

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 621.396.6

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕКОТОРОГО КЛАССА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Захаров И.В.^{*}, Трубников А.А.^{**}, Решетников Д.А.^{***}

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

^{} e-mail: il-ya-zakharov@yandex.ru*

*^{**} e-mail: a-trubnikov@inbox.ru*

*^{***} e-mail: grapler@yandex.ru*

Предложены методические предпосылки количественной оценки технического состояния некоторого класса сложных технических систем на примере системы наведения управляемой авиационной ракеты (УАР) класса «воздух-воздух». Проведена интерпретация количественной оценки технического состояния для системы наведения (СН) УАР с использованием параметрического метода контроля в пространстве линейных независимых допусков и метода контроля по показателю качества в пространстве функционально-аппаратного потенциала. Приведено отображение результатов контроля с использованием обоих рассматриваемых методов в пространстве параметров, характеризующих боевой потенциал УАР.

Ключевые слова: количественная оценка технического состояния, система наведения, показатель качества, функционально-аппаратный потенциал, боевой потенциал, необнаруженный отказ, ложный отказ, информационная система управления техническим состоянием.

Введение

В работах [1—4] обоснован метод количественной оценки технического состояния сложных технических систем и его реализация в интеллектуальной системе технического диагностирования.

В данной статье изложено развитие указанного подхода для оценки технического состояния системы наведения управляемой авиационной ракеты класса «воздух-воздух».

В [5] предложен метод комбинированного контроля, в рамках которого используются существующий

метод параметрического контроля и контроль по показателю качества. Показано, что такой подход может быть реализован с помощью информационной системы управления техническим состоянием (ИСУ ТС) УАР на основе перспективных автоматизированных систем контроля (АСК). Основными достоинствами такой ИСУ ТС, определяющими повышение эффективности эксплуатации УАР, являются возможности:

1) реализации прогрессивных систем эксплуатации УАР (по состоянию и смешанной);

2) внедрения качественно нового метода оценки технического состояния УАР по показателю качества на основе результатов многопараметрического комбинированного контроля;

3) более эффективного управления техническим состоянием УАР путем учета и анализа изменения эксплуатационно-технических характеристик УАР на основе обработки результатов контроля;

4) формирования информационной поддержки обоснованных решений по управлению техническим состоянием УАР;

5) оценки эффективности программы технической эксплуатации (ПрТЭ) УАР на некотором промежуточном интервале времени для ее последующей корректировки.

1. Интерпретация количественной оценки технического состояния для СН УАР в рамках существующей технологии контроля

Для обширной совокупности УАР как объектов эксплуатации в полной мере реализовать стратегию ТЭ по состоянию в классическом понимании невозможно. Это обусловлено тем, что в современной системе технической эксплуатации (СТЭ) непосредственно на месте — в условиях технической позиции подготовки ракет — запрещено проводить замены блоков или производить какие-либо регулировки, не указанные разработчиком в эксплуатационно-технической документации.

Так, большинство УАР класса «воздух-воздух» имеют неразборную конструкцию составных частей и минимальное количество технологических лючков. Поэтому для реализации эксплуатации УАР по состоянию может быть применен новый метод — метод «максимально полного использования фактического технического состояния» УАР с принятием решения «на месте».

Реализация указанного метода предполагает использование многоальтернативной схемы контроля «годен — ограниченно годен — брак», основанной на количественной оценке ТС УАР. Раскрытием содержания методологии количественной оценки технического состояния УАР для многоальтернативной схемы контроля «годен — ограниченно годен — брак».

Основная операция контроля ТС УАР — определение принадлежности описывающей ТС УАР точки (множества точек) текущих значений параметров норме (допуску). При этом норма, по существу, является способом представления (описания) в алгоритмах и системах контроля свойств объекта контроля (ОК).

Техническое состояние S УАР описывается вектором $X(t) = \{x_i(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, компоненты которого

объединяют внутренние параметры ОК. Модель функционирования УАР как ОК на интервале времени проведения контроля $[t_0, t_k)$ представляется в виде

$$F: \{Z\} \times \{N\} \times \{X\} \times [t_0, t_k) \rightarrow \{Y\} \times [t_0, t_k), \quad (1)$$

где Z — множество стимулирующих сигналов, подаваемых на ОК с АСК;

N — множество неопределенности условий режима контроля, обусловленное наличием внутренних шумов, возмущений и помех в подсистемах ОК;

Y — множество контролируемых сигналов ОК.

При этом множество Z входных сигналов ОК обусловлено наличием ограниченного числа входных контрольных точек системы наведения ракеты и определяет, в свою очередь, вид режима контроля. Для минимизации негативного действия неопределенности N условий реализации режима контроля в интересах достоверного принятия решения о техническом состоянии подсистем ракеты разработчиком ОК принимается ряд мер, среди них:

- введение специального режима контроля;
- ужесточение допусков на контролируемые параметры ОК.

