

УДК: 629.764

DOI: 10.53816/23061456\_2021\_9-10\_3

**МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ  
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МИНОБОРОНЫ РОССИИ  
В СООТВЕТСТВИИ С ПОТРЕБНОСТЯМИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

**METHODOLOGY FOR CHOOSING A RATIONAL OPTION FOR THE  
DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL TESTING BASE OF THE TEST  
COMPLEX OF THE RUSSIAN MINISTRY OF DEFENSE IN ACCORDANCE  
WITH THE NEEDS OF ENSURING TESTING OF SPACE VEHICLES**

*Канд. техн. наук А.Н. Нестечук, канд. техн. наук К.А. Крупский, канд. воен. наук С.Г. Хлебников*

*Ph.D. A.N. Nestechuk, Ph.D. K.A. Krupskiy, Ph.D. S.G. Khlebnikov*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

В статье рассмотрено решение задачи выбора рационального варианта развития экспериментально-испытательной базы испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств. Разработана методика решения оптимизационной задачи, в основе которой лежит метод нелинейного математического программирования в булевых переменных. Исходными данными для решения задачи являются тактико-технические требования к разрабатываемым (модернизируемым) образцам космических средств и военно-технические данные об имеющихся средствах экспериментально-испытательной базы. Разработанную методику предлагается использовать на этапе формирования вариантов развития экспериментально-испытательной базы испытательного комплекса Минобороны России, в части обеспечения испытаний космических средств.

**Ключевые слова:** объект испытаний, показатель качества, показатель эффективности, экспериментально-испытательная база, испытательный комплекс, космические средства.

The article considers the problem of choosing a rational option for the development of the experimental and testing base of the test complex of the Ministry of Defense of Russia in accordance with the needs of ensuring testing of space vehicles. The proposed method for solving the analyzed optimization problem is carried out using the method of nonlinear mathematical programming in Boolean variables. The initial data for solving the problem are the tactical and technical requirements for the developed (modernized) models of space assets and military-technical data on the available means of the experimental and testing base. The developed methodology is proposed to be used at the stage of forming options for the development of the experimental and testing base of the test complex of the Ministry of Defense of Russia in terms of ensuring tests of space vehicles.

**Keywords:** test object, quality indicator, efficiency indicator, experimental test base, test complex, space vehicles.

## Введение

Обоснование вариантов развития системы вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации происходит в ограниченный период времени при жестких ресурсных ограничениях, что требует предварительного проведения полного комплекса мероприятий по обоснованию и формированию состава и содержания программных мероприятий под выделенные лимиты ассигнований, его оперативного анализа с целью принятия решений [3].

Для проведения испытаний космических средств (КСр) используется экспериментально-испытательная база (ЭИБ), которая представляет собой совокупность технических средств испытательных космодромов, наземных комплексов управления, систем мониторинга околоземного космического пространства, предназначенная для решения задач испытаний разрабатываемых, серийно производимых и находящихся в эксплуатации КСр. Экспериментальная отработка и испытания КСр представляют собой сложную и многообразную систему мероприятий и являются основным источником информации для обоснования принимаемых решений при создании новых и модернизации существующих образцов КСр [5].

Развитие КСр приводят к необходимости взаимозависимого развития ЭИБ с целью соответствия возможностей комплексов ЭИБ современным требованиям обеспечения испытаний. В виду того, что существует множество вариантов развития ЭИБ, возникает необходимость определения рационального варианта развития ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр, с учетом требований к комплексам ЭИБ по типам испытываемых образцов вооружения.

Существующие подходы к формированию состава мероприятий развития ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), в общем случае, представляют собой совокупность взаимосвязанных моделей, методик и алгоритмов, позволяющих на основе сформированных исходных данных реализовать многоэтапную процедуру формирования рационального состава ЭИБ [1].

