

УДК 004.023:519.718.2:[629.7.085.2 + 629.784]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В МОДЕРНИЗАЦИИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**¹Казаков Р.Р., ¹Басотин Е.В., ¹Миронов А.Н., ²Сизяков Н.П., ³Шестопалова О.Л.**¹ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,

Санкт-Петербург, e-mail: vka@mail.ru;

²АО «Центральный научно-исследовательский институт имени академика А.И. Берга», Москва;³Филиал «Восход» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)», Байконур

В статье рассматриваются вопросы определения наличия потребности в модернизации составных частей ракетно-космических комплексов и формирования состава средств, подлежащих модернизации. Подход к решению задачи отличается тем, что в структуру обобщенного показателя потребности объекта в модернизации введены составляющие, отражающие не только физическое старение оборудования, но и степень его морального старения (отставания от требований по составу целевых задач и уровню технических характеристик). Предложено использовать для определения потребности в модернизации объекта математический аппарат теории нечетких множеств, который позволяет привлечь дополнительную информацию в виде нечетких суждений экспертов по рассматриваемой проблеме. Оценка обобщенного показателя потребности в модернизации объекта рассчитывается на основе применения принципа обобщения Л. Заде. Потребность в модернизации объекта оценивается в виде нечеткого числа, заданного на единичном интервале.

Ключевые слова: ракетно-космический комплекс, модернизация, нечеткие множества, остаточный ресурс**DETERMINATION OF REQUIREMENTS FOR MODERNIZATION OF COMPONENTS SPACE ROCKET COMPLEX****¹Kazakov R.R., ¹Basotin E.V., ¹Mironov A.N., ²Sizyakov N.P., ³Shestopalova O.L.**¹Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mail.ru;²Central Research Institute named after Academician A.I. Berg, Moscow;³A Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university), Baikonur

The article discusses the possible need for upgrading the components of rocket and space complexes and the formation of the composition of the funds to be modernization. The approach to solving the problem is different in that the structure of the generalized index of the object needs to upgrade components introduced, reflecting not only the physical aging of the equipment, but also its degree of obsolescence (the backlog from the requirements on the composition of the targets and the level of technical specifications). It is proposed to use to determine the need for modernization of the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets, which allows you to draw additional information in the form of fuzzy expert judgment on this issue. Estimation of the generalized indicator of the need for modernization of the object is calculated on the basis of the principle of generalization of Zadeh. The need for modernization of the facility is estimated in the form of fuzzy numbers defined on the unit interval.

Keywords: rocket-space complex, modernization, fuzzy sets, the remaining service life

Рассматривая возможные подходы к осуществлению модернизации сложных технических комплексов, к каким в полной мере можно отнести составные части ракетно-космических комплексов (СЧ РКК), можно выделить два крайних подхода:

– «интенсивная» модернизация, т.е., проведение «глобальной» модернизации СЧ РК после истечения срока окончания достаточно длительного периода эксплуатации, в течение которой сколько-нибудь существенные воздействия на состав оборудования и технические характеристики средств не оказываются;

– «экстенсивная» модернизация, связанная с отказом от «глобальной» плановой модернизации, и переход к модернизации СЧ РКК, обычно в случае крайней необходимости.

Преимуществом интенсивной модернизации является возможность внесения кардинальных корректив в принципы формирования СЧ РКК, возможность оптимизации распределения функций и задач между составными частями РКК, унификация приборной, аппаратурной и элементной базы СЧ РКК и т.п. Однако, такие «революционные» и масштабные преобразования требуют привлечения большого количества материальных, финансовых и трудовых ресурсов, не могут быть выполнены оперативно и требуют, как правило, выведения РКК из штатной эксплуатации на длительные сроки.

