

УДК 629.7.084

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Кокарев А.С., Марченко М.А., Пачин А.В.

*ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru*

Настоящая статья посвящена описанию методики формирования программы повышения ремонтпригодности оборудования сложных технических комплексов за счет оптимального распределения средств на доукомплектование их ЗИПом и реализацию конструктивных доработок, снижающих время простоя отказавшего элемента комплекса. В качестве примера сложных технических комплексов в статье рассмотрены технологические системы пусковых установок и подвижных командных пунктов ракетных комплексов. Для определения коэффициента готовности комплекса предварительно рассчитывается время простоя каждого из его элементов в случае отказа. Так как получаемые функциональные зависимости являются сепарабельными функциями, то для их решения применяется метод динамического программирования. При этом находится спектр оптимальных решений для различных допустимых значений финансирования мероприятий повышения ремонтпригодности рассматриваемого комплекса, что позволяет привлечь к рассмотрению кроме стоимости комплекта ЗИП и другие, характеризующие его, показатели.

Ключевые слова: коэффициент готовности, время восстановления, конструктивные доработки, спектр решений

INTEGRATED DEVELOPMENT PROGRAM IMPROVEMENT MAINTAINABILITY OF COMPLICATED TECHNICAL COMPLEXES

Kokarev A.S., Marchenko M.A., Pachin A.V.

*Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education Mozhaisky Military Space Academy,
Saint-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru*

This article describes a technique of formation programs to improve the maintainability of the equipment of complex technical systems. Solution is optimal allocation of funds for the fitting of spare parts of equipment and implementation of various structural modifications. As an example of complex technical systems in the article were considered the technological systems of missile launchers and mobile command posts. To determine the availability of the complex pre-calculated downtime of each of its elements in the event of a failure. Since the obtained functional dependences are separable functions, their solution applies dynamic programming method. This is a range of optimal solutions for a variety of valid values funding increase the maintainability of this complex.

Keywords: availability coefficient, structural improvements, range of solutions

Для выполнения задач по проведению учебно-боевых и испытательных пусков межконтинентальных баллистических ракет (МБР) испытательные части космодрома имеют на вооружении сложные технические комплексы (СТК) – автономные пусковые установки и подвижные командные пункты боевых ракетных комплексов. Комплексы оснащаются унифицированными системами, позволяющими выполнять различные операции на этапах подготовки и проведения пуска МБР. Описываемые системы выполнены в виде вычислительного комплекса, рабочих мест операторов дежурной смены, аппаратуры обмена данными по различным каналам связи и систем энергоснабжения.

Анализ современного состояния СТК показал, что большинство из них выработали свой технический ресурс и продолжают функционировать в режиме продленного ресурса. При этом указанные комплексы находятся в работоспособном состоянии, обеспечиваемом путем постоянного проведения ремонтно-профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

Существующие [2, 4, 5] методики повышения ремонтпригодности и, в частности, расчета ЗИП обладают слабыми аналитическими, в том числе доказательными, возможностями, ибо они позволяют получить только «точечное» решение для каждой составной части изделия, а не для изделия в целом. При этом совокупность таких решений не гарантирует оптимальность использования денежных средств на реализацию мероприятий по повышению готовности СТК к целевому применению.

Таким образом, можно говорить о необходимости решения задачи нахождения оптимального состава мероприятий по повышению ремонтпригодности оборудования СТК.

Алгоритм анализа достаточности штатного комплекта ЗИП

Представим СТК в виде N последовательно соединенных (в смысле надежности) образцов оборудования, каждому из которых присвоен индекс $j = \overline{1, N}$ (рис. 1).