Разработанная методика выбора рационального варианта развития использует метод

нелинейного программирования в булевых переменных, что позволяет уменьшить вероятность принятия неверного решения при выборе варианта развития ЭИБ с учетом требований к комплексам ЭИБ по типам испытываемых образцов вооружения. Под вариантом развития ЭИБ понимается совокупность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по созданию новых и модернизации существующих средств ЭИБ, а также серийные поставки таких средств.

## Постановка задачи

Цель развития ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России представляет собой обеспечение проведения в заданные сроки натуральных испытаний КСр с требуемым уровнем достоверности оценок их тактико-технических характеристик (ТТХ). Принципы развития средств ЭИБ определяются на основе анализа тактико-технических требований (ТТТ), предъявляемых к испытываемым образцам КСр и условий проведения их испытаний, анализа тенденций развития науки и техники в целом, аналогичных средств за рубежом, технической политики, проводимой государством и других факторов. Основными принципами развития средств ЭИБ являются те же принципы, что и при развитии системы вооружения [2].

Исходными данными для решения задачи выбора рационального варианта развития ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр являются:

1) тактико-технические требования к разрабатываемым (модернизируемым) образцам КСр, испытания которых предстоят в предстоящем программном периоде, и условия проведения их испытаний, определяющие требуемые возможности ЭИБ, которые в формализованном виде можно представить в виде множества

$$U = \{u_i, i = 1 \dots I\},$$

где  $I$  — количество образцов КСр, испытания которых предстоят в предстоящем программном периоде;

2) военно-технические исходные данные об имеющихся средствах ЭИБ, их дислокациях и ТТХ, которые в формализованном виде, на начало предстоящего программного периода можно представить в виде множества

$$S^0 = \{s_j, j = 1 \dots J\},$$

где  $s_j = \langle \mathbf{u}_j, \mathbf{r}_j \rangle$  —  $j$ -е средство ЭИБ;

$\mathbf{u}_j$  — вектор значений технических характеристик, определяющий возможности  $j$ -го средства ЭИБ [6];

$\mathbf{r}_j$  — вектор параметров, характеризующий дислокацию (территориальное расположение)  $j$ -го средства ЭИБ;

$J$  — количество средств ЭИБ в составе испытательного комплекса Минобороны России;

3) лимиты ассигнований, выделяемых на развитие ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в предстоящем программном периоде

$$C_\tau^{\text{доп}} \leq C_\tau(S), \quad (1)$$

где  $C_\tau(S)$  — затраты на реализацию  $s$ -го варианта развития ЭИБ в предстоящем программном периоде;

$S$  — вариант развития ЭИБ в предстоящем программном периоде;

$\tau$  — установленный период развития ЭИБ.

Необходимо выбрать из множества вариантов развития ЭИБ вариант  $S^*$ , который обеспечивает достижение максимума функционала  $Y$ , характеризующего обобщенный показатель (оценку качества) варианта развития, при следующих ограничениях:

1) на общий объем ассигнований, выделяемых на реализацию вариантов развития ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр в предстоящем программном периоде (1);

2) на эффективность (целевой эффект) функционирования ЭИБ ( $W_\tau^{\text{доп}}$ ) с учетом требований к ее комплексам по типам испытываемых образцов ВВСТ.

Тогда ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России с учетом выбранного варианта развития на конец программного периода можно записать в виде

$$S_\tau = S^0 + S^*$$

при определенной матрице связности средств ЭИБ с испытываемыми образцами КСр  $\mathbf{G}_{I \times J}(U, S_\tau)$  в предстоящем программном периоде.

Приведенная постановка научной задачи, в формализованном может быть записана в виде

$$S^* = \underset{S \in \Omega_s}{\operatorname{argmax}} Y[W_\tau(S), C_\tau(S)], \quad (2)$$

$$\begin{cases} W_\tau(S) \geq W_\tau^{\text{доп}}; \\ C_\tau(S) \leq C_\tau^{\text{доп}}; \end{cases}$$

где  $S$  — вариант развития ЭИБ в предстоящем программном периоде;

$W_\tau(S)$  — показатель эффективности функционирования ЭИБ в части обеспечения испытаний КСр при реализации  $s$ -го варианта развития ЭИБ;

$\Omega_s$  — множество возможных вариантов развития ЭИБ в предстоящем программном периоде.

