p_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

где  $\omega_i$  – коэффициент важности  $i$ -го параметра;  $p_i$  – относительное изменение  $i$ -го показателя;

$N$  – количество параметров СТС КП;  
 $M$  – количество улучшенных параметров СТС КП.

Очевидно, что если выполняется неравенство

$$\Delta P^{\text{Общ}} > 1, \quad (6)$$

то это свидетельствует о повышении технического уровня СТС КП после проведения работ по совершенствованию.

Если же для показателя (7) выполняется неравенство

$$0 \leq \Delta P^{\text{Общ}} < 1, \quad (7)$$

то это свидетельствует о снижении технического уровня исследуемого объекта.

Функция (5) является нелинейной и многоэкстремальной, что свидетельствует о необходимости разработки комбинированного метода нахождения оптимального решения.

*Алгоритм синтеза оптимального состава совершенствуемых элементов на основе метода  $\Psi$ -преобразования*

Задача формирования рационального состава совершенствуемых элементов СТС КП является однокритериальной.

В связи с особенностями предложенной целевой функции (отсутствие явного аналитического представления, ее нелинейность и многоэкстремальность) был разработан алгоритм решения однокритериальной задачи синтеза, который представляет собой комбинацию нескольких методов. Данный алгоритм основан на объединении алгоритма определения области притяжения глобального экстремума (метод  $\Psi$ -преобразования, комбинированный с методом штрафных функций) и алгоритма поиска локального целочисленного экстремума (метод направляющих окрестностей).

Метод  $\Psi$ -преобразования, комбинированный с методом штрафных функций, лежит в основе алгоритма решения релаксированной задачи синтеза оптимального состава совершенствуемых элементов СТС. Данный алгоритм предназначен для определения области притяжения глобального экстремума. Применение штрафных функций упрощает попадание в область допустимых решений, благодаря чему сокращается время, расходуемое на статистические испытания.

Для нахождения целочисленного решения однокритериальной задачи применен метод направляющих окрестностей, в основе которого лежат идеи методов вектора спада и возможных направлений.

Задачу синтеза оптимального состава совершенствуемых элементов СТС КП можно сформулировать в следующем виде:

Дано:

$$s_{ij\langle k \rangle} = (x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijk})^T, \\ i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}, k = \overline{1, l}, \quad (8)$$

$$t_{ij}^{CB} = f(s_{ij\langle k \rangle}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}, k = \overline{1, l}, \quad (9)$$

$$C_{ij}^{CB} = C_{ij}^{CB}(s_{ij\langle k \rangle}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}, k = \overline{1, l}, \quad (10)$$

$$C_{ij}^{\exists} = C_{ij}^{\exists}(s_{ij\langle k \rangle}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}, k = \overline{1, l}, \dots, l. \quad (11)$$

$t_{\max}^{CB}$  – директивное время, отводимое на проведение совершенствования элемента СТС КП;

$C_{\text{д}}^{CB}$  – директивное количество затрат, отводимое на проведение совершенствования СТС КП.

Данные (8)–(11) заданы таблично в виде реляционной базы данных, сформированных на основе имитационного моделирования или другим способом.

Найти: вектор рационального состава совершенствуемых элементов СТС КП

$$\vec{G}_{\langle n \rangle} = (g_{1l}, g_{2l}, \dots, g_{nl})^T, \quad (12)$$

где  $g_{ij\langle 3 \rangle} = \langle s_{ij\langle k \rangle}, C_{ij}^{CB}, t_{ij}^{CB} \rangle$  –  $j$ -й вариант совершенствования  $i$ -го элемента СТС КП;

$s_{ij\langle k \rangle}$  – набор значений  $k$  параметров  $j$ -го варианта совершенствования  $i$ -го элемента СТС КП;

$t_{ij}^{CB}$  – продолжительность проведения работ по совершенствованию  $i$ -го элемента СТС;