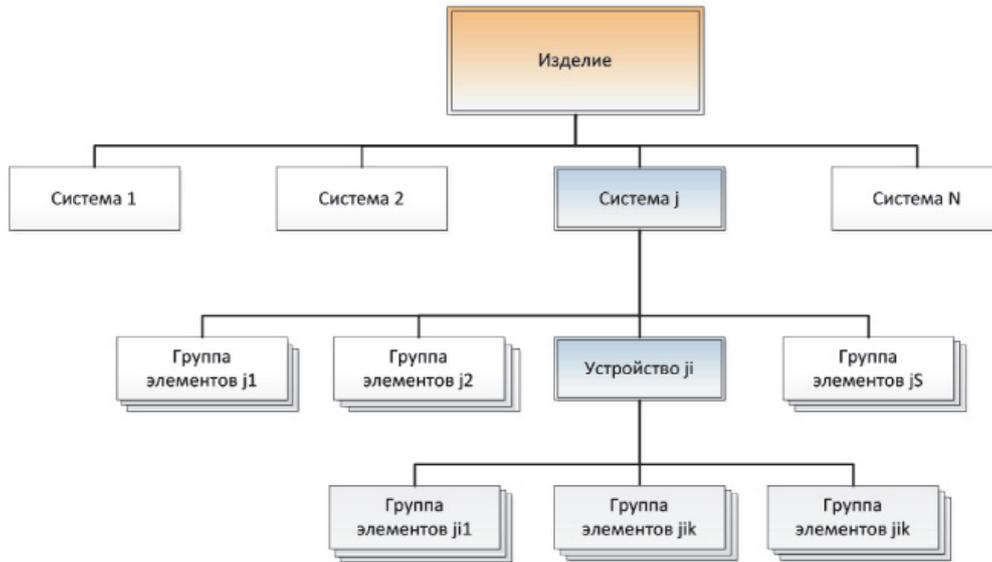


Рис. 1. Структурная схема оборудования СТК

Оборудование каждого наименования включает n_j последовательно соединенных групп однотипных элементов, подлежащих замене в случае их отказа, каждой из которых присвоен индекс ij ($i = \overline{1, n_j}, j = \overline{1, N}$). Отказ любого элемента в группе приводит к отказу оборудования, в состав которого он входит, и, следовательно, должна быть произведена его замена из комплекта ЗИП. Элементы ЗИП, количество которых далее будем обозначать через m_{ij} , должны обеспечить надежное функционирование оборудования СТК в течение заданного времени τ (периода пополнения, времени удовлетворения заявки на пополнение ЗИП и др.).

Таким образом, первая задача, возникающая перед должностными лицами, управляющими системой эксплуатации СТК, – оценить достаточность существующего комплекта ЗИП.

Для определения коэффициента готовности ТлОб предварительно определяются коэффициенты готовности всех групп однотипных элементов для оборудования каждого наименования:

$$k_{rij} = \frac{T_{0ij}}{T_{0ij} + T_{nij}}, \quad (1)$$

где T_{0ij} и T_{nij} – средние времена безотказной работы ij -й группы однотипных элементов и простоя j -го оборудования, обусловленное отказами этой группы.

Время простоя оборудования зависит от того, какое из двух случайных событий будет иметь место: событие, характеризующееся тем, что при отказе оборудования

в составе ЗИП не окажется необходимого элемента замены или событие, при котором отказ происходит при наличии в ЗИП, элементов, необходимых для восстановления работоспособности оборудования. Зная вероятности этих событий, среднее время восстановления работоспособности оборудования и среднее время нахождения оборудования вне готовности в случае отсутствия ЗИП, можно определить среднее время простоя каждого оборудования, обусловленное отказами соответствующей группы однотипных элементов:

$$T_{nij} = r_{ij}(m_{ij}, \tau) \cdot T_{vij} + (1 - r_{ij}(m_{ij}, \tau)) \cdot T'_{nij}, \quad (2)$$

где $r_{ij}(m_{ij}, \tau)$ – вероятность того, что число отказов элементов i -го типа j -го оборудования за время τ не превысит число имеющихся в наличии запасных элементов этого типа m_{ij} ; T_{vij} – среднее время восстановления j -го оборудования в случае отказа элемента i -го типа при наличии ЗИП; T'_{nij} – среднее время восстановления j -го оборудования в случае отказа элемента i -го типа при отсутствии ЗИП.

При расчетах предполагается, что поток отказов оборудования простейший. В этом случае вероятность того, что число отказов элементов i -го типа j -го оборудования за время τ не превысит число имеющихся в наличии запасных элементов этого типа m_{ij} , определяется по формуле

$$r_{ij}(m_{ij}, \tau) = e^{-\ell_{ij}\lambda_{ij}\tau} \sum_{k=1}^{m_{ij}} \frac{(\ell_{ij}\lambda_{ij}\tau)^k}{k!}, \quad (3)$$

где λ_{ij} – интенсивность отказов элементов ij -го типа.