Ограниченность финансирования оборонных программ в переходный период развития Вооруженных Сил Российской Федерации, с одной стороны, и интенсивная загрузка отечественных РКК выполнением

задач по развертыванию и восполнению состава орбитальных группировок, с другой, вынудили в течение десяти последних лет прибегать к экстенсивной модернизации СЧ РКК. Это позволило не прерывать применения РКК по целевому назначению, уложиться в скромные выделяемые средства, однако вынужденно свелось к ряду мероприятий несистемного характера, не устраняющих, в общем случае, действия факторов, вызывающих потребность в модернизации СЧ РКК.

Выходом из сложившейся ситуации, как видится, может быть промежуточный вариант, когда на основании объективного анализа фактического технического состояния СЧ РКК, их способности решать поставленные задачи и уровня соответствия тактико-технических характеристик современным требованиям принимается решение о целесообразности модернизации не всего комплекса целиком, а только наиболее нуждающейся в этом части средств.

Для составных частей ракетно-космических комплексов (СЧ РКК) можно выделить, по крайней мере, четыре основных фактора, формирующих потребность в модернизации [2, 4–10]. Во-первых, это расширение спектра целей и задач СЧ РКК, выходящее за рамки возможностей существующих средств. Во-вторых, повышение требований к техническим характеристикам СЧ РКК. В третьих, деградация системы восстановления ресурса, вызывающая неустраняемые отказы. И, наконец, возрастание эксплуатационных затрат из-за прогрессирующего старения элементной базы и увеличения интенсивности отказов. Совместное действие этих факторов приводит к исчерпанию остаточного ресурса СЧ РКК по критериям морального и физического старения. Учет данные факторы при построении модели определения потребности в модернизации СЧ РКК и формировании состава средств, подлежащих модернизации.

Синтез обобщенного показателя потребности СЧ РКК в модернизации в условиях неопределенности

Для количественной оценки потребности в модернизации декомпозируем обобщенное свойство «потребность в модернизации СЧ РКК» на четыре частных свойства:

- непригодность к выполнению всего спектра целевых задач;
- непригодность к выполнению требований к техническим характеристикам СЧ РКК;
- ограниченность возможностей по восстановлению работоспособности небазовых элементов (небазовые элементы – элементы, работоспособность которых при

возникновении отказов может быть восстановлена без проведения капитального ремонта);

- неэкономичность эксплуатации (возросшие выше нормы эксплуатационные затраты).

Для каждого из перечисленных свойств введем соответствующие количественные показатели. Смысл или сущность данных показателей заключается в следующем. Каждый показатель характеризует потребность в модернизации по своему направлению: по целевым задачам, по техническим характеристикам, по неустраняемым отказам и по эксплуатационным затратам, а определяется как израсходованная доля первоначального запаса наработки СЧ РКК по рассматриваемому фактору: $R^{Ц.З.}$ – показатель потребности в модернизации по целевым задачам, $R^{Т.Х.}$ – показатель потребности в модернизации по техническим характеристикам СЧ РКК, $R^{Н.О.}$ – показатель потребности в модернизации по неустраняемым отказам (израсходованной долей первоначального запаса наработки СЧ РКК до перехода в предельное состояние по критерию неустраняемого отказа небазовых элементов), $R^{Э.З.}$ – показатель потребности в модернизации по эксплуатационным затратам (израсходованной долей первоначального запаса наработки СЧ РКК до перехода в предельное состояние по критерию возрастания эксплуатационных затрат).

Количественные значения частных показателей потребности в модернизации будем определять как израсходованную долю первоначального запаса ресурса СЧ РКК по рассматриваемому фактору.