С учетом того, что ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России является сложной организационно-технической системой, включающей в свой состав разнотипные комплексы и средства, поэтому получить аналитически значение функционала  $Y$ , даже как свертку из показателей  $W_\tau(S)$ ,  $C_\tau(S)$ , представляется труднореализуемой задачей [7].

Поэтому целесообразно изменить постановку задачи (2) таким образом, чтобы была возможность оценивать варианты развития ЭИБ, а далее выбирать варианты соответствующие выбранным критериям. Такое возможно при допущении, что максимум целевой функции обеспечивается тогда, и только тогда, когда комплекс ЭИБ способен выполнить в полном объеме все задачи обеспечения испытания образцов КСр в программном периоде, т.е.  $W_\tau(S) \rightarrow \max$ , при ограничениях (2).

Таким образом, изменение постановки задачи обеспечивает получение решения (2) при сохранении состава исходных данных и критерильных условий для ее решения.

### Описание методики

Частный показатель эффективности функционирования комплекса ЭИБ определяется как функционал вида

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{F}(\mathbf{u}_j, \mathbf{r}_j), j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{w}_k = [w_k, v_1, v_2, \dots, v_N]$ ;

$w_k$  — показатель эффективности функционирования  $k$ -го комплекса ЭИБ;

$v_1, v_2, \dots, v_N$  — показатель качества  $k$ -го комплекса ЭИБ;

$N$  — количество показателей качества  $k$ -го комплекса ЭИБ.

Тогда коэффициент возможности  $k$ -го комплекса ЭИБ, определяемый как отношение возможностей комплекса к значениям требований, предъявляемым к комплексам ЭИБ по типам испытываемых образцов вооружения можно записать в виде

$$\rho_k = \frac{w_k}{w_k^{\text{треб}}},$$

где  $w_k^{\text{треб}}$  — требования к эффективности функционирования  $k$ -го комплекса ЭИБ, предъявляемые к комплексам по типам испытываемых образцов вооружения.

Расчет коэффициента  $\rho_k$  осуществляется при выполнении условий вида

$$\begin{cases} v_1 \geq v_1^{\text{треб}} \\ v_2 \geq v_2^{\text{треб}} \\ \vdots \\ v_N \geq v_N^{\text{треб}} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $v_1^{\text{треб}}, v_2^{\text{треб}}, \dots, v_N^{\text{треб}}$  — требования к показателям качества  $k$ -го комплекса ЭИБ.

При невыполнении одного из условий (4) значение коэффициента  $\rho_k$  полагается равным нулю.

Тогда применительно к решаемым задачам ЭИБ при испытаниях КСр, определение значений показателя  $W_\tau(S)$  рассматривается как относительный показатель решения множества задач по испытаниям КСр исходя из ТТТ, к образцу разрабатываемого (модернизируемого) средства ЭИБ в соответствии с вариантом развития ЭИБ.

Для выполнения НИОКР и подготовки к серийному производству требуется некоторое время  $\tau_j$  и годовые затраты  $c_j^{\text{НИОКР}}$ . Стоимость всей программы разработки, производства и закупки средства ЭИБ определяется с помощью выражения [4]:

$$c_j = c_j^{\text{НИОКР}} \tau_j + c_j^{\text{зак}} L,$$

где  $c_j^{\text{зак}}$  — стоимость закупки  $j$ -го средства ЭИБ;  
 $L$  — количество потребных средств ЭИБ для обеспечения испытаний КСр в предстоящем программном периоде.

