УДК 629.7.08

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Новиков А.Н.

ФГВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург, Россия (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), novalloll@mail.ru

В данной статье представлены результаты исследований по формированию методики обоснования рационального состава комплекса средств технического диагностирования (ТД) критичных элементов оборудования стартовых комплексов. Основное внимание уделяется методам построения математической модели обоснования рационального варианта построения комплекса средств технического диагностирования наземного технологического оборудования (НТО) ракетно-космических комплексов (РКК) в условиях неопределенности с учетом особенностей формирования полного множества вариантов построения; уточнением основных типов частных показателей и их физической природы; выбором способа оценивания значений коэффициентов важности частных показателей; анализом возможных способов формирования оценок частных показателей. Показано, что при построении математической модели многокритериальной целочисленной оптимизации с использованием нечетких исходных данных о характеристиках объектов, средств и условий диагностирования существенным преимуществом по сравнению с известными обладают модели, разработанные с использованием метода ранжирования по максимальному удалению (РМУ) и его модификаций.

Ключевые слова: техническое диагностирование, ракетно-космические комплексы, методы ранжирования.

METHOD OF JUSTIFICATION OF THE RATIONAL SET OF ELEMENTS OF TECHNICAL DIAGNOSIS GROUND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT SPACE-ROCKET COMPLEXES

Novikov A.N.

Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia (197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya st., 13), novalloll@mail.ru

This article presents the results of studies on the development of rational methods of study of the complex of technical diagnostics (TD) of critical pieces of equipment starting complexes. The main attention is paid to manie, methods of constructing a mathematical model of the rational justification of variants of a complex of technical diagnostics of ground technological equipment (STE), rocket and space complex (RSC) in the face of uncertainty, taking into account peculiarities of the formation of a complete set of design options, clarifying the main types of private performance and their physical nature, the choice of method of estimating the values of the coefficients of the importance of particular indicators, analysis of possible ways to form estimates of particular indicators. It is shown that when constructing a mathematical model of multiobjective integer optimization with fuzzy input data on the characteristics of the objects, means and conditions of diagnosing a significant advantage in comparison with known models have developed a method of ranking the maximum removal (FIA) and its modifications.

Keywords: technical diagnostics, space systems, methods of ranking.

Введение

При организации и осуществлении мониторинга технического состояния образцов ракетно-космической техники и составных частей объектов наземной космической инфраструктуры возникает необходимость выявления разнообразных дефектов в элементах оборудования.

Под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативно-технической документации [ГОСТ 17-102].

Постановка задачи исследования

Представим множество вариантов решений по формированию рационального состава комплекса средств технического диагностирования отдельно взятого элемента наземного технологического оборудования ракетно-космического комплекса в виде некоторого конечного множества альтернатив:

$$A_{\{n\}} = \{a_1, ..., a_n\}. \quad (1)$$

Сравнительную предпочтительность альтернатив будем оценивать с помощью частных показателей $K_1, ..., K_s$, $s > 1$. Тогда s-мерная оценка каждой альтернативы a_i, $i \in \{1, ..., n\}$ может быть представлена вектором:

$$X_{i<s>} = (x_{i1}, ..., x_{is}). \quad (2)$$

При сравнении альтернатив могут возникать следующие ситуации:

1) альтернатива a_i <u>не менее</u> предпочтительна, чем альтернатива a_j ($a_i \geq a_j$), если $X_{i<s>} \geq X_{j<s>}$, т.е. $x_{iv} \geq x_{jv}$, $v \in \{1, \ldots, s\}$;

2) альтернатива a_i <u>более</u> предпочтительна, чем альтернатива a_j ($a_i \succ a_j$), если $X_{i<s>} > X_{j<s>}$, т.е. $x_{iv} \geq x_{jv}$, и хотя бы для одного v $x_{iv} > x_{jv}$;

3) альтернатива a_i <u>недоминируема</u>, если не существует альтернативы $a_j \in \{a_1, ..., a_n\}$ такой, что $a_j \succ a_i$.

Естественно, что наиболее предпочтительная среди альтернатив $a_1, ..., a_n$ относится к числу недоминируемых. Недоминируемые альтернативы образуют так называемое множество Парето [1].

Методы ранжирования недоминируемых альтернатив

При выборе наиболее предпочтительных альтернатив, как правило, недостаточно ограничиться указанием множества Парето, которому может принадлежать слишком много альтернатив. Поэтому необходимо использовать другие дополнительные методы сравнительной оценки альтернатив, связанные с построением на множестве Парето отношения предпочтения. Данные методы можно условно разделить по способу ранжирования на три группы (рис. 1).