Пусть известно значение τ фактической наработки СЧ РКК на момент определения потребности в модернизации. Тогда, например, значение показателя $R^{Ц.З.}$ может быть вычислено как частное от деления значения текущей наработки τ на ее сумму с оценкой остаточного ресурса по рассматриваемому фактору:

$$R^{Ц.З.} = \frac{R_{нач.}^{Ц.З.} - R_{ост.}^{Ц.З.}}{R_{нач.}^{Ц.З.}} \approx \frac{\tau}{\tau + R_{ост.}^{Ц.З.}(\tau)}. \quad (1)$$

Аналогичным образом получаем выражения для показателя потребности в модернизации по техническим характеристикам:

$$R^{Т.Х.} = \frac{R_{нач.}^{Т.Х.} - R_{ост.}^{Т.Х.}}{R_{нач.}^{Т.Х.}} \approx \frac{\tau}{\tau + R_{ост.}^{Т.Х.}(\tau)}, \quad (2)$$

показателя потребности в модернизации по неустраняемым отказам:

$$R^{Н.О.} = \frac{R_{нач.}^{Н.О.} - R_{ост.}^{Н.О.}}{R_{нач.}^{Н.О.}} \approx \frac{\tau}{\tau + R_{ост.}^{Н.О.}(\tau)}, \quad (3)$$

и показателя потребности в модернизации по эксплуатационным затратам:

$$R^{\text{Э.З.}} = \frac{R_{\text{нач.}}^{\text{Э.З.}} - R_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}}{R_{\text{нач.}}^{\text{Э.З.}}} \approx \frac{\tau}{\tau + \underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}(\tau)}. \quad (4)$$

Анализ фактической неопределенности имеющейся информации для расчета величины остаточного ресурса в знаменателе выражения (1) показывает целесообразность использования нечетких экспертных оценок [3]. Подобное справедливо и для остальных частных показателей.

Введем в рассмотрение нечеткие оценки остаточного ресурса СЧ РКК по целевым задачам

$$\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Ц.З.}}(\tau) = \left\{ \left\langle r^{\text{Ц.З.}}(\tau), \mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Ц.З.}}(\tau)}(r^{\text{Ц.З.}}) \right\rangle \right\}, \quad (5)$$

техническим характеристикам

$$\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Т.Х.}}(\tau) = \left\{ \left\langle r^{\text{Т.Х.}}(\tau), \mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Т.Х.}}(\tau)}(r^{\text{Т.Х.}}) \right\rangle \right\}, \quad (6)$$

и эксплуатационным затратам

$$\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}(\tau) = \left\{ \left\langle r^{\text{Э.З.}}(\tau), \mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}(\tau)}(r^{\text{Э.З.}}) \right\rangle \right\}, \quad (7)$$

задаваемые в виде нечетких множеств с функциями принадлежности соответственно

$$\mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Ц.З.}}(\tau)}(r^{\text{Ц.З.}}), \mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Т.Х.}}(\tau)}(r^{\text{Т.Х.}}),$$

и

$$\mu_{\underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}(\tau)}(r^{\text{Э.З.}}).$$

Подставив выражения (5), (6) и (7) соответственно в (1), (2) и (4), получим нечеткие оценки показателей потребности в модернизации:

$$\underline{R}^{\text{Ц.З.}} = \frac{R_{\text{нач.}}^{\text{Ц.З.}} - R_{\text{ост.}}^{\text{Ц.З.}}}{R_{\text{нач.}}^{\text{Ц.З.}}} \approx \frac{\tau}{\tau + \underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Ц.З.}}(\tau)}, \quad (8)$$

$$\underline{R}^{\text{Т.Х.}} = \frac{R_{\text{нач.}}^{\text{Т.Х.}} - R_{\text{ост.}}^{\text{Т.Х.}}}{R_{\text{нач.}}^{\text{Т.Х.}}} \approx \frac{\tau}{\tau + \underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Т.Х.}}(\tau)}, \quad (9)$$