$C_{ij}^{CB}$  – показатель затрат на проведение работ по совершенствованию  $i$ -го элемента СТС; при котором максимизируется обобщенный показатель изменения технического уровня  $\Delta P^{\text{Общ}}$

$$\vec{G}_{\langle n \rangle} = (g_{1l}, g_{2l}, \dots, g_{nl})^T : \Delta P^{\text{Общ}} \rightarrow \max. \quad (13)$$

Результатом решения задачи синтеза состава элементов СТС КП является спектр рациональных составов совершенствования элементов  $\vec{G}_{\langle n \rangle} = (g^1, g^2, \dots, g^n)^T$ .

Предложенная задача однокритериальной оптимизации (13) является задачей оптимизации с ограничениями или задачей условной оптимизации.

Целевая функция (5) является нелинейной относительно вектора переменных (12), т.е. рассматриваемая задача оптимизации относится к задачам нелинейного программирования.

В процессе поиска оптимального решения может достигаться локальный максимум (вектор  $\vec{G}_{\langle n \rangle}^*$ ), когда соответствующая ему точка оказывается лучшей в некоторой

окрестности точки  $G^*$ , или глобальный оптимум, если изображающая точка является наилучшей среди всего множества допустимых решений.

Особенности, рассмотренные выше, обуславливают структуру алгоритма решения задачи, блок-схема которого представлена на рисунке.

Решение задач нелинейного программирования при наличии ограничений в виде неравенств возможны благодаря работам Куна, Таккера.

Для решения подобных задач необходимо использовать штрафные функции, благодаря которым задача с ограничениями в виде неравенств фактически сводится к задаче без ограничений.

Применение штрафных функций упрощает попадание в область допустимых решений, благодаря чему сокращается время, расходуемое на статистические испытания.

Для применения метода штрафных функций формируется новая функция  $\Phi(g)$ , которая при определении максимума имеет вид

$$\Phi(g) = \Delta P^{\text{общ}}(g) - \sum_{i=1}^m \gamma_i d_i(g), \quad (14)$$

здесь

$$\gamma_i = \begin{cases} 0, & \text{при } d_i(g) \leq b_i, \\ c, & \text{при } d_i(g) > b_i, \end{cases} \quad (15)$$

где  $c$  – штрафная константа.

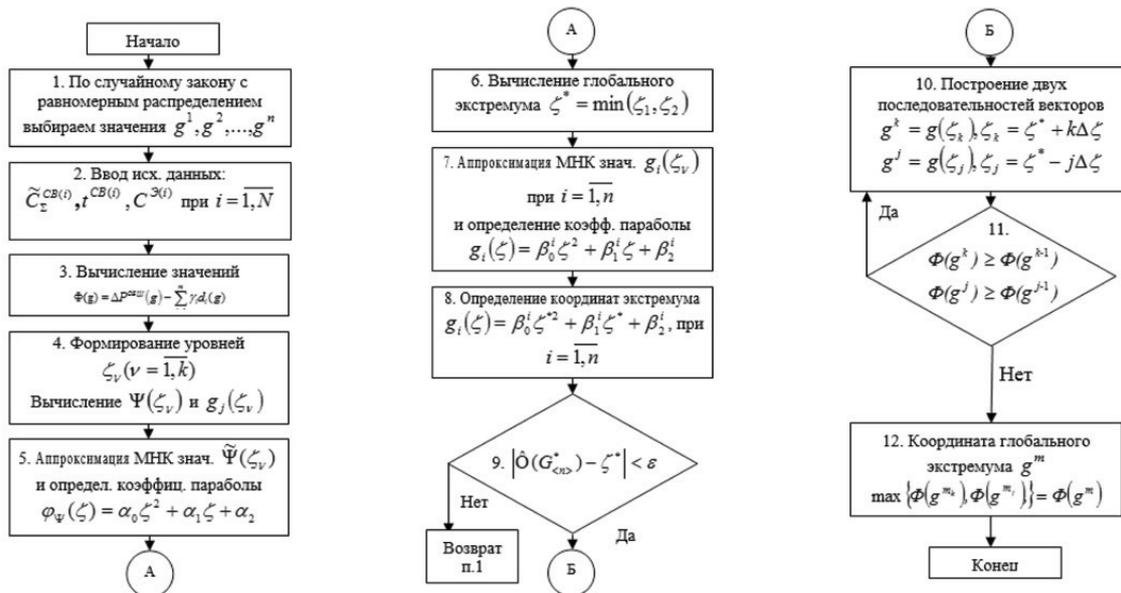
Полученный при помощи метода  $\Psi$ -преобразования вектор