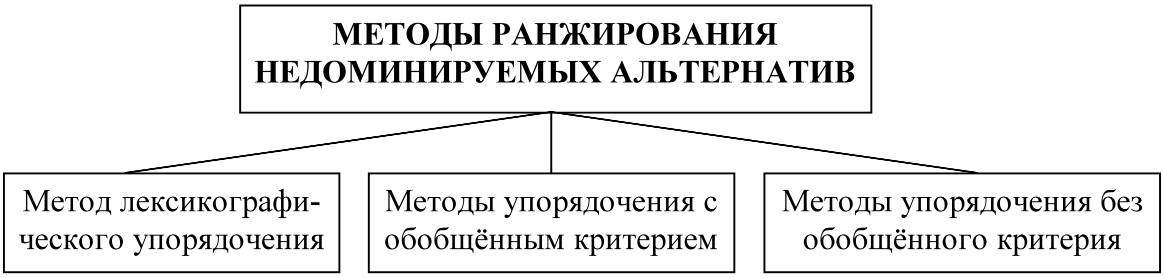

Рис. 1. Основные методы ранжирования недоминируемых альтернатив.

Метод лексикографического упорядочения [2] целесообразно использовать, когда частные показатели K_1, ..., K_s, характеризующие альтернативы, таковы, что их относительная важность измерима в порядковых шкалах, причем K_1 существенно важнее всех остальных частных показателей, K_2 – всех остальных, за исключением K_1, и т.д.

В этом случае, если $a_i \succ a_j$ по K_1, то $a_i \succ a_j$ независимо от оценок по остальным частным показателям K_2, ..., K_s. Если же оценки альтернатив совпадают по первым r частным показателям и различаются по (r+1)-му частному показателю, то более предпочтительной в этом случае является альтернатива, более предпочтительная по (r+1)-му частному показателю.

Легко заметить, что при лексикографическом упорядочении все альтернативы являются строго проранжированными. Одинаково предпочтительными могут оказаться лишь альтернативы с совпадающими векторами оценок. В случае лексикографического упорядочения оказывается легко решаемой задача выбора заданного числа наилучших альтернатив. Для этого достаточно выбрать нужное число первых альтернатив в их лексикографическом упорядочении.

Однако далеко не всегда частные показатели оценивания альтернатив K_1, ..., K_s настолько неравноценны, настолько несоизмеримы по важности. Более типична ситуация, когда важность частных показателей является сопоставимой. В этом случае целесообразно применить различные методы свёртки – построения обобщённого критерия либо, если обобщённый критерий нельзя построить, методы упорядочения без обобщённого критерия.

Методы упорядочения с обобщённым критерием [3] отличаются по способам формирования обобщённого критерия. Наиболее распространены линейные обобщённые критерии, которые строятся в предположении об аддитивности, однородности частных показателей, сопоставимости их по относительной важности и независимости.

Предположение об аддитивности частных показателей означает, что более предпочтительной является альтернатива, у которой выше значение суммы значений частных показателей. В этом случае предполагается, что для лица, принимающего решение, существенным обстоятельством является факт суммарного превосходства альтернативы по всей совокупности рассматриваемых показателей. Однородными считаются показатели, измеряющие интенсивность свойств одной и той же природы. В случае когда показатели таковыми не являются, их необходимо преобразовать в однородные. Сопоставимость по относительной важности для частных показателей означает, что их важность может быть сравнима с использованием количественных шкал (в отличие от порядковых при лексикографическом упорядочении).

Одним из наиболее важных предположений о характере частных показателей при использовании обобщённого критерия является предположение об их независимости.

При соблюдении указанных предположений процедура сравнительной оценки многокритериальных альтернатив сводится к построению обобщённого линейного критерия:

$$\sum_{v=1}^{s}\alpha_v K_v(a_i) = \sum_{v=1}^{s}\alpha_v x_{iv}\,, \qquad (3)$$

где α_1, ..., α_s – есть весовые коэффициенты частных показателей K_1, ..., K_s, отражающие результаты сравнительной оценки частных показателей по важности.