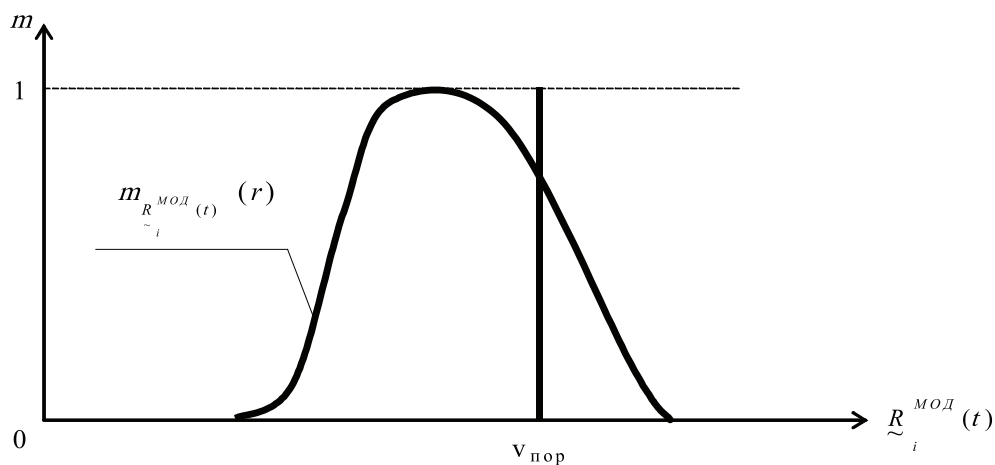
$$\underline{R}^{\text{Э.З.}} = \frac{R_{\text{нач.}}^{\text{Э.З.}} - R_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}}{R_{\text{нач.}}^{\text{Э.З.}}} \approx \frac{\tau}{\tau + \underline{R}_{\text{ост.}}^{\text{Э.З.}}(\tau)}. \quad (10)$$

Обобщенный показатель потребности в модернизации СЧ РКК определяется как взвешенная сумма значений частных показателей потребности в модернизации:

$$\underline{R}^{\text{МОД}}(\tau) = \alpha_{\text{Ц.З.}} \underline{R}^{\text{Ц.З.}}(\tau) + \alpha_{\text{Т.Х.}} \underline{R}^{\text{Т.Х.}}(\tau) + \alpha_{\text{Н.О.}} \underline{R}^{\text{Н.О.}} + \alpha_{\text{Э.З.}} \underline{R}^{\text{Э.З.}}(\tau),$$

$$\underline{R}^{\text{МОД}}(\tau) = \left\{ \left\langle r(\tau), \mu_{\underline{R}^{\text{МОД}}(\tau)}(r) \right\rangle \right\}. \quad (11)$$

Оценка обобщенного показателя потребности в модернизации СЧ РКК рассчитывается на основе применения принципа обобщения Л.Заде [1] и выражается в виде нечеткого числа, заданного на единичном интервале.



Сравнение нечеткой оценки обобщенного показателя потребности в модернизации с пороговым значением

Особенности формирования состава подлежащих модернизации СЧ РКК

Определим граничное значение обобщенного показателя потребности в модернизации СЧ РКК. При этом на значения остаточного ресурса по каждому из со-

ставляющих потребность в модернизации свойств наложим ограничения в виде неравенств, смысл которых заключается в том, что запас остаточного ресурса не должен быть меньше продолжительности модернизации по рассматриваемому показателю.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{ост}}^{\text{Ц.З.}} \geq \tau_{\text{мод}}^{\text{Ц.З.}} \Leftrightarrow R_{\text{гр}}^{\text{Ц.З.}} = \frac{\tau}{\tau + \tau_{\text{мод}}^{\text{Ц.З.}}}, \\ R_{\text{ост}}^{\text{Т.Х.}} \geq \tau_{\text{мод}}^{\text{Т.Х.}} \Leftrightarrow R_{\text{гр}}^{\text{Т.Х.}} = \frac{\tau}{\tau + \tau_{\text{мод}}^{\text{Т.Х.}}}, \\ R_{\text{ост}}^{\text{Н.О.}} \geq \tau_{\text{мод}}^{\text{Н.О.}} \Leftrightarrow R_{\text{гр}}^{\text{Н.О.}} = \frac{\tau}{\tau + \tau_{\text{мод}}^{\text{Н.О.}}}, \\ R_{\text{ост}}^{\text{Э.З.}} \geq \tau_{\text{мод}}^{\text{Э.З.}} \Leftrightarrow R_{\text{гр}}^{\text{Э.З.}} = \frac{\tau}{\tau + \tau_{\text{мод}}^{\text{Э.З.}}} \end{array} \right. \Leftrightarrow R_{\text{гр}}^{\text{МОД}} = \alpha_{\text{Ц.З.}} R_{\text{гр}}^{\text{Ц.З.}} + \alpha_{\text{Т.Х.}} R_{\text{гр}}^{\text{Т.Х.}} + \alpha_{\text{Н.О.}} R_{\text{гр}}^{\text{Н.О.}} + \alpha_{\text{Э.З.}} R_{\text{гр}}^{\text{Э.З.}}. \quad (12)$$