Введение специального режима контроля реализовано в ОК посредством разрыва естественных связей на схмотехническом уровне с помощью подмножества команд коммутации Z_k и представления ОК в виде совокупности отдельных схем контроля минимальной размерности.

Назначение допусков на контролируемые параметры ОК предполагает, что на схмотехническом уровне в процедуре контроля конкретного параметра заданы следующие условия:

- задан технологический разброс компонентов элементной базы в каждой отдельной схеме контроля минимальной размерности;
- заданы и фиксированы значения используемых стимулирующих сигналов.

Вместе с тем, для назначения допусков на параметры ряда подсистем разработчики УАР часто применяют статистический подход на основе инженерного правила «трех сигм», которое носит дисциплинирующий характер для смежников, производящих комплектующие подсистемы.

Таким образом, основным способом задания норм на контролируемые параметры является в настоящее время система линейно-независимых допусков (ЛНД), когда область работоспособности УАР аппроксимируется простейшими прямоугольными областями $Q^n(X)$, параллельными координатным осям в пространстве параметров X :

$$Q^{\Pi}(X) = \{X : (x_{iн} \leq x_i \leq x_{iв})\}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $x_{iн}, x_{iв}$ — нижняя и верхняя границы допусков на параметры.

Принятие решения о виде технического состояния УАР как ОК определяется как задача проверки двух гипотез:

— УАР считается работоспособной, если все параметры принадлежат заданной области ЛНД

$$X \in Q^{\Pi}(X);$$

— УАР считается неработоспособной, если хотя бы один параметр не принадлежит области $Q^{\Pi}(X)$.

Введем понятие боевой потенциал УАР J , который определяется совокупностью тактико-технических характеристик ракеты $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k$, обеспечивающих ее применение по заданному множеству целей, на множестве заданных условий боевого применения (например атака с любого направления, с превышением или принижением, днем и ночью, в любых метеоусловиях, на фоне неба, облаков, подстилающей поверхности, в условиях естественных и организованных помех и др.).

Графическая интерпретация применения параметрического метода контроля (ПМК) с использованием системы ЛНД по каналу «годен» показана на рис. 1.

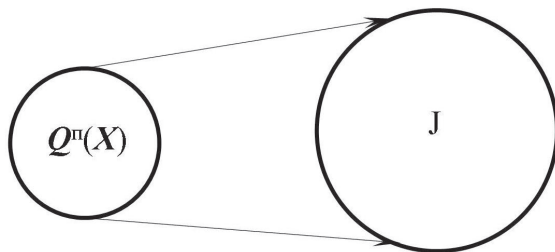


Рис. 1. Отображение результатов ПМК по ЛНД по каналу «годен» в пространстве J

Приведенная на рис. 1 диаграмма имеет следующий смысл: если все контролируемые параметры СН УАР находятся в пределах установленных допусков, то боевой потенциал ракеты J может быть реализован в полном объеме.

На рис. 2 показана графическая интерпретация применения параметрического контроля по ЛНД по каналу «брак» при наличии однопараметрического отказа $\bar{Q}^{\Pi}(X)$.

То есть отказ хотя бы по одному (любому) из параметров X ракеты как ОК, заданных в пространстве $Q^{\Pi}(X)$ ЛНД, снижает боевой потенциал ра-

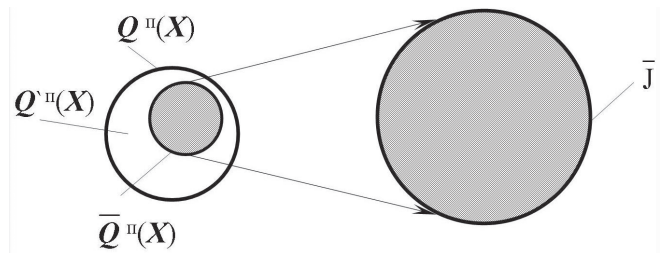


Рис. 2. Отображение результатов ПМК по ЛНД по каналу «брак» в пространстве J

кеты до нуля, несмотря на то, что остается некоторый запас работоспособности ОК $Q^{\Pi}(X)$:

$$F(\forall \bar{Q}_i^{\Pi}(X_i)) : J \rightarrow \bar{J}, i = \overline{1, 1}. \quad (3)$$

При этом в трактах ракеты как ОК может не наблюдаться «обрыва» или «короткого замыкания» и других «видимых» аварийных последствий. Иными словами, при использовании процедуры параметрического контроля в пространстве ЛНД $Q^{\Pi}(X)$, при появлении отказа хотя бы по одному любому i -му параметру $\bar{Q}_i^{\Pi}(X)$, боевой потенциал ракеты J скачкообразно уменьшается до нуля (рис. 3).