Лучшей признаётся альтернатива a_i, для которой

$$\sum_{v=1}^{s}\alpha_v K_v(a_i) \geq \sum_{v=1}^{s}\alpha_v K_v(a_j),\ \forall j \in \{1,...,n\},\ j \neq i\,. \qquad (4)$$

Если необходимо выбрать k лучших альтернатив, то ими будут k альтернатив, получивших наибольшие оценки по критерию (3).

Несмотря на достаточную наглядность критерия (3) и простоту его применения на практике, линейный обобщённый критерий не всегда может быть сформирован. В частности, при решении задач выбора вариантов построения комплекса средств ТД некоторые показатели эффективности комплекса являются зависимыми (например, ресурсоемкость в общем случае косвенно зависит от значений показателей результативности и оперативности). Кроме того, не всегда обоснованным представляется применение в этих задачах принципа аддитивности частных показателей.

Отсутствие обобщённого критерия существенно усложняет сравнительную оценку предпочтительности многомерных альтернатив. В этом случае обычно применяются **методы упорядочения без обобщённого критерия.**

Одним из известных методов из этой группы является так называемый метод ЭЛЕКТРА [4]. В данном методе предлагается определять предпочтения экспертов на множестве многомерных альтернатив, не выясняя структуры и вида обобщённого критерия, а используя дополнительную функцию порогового характера о согласии и несогласии экспертов с результирующим отношением предпочтения альтернатив.

Рассмотрим произвольную пару альтернатив a_i и a_j. Обозначим класс частных показателей, согласно которым a_i не менее предпочтительна, чем a_j, как $C(a_i, a_j)$, а класс, по которому действует обратное предпочтение, как $D(a_i, a_j)$. Пусть известны коэффициенты a_i, ..., a_s, характеризующие относительную важность предпочтений по каждому из частных показателей. В методе ЭЛЕКТРА вводится <u>индекс согласия</u>, характеризующий согласие эксперта с порядком предпочтений $a_i \succ a_j$:

$$c(a_i, a_j) = \frac{1}{\sum\limits_{v=1}^{s} \alpha_v} \sum_{K_v \in C(a_i, a_j)} \alpha_v \tag{5}$$

и <u>индекс несогласия</u>:

$$d(a_i, a_j) = \begin{cases} 0, \text{ если } D(a_i, a_j) = \varnothing; \\ \dfrac{1}{m} \max\limits_{K_v \in D(a_i, a_j)} |x_{iv} - x_{jv}| \text{ - в противном случае,} \end{cases} \tag{6}$$

где m – максимально возможная разность между оценками x_{iv} и x_{jv}.

Считается, что альтернатива a_i предпочтительней a_j, только если

$$c(a_i, a_j) \geq c_0 \text{ и } d(a_i, a_j) \leq d_0,$$

где c_0 и d_0 – специально вводимые <u>пороговые значения индексов</u> (5) и (6).

Недостатком данного метода и его модификаций является эвристический характер процедур формирования классов $C(a_i, a_j)$ и $D(a_i, a_j)$, требующий привлечения экспертов для попарного сравнения альтернатив a_i и a_j, недостаточно обоснованный способ задания пороговых значений c_0 и d_0, а также принципиальная возможность получения вариантов упорядочений с нарушением принципа транзитивности при ранжировании альтернатив, т.е. может быть, что

$$a_i \succ a_j,\ a_j \succ a_k \text{ и } a_k \succ a_i, \tag{7}$$

что, конечно, противоречит здравому смыслу при использовании метода в инженерных приложениях.

Решение

Исходя из этого, рассмотрим альтернативный метод выбора наилучшего варианта построения комплекса средств ТД, основанный на решении оптимизационных задач.

Пусть для каждого частного показателя K_v можно указать пороговое значение L_v такое, что альтернативы, оценки которых по показателю K_v ниже, чем L_v, крайне нежелательны. Более предпочтительными считаются альтернативы, оценки которых по частным показателям как можно дальше отстоят от критических значений L_v. Исходя из сущности подхода к ранжированию, данный метод можно назвать **методом ранжирования по максимальному удалению от критических значений частных показателей** или, сокращённо, методом ранжирования по максимальному удалению (РМУ) [5].

Представим математическую модель, лежащую в основе метода РМУ, в формализованном виде следующим образом.