Итоговое значение ограничения для обобщенного показателя формируется в виде взвешенной суммы ограничений на частные показатели (правая часть выражения (12), в котором $\alpha_{\text{Ц.З.}}$, $\alpha_{\text{Т.Х.}}$, $\alpha_{\text{Н.О.}}$, $\alpha_{\text{Э.З.}}$ – весовые коэффициенты, сумма которых равна единице.

Принятие решения о целесообразности модернизации СЧ РКК осуществляется на основе критерия (13), согласно которому СЧ РКК с номером i подлежит модернизации, если

$$\tau_i \geq \tau_i^{\text{Н.М.}} = \min_{\tau \in [0, T_3]} \left| R_i^{\text{МОД}}(\tau) \geq R_{\text{гр } i}^{\text{МОД}} \right|, \quad (13)$$

где $\tau_i^{\text{Н.М.}}$ – момент начала модернизации i -го СЧ РКК.

Проверка выполнения условия (13) может быть осуществлена пошагово. Для этого представим пороговую величину $R_{\text{гр } i}^{\text{МОД}}$ как нечеткое множество с вырожденной функцией принадлежности в виде единичной дельта-функции (см. рисунок):

$$\mathcal{V}_{\text{пор}} = \{ \langle v_{\text{пор}}, \mu_{\mathcal{V}_{\text{пор}}}(v_{\text{пор}}) \rangle \}, \quad (14)$$

где

$$\mu_{\mathcal{V}_{\text{пор}}}(v_{\text{пор}}) = \begin{cases} 1, & v_{\text{пор}} = R_{\text{гр } i}^{\text{МОД}}, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Условие (13) при некотором τ выполняется, если справедливо равенство

$$R_i^{\text{МОД}}(\tau) = \max \left(\mathcal{V}_{\text{пор}}, R_i^{\text{МОД}}(\tau) \right), \quad (15)$$

при этом необходимо выполнить операцию нахождения максимального из двух нечет-

ких множеств. С этой целью введем операции максимума и минимума для пары нечетких множеств:

$$\bar{P}_{\sim} = \max \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \} = \{ \langle p; \mu_{\bar{P}_{\sim}}(p) \rangle \}, \quad (16)$$

где

$$\mu_{\bar{P}_{\sim}}(p) = \sup_{(\bar{p}_i, \bar{p}_j) | p = \max \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \}} [\mu_{\bar{p}_i}(\bar{p}_i) \wedge \mu_{\bar{p}_j}(\bar{p}_j)],$$

$$\bar{P}_{\sim} = \min \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \} = \{ \langle p; \mu_{\bar{P}_{\sim}}(p) \rangle \}, \quad (17)$$

где

$$\mu_{\bar{P}_{\sim}}(p) = \sup_{(\bar{p}_i, \bar{p}_j) | p = \min \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \}} [\mu_{\bar{p}_i}(\bar{p}_i) \wedge \mu_{\bar{p}_j}(\bar{p}_j)].$$