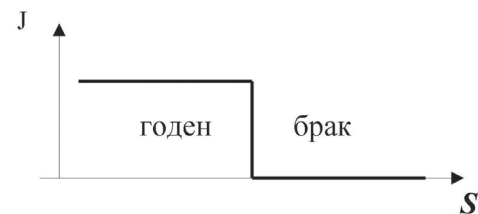


Рис. 3. Графическая интерпретация боевого потенциала ракеты J при изменении технического состояния S при использовании ПМК по ЛНД

Вместе с тем, при применении специального режима контроля между подсистемами УАР и внутри подсистем теряются естественные функциональные связи.

Это приводит к методическим ошибкам при контроле типа $\zeta_{но}^{\Pi}$ — необнаруженный отказ и $\zeta_{ло}^{\Pi}$ — ложный отказ [5]. При этом, в случае пропуска необнаруженного отказа, ракета допускается для боевого применения и считается, что она обладает максимальным боевым потенциалом J (рис. 4).

Однако в некоторых условиях боевого применения использование ракеты со сниженным боевым потенциалом на величину \bar{J} приведет к снижению эффективности боевого применения данной УАР или даже к невыполнению боевой задачи. В случае

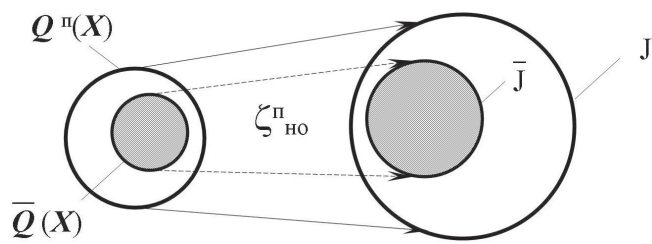


Рис. 4. Отображение результатов ПМК по ЛНД по каналу «годен» в пространстве J при наличии необнаруженного отказа $\zeta_{но}^п$

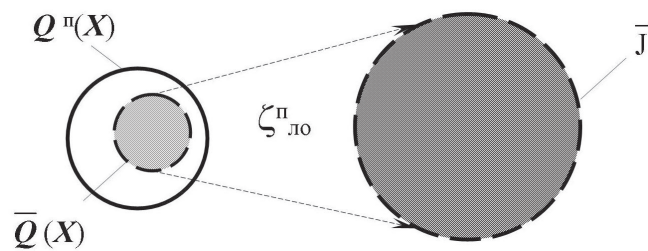


Рис. 5. Отображение результатов ПМК по ЛНД по каналу «годен» в пространстве J при наличии ложного отказа $\zeta_{ло}^п$

пропуска ложного отказа весь боевой потенциал ракеты также скачкообразно уменьшается на 100% (рис. 5), т.е. УАР будет изъята из боекомплекта части и передана на склад (или на ремонт на авиаремонтный завод). И если её тут же не заменили исправной УАР, то это приведет к снижению боеготовности части.

Итак, во всех перечисленных случаях, имеющих место в современной СТЭ УАР, используется двухальтернативная схема принятия решения «годен-брак», имеющая по сути качественный характер. При этом различные попытки придать процедуре параметрического контроля в пространстве ЛНД количественный характер объективно сопряжены с усложнением задачи контроля УАР до инженерно непреодолимого уровня, поскольку естественная конфигурация функциональных связей УАР как ОК

от схмотехнических параметров контроля до субсистемных критериев и системных критериев высшего порядка искусственно разорвана (рис. 6).

2. Расширение возможностей контроля технического состояния СН УАР с использованием функционально-аппаратного потенциала

Уйдем от оценки ТС на схмотехническом уровне в рамках процедуры контроля F и введем в рассмотрение новый математический объект Φ — функционально-аппаратный потенциал.

Функционально-аппаратный потенциал Φ (ФАП) СН УАР — это комплексный сквозной показатель качества общесистемного уровня организации контроля, который позволяет установить объективную монотонную связь между множеством схмотехнических атрибутов параметрического кон-