Таким образом, задача оценивания значений показателя эффективности, обеспечивающего максимальную вероятность покрытия множества задач по испытаниям КСр, при рассматриваемом варианте развития ЭИБ, с учетом ограничений на финансовые затраты при его реализации приобретает вид

$$\begin{cases} W_\tau(S) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - \rho_j \cdot x_j) \rightarrow \max_{x_j \in X_S}, \\ C_\tau(S) = \sum_{j=1}^J (c_j \cdot x_j) \leq C_\tau^{\text{доп}}, \\ x_j \in \{0; 1\}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_j$  — индикатор включения средства ЭИБ в обеспечение испытаний образца КСр,  $x_j = 1$  — средство принимает участие в обеспечении испытаний,  $x_j = 0$  — противоположное событие;

$X_S$  — множество индикаторов включения средств ЭИБ в обеспечение испытаний образца КСр в предстоящем программном периоде.

Решение оптимизационной задачи в виде системы (5) можно получить, используя методы нелинейного математического программирования в булевых переменных.

Таким образом, для формирования множества вариантов развития ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр необходимо на основе исходных данных рассчитать значение показателя эффективности, обеспечивающего максимальную вероятность покрытия множества задач обеспечения испытаний КСр, с учетом ограничений с использованием системы (5).

В качестве решения оптимизационной задачи выступает вариант развития ЭИБ, включающий в себя количество разрабатываемых (модернизируемых) средств ЭИБ, закупаемых средств ЭИБ, временные затраты на реализацию мероприятий развития ЭИБ, удовлетворяющая требованиям системы (5).

Исходные данные по вариантам ЭИБ

Вариант развития ЭИБ	Эффективность функционирования (количество решаемых задач)	Число потребных средств ЭИБ	Потребный срок разработки и производства, год	Стоимость разработки и производства единичного средства ЭИБ, млн у.е.	Стоимость закупки единичного средства, млн у.е.
Вариант № 1	3	17	3	12	1,7
Вариант № 2	2	28	2	9	1,2
Вариант № 3	4	14	3	20	2,2
Вариант № 4	3	24	2	15	1,5

### Пример расчета с использованием разработанной методики

В качестве примера рассматриваются четыре альтернативных варианта развития ЭИБ, способных совместно решить десять задач обеспечения испытаний КСр. Представленные варианты развития ЭИБ (таблица) формируются на основе анализа предложений по мероприятиям развития ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств.

Требуется выбрать варианты программных мероприятий по развитию ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр при заданном лимите ассигнований, равным 200 млн у.е.

Решение:

1. Определяем коэффициенты возможностей  $i$ -го комплекса ЭИБ:

$$\rho_1 = \frac{3}{10} = 0,3; \quad \rho_2 = \frac{2}{10} = 0,2;$$

$$\rho_3 = \frac{4}{10} = 0,4; \quad \rho_4 = \frac{3}{10} = 0,3.$$

2. Определяем объем финансирования варианта, млн у.е.:

$$c_1 = 12 \cdot 3 + 1,7 \cdot 17 = 64,9; \quad c_2 = 9 \cdot 2 + 1,2 \cdot 28 = 51,6;$$

$$c_3 = 20 \cdot 3 + 2,2 \cdot 14 = 90,8; \quad c_4 = 15 \cdot 2 + 1,5 \cdot 24 = 66.$$

Все необходимые данные для решения системы (3) получены.

3. Решаем оптимизационную задачу, с помощью существующих математических пакетов (MathCad, MatLab и т.п.).

Согласно полученному решению, рациональными вариантами развития ЭИБ призна-

ются №№ 1, 2, 4 со значениями показателей:  $W_{\tau}(S) = 0,608$ ;  $C_{\tau}(S) = 182,5$  млн у.е. Оставшаяся сумма лимитов ассигнований в 17,5 млн у.е. может быть использована для финансирования развития других обеспечивающих подсистем.