Пусть $\max \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \} = \bar{p}_j$, либо $\min \{ \bar{p}_i, \bar{p}_j \} = \bar{p}_j$, тогда отношение порядка определяется следующим образом:

$$\bar{p}_i \sim \bar{p}_j > \bar{p}_j.$$

Если $\bar{p}_i$ включает $\bar{p}_j$, т.е. $\bar{p}_i \supset \bar{p}_j$, то $\bar{p}_i > \bar{p}_j$. В других случаях $\bar{p}_i$ и $\bar{p}_j$ считаются эквивалентными:

$$\bar{p}_i \approx \bar{p}_j.$$

Если потребность в модернизации средства z_i отобразить булевой переменной

$$v_i = \begin{cases} 1, & \tau_i \geq \tau_i^{\text{Н.М.}}, \\ 0, & \tau_i < \tau_i^{\text{Н.М.}}, \end{cases}$$

тогда итоговое множество модернизируемых составных частей РКК определится как

$$Y_{\text{МОД}} = \{ z_i | v_i = 1 \}. \quad (18)$$

Выводы

Описанный в статье подход к формированию состава модернизируемых составных частей РКК отличается тем, что в структуру обобщенного показателя потребности СЧ РКК в модернизации введены составляющие, отражающие не только физическое старение оборудования, но и степень его морального старения (отставания от требований по составу целевых задач и уровню технических характеристик). Применяемый для получения оценок остаточного ресурса аппарат теории нечетких множеств в максимальной степени учитывает реальную степень неопределенности информации о процессах морального и физического старения СЧ РКК.

Список литературы

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
2. Казаков Р.Р. Анализ путей решения проблемы управления жизненным циклом наземного оборудования ракетно-космических комплексов / Р.Р. Казаков, Е.В. Басотин, А.Н. Миронов, Р.Р. Казаков, О.Л. Шестопалова // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 6–2. – С. 282–287.
3. Шестопалова О.Л. Основы построения систем сбора и обработки информации о техническом состоянии космических средств / О.Л. Шестопалова // *Московский государственный технический университет (МАИ), филиал «Восход»*. – Набережные Челны: Издательство Камской государственной инженерно-экономической академии, 2007. – 92 с.
4. Шестопалова О.Л. Прогнозирование соответствия характеристик космических средств предъявляемым требованиям на основе использования нечеткой регрессионной модели / Н.П. Сизяков, О.Л. Шестопалова // *Информация и космос*. – 2010. – № 1. – С. 133–135.
5. Шестопалова О.Л. Прогнозирование срока службы информационной системы с учетом морального старения элементной базы технических средств / О.Л. Шестопалова, А.В. Муравьев // *Транспортное дело России*. – 2014. – № 6. – С. 186–189.
6. Шестопалова О.Л. Определение потребности в модернизации средств технического обеспечения распределенной системы сбора и обработки информации / А.Н. Дорохов, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова // *Информация и космос*. – 2014. – № 1. – С. 9–12.
7. Шестопалова О.Л. Модель для расчета показателей качества функционирования системы технического обслуживания и ремонта сети связи / В.Л. Витюк, В.Л. Гузенко, Е.А. Миронов, Д.А. Севастьянов, О.Л. Шестопалова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 5–3. – С. 493–498.
8. Шестопалова О.Л. Модель расчета затрат на эксплуатацию системы сбора и обработки информации с учетом инфляционных процессов / О.Л. Шестопалова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/117-13607>.
9. Шестопалова О.Л. Пути и методы управления развитием системы информационного обеспечения эксплуатации космических средств / Д.А. Севастьянов, О.Л. Шестопалова // *Информация и космос*. – 2013. – № 3. – С. 73–76.
10. Шестопалова О.Л. Прогнозирование моральной долговечности распределенных информационных систем с учетом прогрессирующих ограничений на возможности восстановления ресурса элементной базы / О.Л. Шестопалова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11078>.