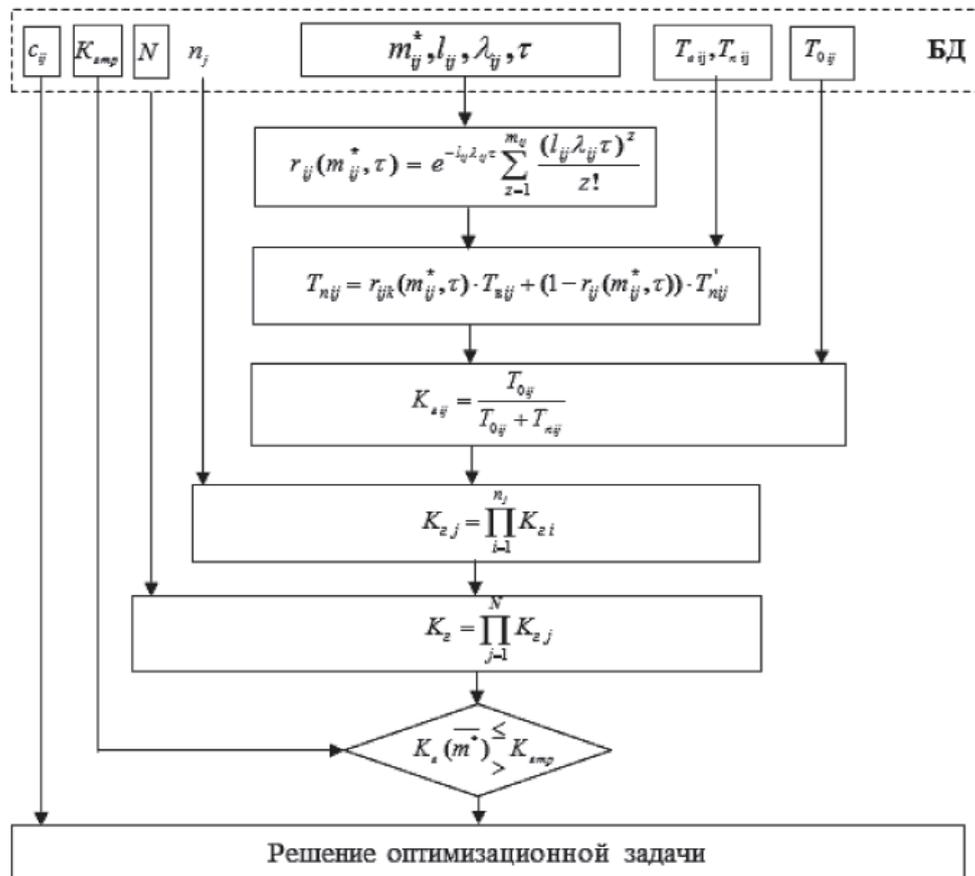


Рис. 2

В качестве критериев достаточности (недостаточности или избыточности) ЗИП оборудования используется соотношение

$$k_r(\overline{m}^*) \begin{cases} \leq k_{гр}, \\ > \end{cases} \quad (4)$$

где $\overline{m}^* = [\overline{m}_1^*, \dots, \overline{m}_j^*, \dots, \overline{m}_N^*]^T$;

$$\overline{m}_j^* = [m_1^*, \dots, m_i^*, \dots, m_{n_j}^*]^T.$$

Структурная схема алгоритма оценки достаточности штатного комплекта ЗИП приведена на рис. 2.

При отсутствии в комплекте ЗИП элементов, необходимых для устранения отказов оборудования или замены элементов, выработавших установленный для них ресурс, оборудование будет проставивать в неисправном состоянии, что приведет к уменьшению коэффициента готовности СТК в целом.

Весьма важным аспектом при решении задачи обоснования оптимального комплекта ЗИП оборудования СТК и состава доработок, повышающих их ремонтпригодность, являются затраты, необхо-

димые для реализации соответствующих мероприятий. В современных условиях актуальной является также задача их рационального распределения, решение которой направлено на обеспечение максимально возможной готовности СТК к решению задач по предназначению для заданного объема финансирования.

Тогда задачу повышения готовности СТК к решению целевых задач можно сформулировать следующим образом.

Разработать методику формирования оптимальной программы повышения ремонтпригодности СТК за счет оптимизации доукомплектования ЗИП и выполнения конструктивных доработок, при ограничении на ресурсы, необходимые для реализации этих мероприятий.