### Заключение

В основе разработанной методики лежит решение оптимизационной задачи методом нелинейного математического программирования в булевых переменных. Примененный метод позволяет сформировать множество допустимых значений целевой функции и выбрать рациональное решение по возможным направлениям и количественным параметрам вариантов развития ЭИБ испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр.

Таким образом, представленная методика позволяет обосновывать предложения по мероприятиям развития ЭИБ на этапе формирования множества альтернатив вариантов развития ЭИБ при формировании долгосрочных плановых документов развития вооружения, военной и специальной техники.

### Литература

1. Буренок В.М., Косенко А.А., Лавринов Г.А. Техническое оснащение Вооруженных Сил Российской Федерации: организационные, экономические и методологические аспекты. — М.: Машиностроение. 2007. 496 с.
2. Буренок В.М. Программно-целевое планирование развития экспериментально-испытательной базы полигонов Министерства обороны Российской Федерации. — М.: Журнал «Вестник Академии военных наук». 2007. № 3 (20). С. 82–85.

3. Буренок В.М., Стахмич Л.В. Совершенствование испытательного комплекса Министерства обороны Российской Федерации — М.: Журнал «Военная мысль». 2007. № 12. С. 16–19.

4. Буравлев А.И., Нежинский Н.Н. Методика оптимизации номенклатуры образцов вооружения и военной техники при формировании государственной программы вооружения // Вооружение и экономика. — М.: РАРАН. 2010. № 1 (9). С. 49–52.

5. Груздев Н.В., Крупский К.А., Шавин А.С. Методика обоснования рационального состава экспериментально-испытательной базы полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. Вып. 668. С. 250–256.

6. Найденов В.Г., Першин Е.В. Постановка задачи определения оптимального типажа средств экспериментально-испытательной базы полигона Минобороны России для испытаний образцов ПВО-ПРО // Вооружение и экономика. — М.: РАРАН. 2018. № 4 (46). С. 15–20.

7. Хлебников С.Г., Прокопенко Е.А., Пирухин В.А. Методика обоснования предложений в государственную программу вооружения по развитию вооружения и военной техники Воздушно-космических сил // Известия РАРАН. 2020. № 2 (112). С. 34–38.

### References

1. Burenok V.M., Kosenko A.A., Lavrinov G.A. Technical equipment of the Armed Forces of the Russian Federation: organizational, economic and

methodological aspects. — М.: Mashinostroenie. 2007. 496 p.

2. Burenok V.M. Program-targeted planning of the development of the experimental test base of the training grounds of the Ministry of Defense of the Russian Federation — М.: Journal «Bulletin of the Academy of Military Sciences». 2007. № 3 (20). P. 82–85.

3. Burenok V.M., Stakhmich L.V. Improvement of the test complex of the Ministry of Defense of the Russian Federation — М.: Journal «Military Thought». 2007. № 12. P. 16–19.

4. Buravlev A.I., Nezhinsky N.N. Methodology for optimizing the nomenclature of weapons and military equipment in the formation of the state weapons program // Arms and Economics. — М.: RAARAN. 2010. № 1 (9). P. 49–52.

5. Gruzdev N.V., Krupskiy K.A., Shavin A.S. Methodology for substantiating the rational composition of the experimental and testing base of the polygon (cosmodrome) in accordance with the needs of ensuring testing of space vehicles // Proceedings of the A.F. Mozhaisky. 2019. Issue. 668. P. 250–256.

6. Naydenov V.G., Pershin E.V. Statement of the Problem of Determining the Optimal Type of Means of the Experimental and Testing Base of the Test Site of the Ministry of Defense of Russia for Testing of Air Defense-Missile Defense Models // Arms and Economics. — М.: RAARAN. 2018. № 4 (46). P. 15–20.

7. Khlebnikov S.G., Prokopenko E.A., Pirukhin V.A. Methodology for substantiating proposals to the state armament program for the development of armaments and military equipment of the Aerospace Forces // Izvestia RAARAN. 2020. № 2 (112). P. 34–38.