Пусть альтернативы $A = \{a_1, ..., a_n\}$ оцениваются по s частным критериям $K_1, ..., K_s$ и $X_{i<s>} = (x_{i1}, ..., x_{is})$ – вектор оценок альтернативы a_i, $i \in \{1, ..., n\}$. Альтернативу a_i будем считать более предпочтительной, чем a_j, если

$$\min\{x_{i1}–L_1, ..., x_{is}–L_s\} > \min\{x_{j1}–L_1, ..., x_{js}–L_s\}.$$

Тогда выбор наилучшей альтернативы a^* осуществляется как решение задачи

$$a^* = \arg\max_{a_i \in A}\left[\min_{v\in\{1,...,s\}}\{(x_{iv} - L_v)\}\right]. \tag{8}$$

Задача (8) может быть решена как задача линейного программирования

$$z_{iv} \to \max_{\substack{i\in\{1,...,n\}\\ v\in\{1,...,s\}}} \tag{9}$$

при ограничениях $x_{iv} - L_v - z_{iv} \geq 0$, $v \in \{1, ..., s\}$, $a_i \in A$.

При небольшом числе альтернатив задача может быть решена непосредственным расчётом значений $\min\limits_{v}(x_{iv} - L_v)$ и выбором альтернативы с максимальным значением данного критерия.

Обобщим правило (8) на случай, когда частные показатели K_v, $v \in \{1, ..., s\}$ различны по важности. В данной постановке это означает, что удаление оценок альтернатив от критических значений по одним частным показателям важнее, чем по другим. Например, важнее обеспечить более высокие значения показателя результативности по сравнению с показателями ресурсоемкости и оперативности. Или в большей степени можно уступить по показателям результативности целевого применения, зато увеличить показатели оперативности и снизить затраты.

Допустим, что определены значения весовых коэффициентов α_1, ..., α_s, характеризующих важность удаления оценки альтернативы по каждому из частных показателей. Тогда задача (8) может быть записана в виде

$$a^* = \arg\max_{a_i \in A}\left[\min_{v\in\{1,...,s\}}\{\alpha_v(x_{iv} - L_v)\}\right]. \tag{10}$$

Соответственно, задача линейного программирования (9) принимает вид

$$\sum_{v=1}^{s} \alpha_v z_{iv} \to \max_{i \in \{1,\ldots,n\}} \quad (11)$$

при ограничениях $x_{iv} - L_v - z_{iv} \geq 0$, $v \in \{1, ..., s\}$, $a_i \in A$.

Или, введя функцию $\Phi(a_i) = \sum_{v=1}^{s} \alpha_v z_{iv}$, можно записать:

$$a^* = \arg\max_{a_i \in A} \Phi(a_i) \quad (12)$$

$$x_{iv} - L_v - z_{iv} \geq 0,\ v \in \{1, ..., s\}.$$

Остановимся подробнее на особенностях реализации выбора наиболее предпочтительных вариантов решений по формированию комплекса средств ТД с использованием критерия (10).

Анализ составляющих выражения (10) позволяет выделить следующие аспекты, подлежащие уточнённому исследованию.

1. Формирование полного множества A альтернатив a_i, $i = \{1, ..., n\}$.

2. Уточнение основных типов частных показателей K_v, $v \in \{1, ..., s\}$ и их физической природы.

3. Выбор способа оценивания значений коэффициентов важности частных показателей α_v, $v \in \{1, ..., s\}$.

4. Анализ возможных способов формирования оценок x_{iv}, $i \in \{1, ..., n\}$, $v \in \{1, ..., s\}$ частных показателей.

5. Исследование способов преобразования частных показателей K_v, $v \in \{1, ..., s\}$ к однородным.

6. Анализ способов задания критических значений L_v, $v \in \{1, ..., s\}$ частных показателей.

7. Исследование особенностей ранжирования альтернатив по правилу (11) с учётом возможных вариантов сочетания различных типов оценок составляющих данного выражения.

Список литературы

1. Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Выбор вариантов: основы теории. – М. : Наука, 1990. – 240 с.

2. Алексеев А.В. Интерпретация и определение функций принадлежности нечётких множеств // Методы и системы принятия решений / Рижск. политехн. инст. – Рига : Изд-во РПИ, 1979. – С. 42-50.
3. Борисов А.Н., Вульф Г.Н., Осис Я.Я. Методика оценки функций принадлежности элементов размытого множества // Кибернетика и диагностика. – Рига : Знание, 1970. – Вып. 4. – С. 125-134.
4. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.
5. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечёткой исходной информации. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 208 с.

Рецензенты

Смагин Владимир Александрович, д.техн.н., профессор кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Садин Дмитрий Викторович, д.техн.н., профессор, начальник кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.