Алгоритм формирования оптимальной программы повышения ремонтпригодности СТК

Всю совокупность оборудования СТК представим в виде многоуровневой иерархической структуры, содержащей комплексы оборудования, системы и элементы систем СТК.

Введем следующие обозначения:

I – совокупность комплексов аппаратуры (приемно-измерительная аппаратура, аппаратура обработки и выдачи информации, аппаратура энергоснабжения и вентиляции и т.д.);

J_i – множество систем оборудования, входящего в состав i -го комплекса аппаратуры;

K_{ij} – множество однотипных элементов, входящих в j -ю систему i -го комплекса аппаратуры СТК.

Формальная постановка задачи формирования оптимальной программы повышения ремонтпригодности СТК в этом случае примет следующий вид.

Дано:

Str – структура СТК (множество из k элементов j систем i комплексов оборудования СТК и связей между ними);

Λ – множество, задающее значения показателей безотказности элементов СТК;

Q – множество возможных мероприятий по повышению ремонтпригодности оборудования, стоимостей их реализации и выходных эффектов (под выходным эффектом понимается снижение среднего времени восстановления);

$T_b = \{t_{bijk}\}$ – текущие значения среднего времени восстановления элементов;

C – располагаемое количество материальных ресурсов.

Найти:

$$\bar{x}^* = \arg \max_{\bar{x} \in \Delta} K_r(\bar{x}_1, \bar{x}_2); \quad (5)$$

$$\Delta = \left\{ \bar{x} \mid (\bar{x}, \bar{c}) \leq C, \bar{x} \geq 0 \right\},$$

где $\bar{x}^* = [\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*]^T$ – вектор управляемых параметров;

$\bar{x}_1^* = [\bar{x}_{11}^*, \bar{x}_{12}^*, \dots, \bar{x}_{1i}^*, \dots, \bar{x}_{1l}^*]^T$ – вектор оптимального состава ЗИП;

$\bar{x}_{1i}^* = [\bar{x}_{1i1}^*, \bar{x}_{1i2}^*, \dots, \bar{x}_{1ij}^*, \dots, \bar{x}_{1il}^*]^T$ – вектор оптимального состава ЗИП i -го комплекса оборудования СТК,

$\bar{x}_{1ij}^* = [m_{1ij1}^*, m_{1ij2}^*, \dots, m_{1ijk}^*, \dots, m_{1ijK}^*]^T$ – вектор оптимального состава ЗИП j -й системы i -го комплекса оборудования СТК;

$\bar{x}_2^* = [\bar{x}_{21}^*, \bar{x}_{22}^*, \dots, \bar{x}_{2i}^*, \dots, \bar{x}_{2l}^*]^T$ – вектор индикаторов мероприятий повышения ремонтпригодности оборудования;

$$\bar{x}_{2i}^* = [q_{2i1}^*, q_{2i2}^*, \dots, q_{2iv}^*, \dots, q_{2iN_i}^*]$$

$v = 1, N_i$ – вектор индикаторов мероприятий повышения ремонтпригодности i -го комплекса оборудования СТК.

Так как функциональные зависимости, с которыми мы имеем дело в данных задачах, являются сепарабельными функциями (коэффициент готовности является мультипликативной функцией, суммарная стоимость ЗИП и необходимых конструктивных доработок – аддитивной), то для их решения целесообразно применить метод динамического программирования, если производить оптимизацию по одному показателю, а другой представить в виде ограничения. Тогда исходная задача с l неизвестными сводится к последовательному решению l задач с одной неизвестной переменной. При этом находится спектр решений для различных допустимых значений финансирования мероприятий повышения ремонтпригодности СТК.

Решение этой задачи проводится в два этапа.

На первом этапе определяются функции отклика коэффициентов готовности каждой группы однотипных элементов от реализуемых мероприятий $k_{ij}(\bar{m}_j(c_j), q_j(c_j))$. Для этого решается задача (2):

Найти:

$$\bar{x}_j^* \in \arg \max_{x_j} \prod_{i=1}^{n_j} k_{ij} \bar{m}_{ij}, q_j$$

при условии

$$\sum_{i=1}^{n_j} m_{ij} c_{ij} + \sum_{i=1}^{n_j} q_j c_j \leq C_j, \quad (2)$$

где $C_j = \sum_{i=1}^{n_j} m'_{ij} c_{ij}$; m'_{ij} – количество запасных

элементов для i -й группы однотипных элементов j -го оборудования, определяемое в результате решения уравнения

$$r_{ij}(m'_{ij}, \tau) = 1 = e^{-\ell_{ij} \lambda_{ij} \tau} \sum_{k=1}^{m'_{ij}} \frac{(\ell_{ij} \lambda_{ij} \tau)^k}{k!}.$$

Для каждого шага, определяющего точность решения задачи, вычисляются максимальные значения функции приращения интегрального показателя готовности БР орту к решению целевых задач и соответствующие им условно-оптимальные значения каждой переменной $x_g, g = 1, l$.