$$\vec{G}_{(n)}^* = (g_{1l_1}, g_{2l_2}, \dots, g_{nl_n})^T$$

является *нецелочисленным*, т.е. он является недостижимым рекордом. Для получения целочисленного решения необходимо воспользоваться методом целочисленного программирования. Общеизвестно, что наиболее простым и точным методом поиска решения подобных задач является метод полного перебора. Однако тривиальный подход полного перебора практически осуществим лишь для задач с единичными размерностями реальных исходных данных, т.е. требуется применение специальных алгоритмов, с помощью которых удастся уменьшить трудоемкость решения задачи.

Для этого предлагается использовать один из прямых методов локальной оптимизации – метод направляющих окрестностей. Этот метод представляет собой итерационный метод приближенного решения целочисленных задач выпуклого программирования, в основу которого положены идеи двух известных методов – метода возможных направлений и вектора спада.

В случае если полученное в результате работы алгоритма локальной оптимизации решение оказалось хуже, чем наилучшая реализация из базы данных, для которой рассчитан обобщенный показатель изменения технического уровня, то предлагается использовать метод отсечения для поиска локальных экстремумов [5].



Блок-схема алгоритма синтеза оптимального варианта совершенствования СТС КП методом  $\Psi$ -преобразования

Таким образом, применение метода  $\Psi$ -преобразования обусловлено его особенностями и предназначено для поиска области притяжения глобального экстремума релаксированной задачи (снято ограничение на целочисленность). Применение штрафных функций упрощает попадание в область допустимых решений, что сокращает количество статистических испытаний.

Для нахождения целочисленного решения применяется метод направляющих окрестностей, который предназначен для локального поиска оптимального решения.

Для оценивания достоверности научно-методического обеспечения, приведённого в статье, проведено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментального расчета (различие результатов составило 7%), а также проведено исследование чувствительности моделей к изменению исходных данных, возможным нарушениям допущений и предположений.

### Выводы

Разработан способ решения задачи по формированию рационального состава совершенствуемых элементов СТС КП. Он включает в себя алгоритм оценивания изменения обобщенного технического уровня СТС и способ решения однокритериальной задачи. Данный способ отличается от известных тем, что для оценки качества

перспективных вариантов состава совершенствуемых элементов использован обобщенный показатель изменения технического уровня, характеризующий степень совершенства этих вариантов над базовым. Кроме того, для решения однокритериальной задачи условной оптимизации при нелинейной целевой функции разработан алгоритм синтеза оптимального состава совершенствуемых элементов, включает в себя метод  $\Psi$ -преобразования, метод штрафных функций, метод направляющих окрестностей.

### Список литературы

1. Буренок В.М., Погребняк Р.Н., Скотников А.П. Методология обоснования перспектив развития средств вооруженной борьбы общего назначения: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 368 с.
2. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – СПб.: НПО СП, 2015. – С. 20–22.
3. Буренок В.М. Направления и проблемы создания системы вооружения будущего // Вестник Академии военных наук. – М.: Академии военных наук, 2016. – С. 24–28.
4. Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В. Моделирование системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем ракетно-космических комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 645. / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – С. 23–29.
5. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 508 с.