Решение этой задачи позволяет построить образы множества Парето в пространстве параметров $k_{ij}(\bar{m}_j^o, q_j^o) - C$, знание которых позволяет перейти к решению задачи второго этапа: определению оптимального распределения средств на реализацию мероприятий повышения ремонтпригодности по видам оборудования изделия. Эта задача формулируется следующим образом.

Найти:

$$\vec{D}^{\circ} \in \operatorname{argmax}_{\vec{D}} \prod_{j=1}^N k_{rj}(C_j)$$

при условии

$$\sum_{j=1}^N C_j^{\max} \leq C,$$

где $\vec{D} = [C_1, C_2, \dots, C_N]^T$.

Найти множество значений стоимостей мероприятий по повышению ремонтпригодности для каждого вида оборудования при ограничении на суммарную допустимую стоимость указанных мероприятий.

Таким образом, предложенный подход позволяет сформировать такой перечень мероприятий, реализация которых позволит максимально повысить уровень готовности исследуемого СТК при заданном уровне финансирования.

Заключение

В качестве заключения отметим полезные особенности предложенной методики формирования оптимальной программы повышения ремонтпригодности.

Во-первых, использование метода динамического программирования позволяет получить спектр решений для различных допустимых значений затрат на реализацию мероприятий по повышению ремонтпригодности СТК (от 0 до C с некоторым шагом Δc , определяющим точность решения задачи). При этом процесс решения поставленной задачи может представляться в виде многошагового, например шаг определяется необходимой точностью распределения средств по элементам СТК. Конечно, возможны и другие варианты разбиения, каждый из которых выбирается в зависимости от удобства структуризации множества оптимизируемых переменных, сложности решения задачи на шаге разбиения и точности решения задачи в целом.

Во-вторых, существует возможность нахождения как абсолютного экстремума

(если задача многоэкстремальна), так и все множество решений задачи, при которых имеет место один и тот же экстремум. Наличие таких вариантов позволяет привлечь к рассмотрению кроме стоимости комплекта ЗИП другие показатели, характеризующие этот комплект, например потребный объем для размещения ЗИП.

В третьих, полезной особенностью используемого метода является возможность распараллеливания вычислений, что может оказаться чрезвычайно полезным при разработке прикладного программного обеспечения и решении крупномасштабных задач.

Список литературы

1. Антонов А.В., Пляскин А.В. Определение оптимального количества запасных элементов системы с учетом ограничений на стоимость // Надежность. – 2003. – № 4.
2. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. – М.: Транспорт, 1981. – 198 с.
3. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во Иностранная литература, 1960. – 400 с.
4. Лысенко И. В. Анализ и синтез систем обеспечения готовности ракет-носителей и космических аппаратов к запуску (основы теории). – Часть 1. Анализ и синтез сложных технических систем. – М.: Воениздат, 1995. – 365 с.
5. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – ч. 1. Методология, методы, модели. – МО СССР, 1989. – 660 с.
6. Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 256 с.

References

1. Antonov A.V., Plyaskin A.V. Nadezhnost – Reliability, 2003, no. 4.
2. Barzilovich E.U., Voskoboev V.F. Eksploatatsiya aviatsionnih system po sostoyaniu. Moscow, Transport Publ., 1981, 198 p.
3. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye. Moscow, IL Publ., 1960, 400 p.
4. Chichinadze V.K. Reshenie nevipuklykh lineinykh zadach optimizatsii. Moscow, Nauka Publ., 1983, 256 p.
5. Lysenko I.V. Analiz i sintez system obespecheniya gotovnosti raket-nositeley i kosmicheskikh apparatov k zapusku. Vol. 1. Moscow, 1995, 365 p.
6. Petuhov G.B. Osnovi teorii effektivnosti tselenapravlenih processov. Vol. 1. Moscow, 1989, 660 p.