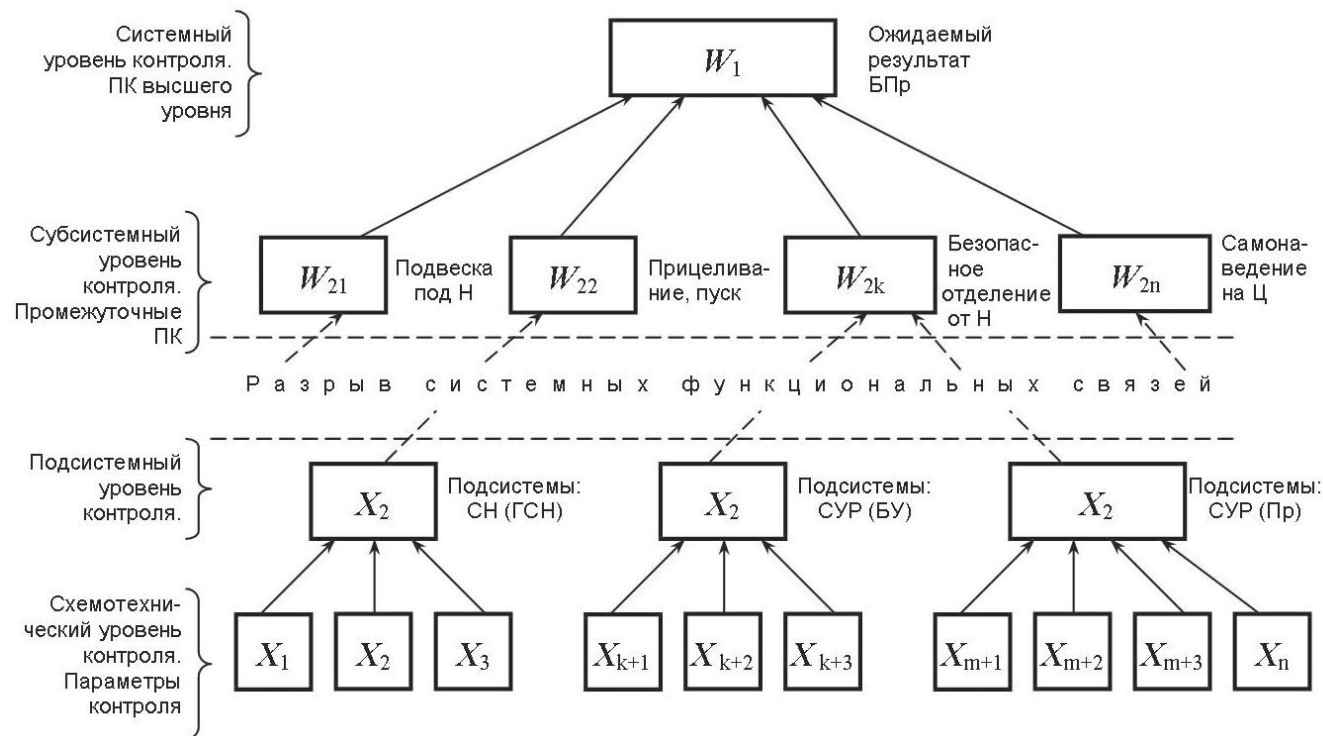


Рис. 6. Конфигурация функциональных связей УАР как ОК

троля СН УАР по ЛНД и множеством промежуточных показателей качества subsystemного и системного уровня.

ФАП Φ однозначно задан взаимообуславливающей совокупностью функциональных задач подсистем УАР, строго отображающих последовательность и качество выполнения операций боевого применения УАР, и практически реализованной разработчиком на борту ракеты заданной совокупностью соответствующих аппаратных решений.

Таким образом, введение в рассмотрение при организации контроля нового общесистемного показателя Φ позволяет перейти к модели функционирования УАР как ОК в виде

$$\Phi : \{\Theta\} \times \{Z\} \times \{N\} \times \{X\} \times [t_0, t_{\text{к}}) \rightarrow W \times [t_0, t_{\text{сн}}), \quad (4)$$

где W — показатель качества высшего порядка, заданный в пространстве действительных чисел;

Θ — множество (диапазон) условий боевого применения УАР;

Z — множество атрибутов цели (и ее возможностей по противодействию атакующей УАР);

N — множество неопределенности условий боевого применения;

$t_{\text{сн}}$ — время протекания процесса самонаведения.

Наличие неопределенности N при реальном боевом применении УАР в отображении (4) склоняет исследователя при проведении процедуры системотехнического контроля ТС подсистем УАР к реализации наиболее напряженного режима функционирования УАР либо наиболее вероятного режима.

Это обусловлено антагонистической конкуренцией носителя и цели в ходе воздушного боя. Реализация наиболее тяжелого режима функционирования УАР усиливает проявление негативного действия деградирующего ТС подсистем УАР. Вместе с тем упрощение условий боевого применения УАР вызывает смягчение режима функционирования УАР (вплоть до комфортного уровня) и многократное ослабление негативного действия деградирующего ТС ракеты.

При организации контроля в виде (4) диаграмма системных функциональных связей (см. рис. 6) замыкается, в значительной степени устраняются перечисленные выше противоречия и понижается сложность задачи системотехнического контроля, когда УАР считается работоспособной при выполнении условий

$$Q(W) = \{W : (W < W_{\text{тр}})\}, \quad (5)$$

где $W_{\text{тр}}$ — заданное критериальное значение ПК.

Область $Q(W)$ образуется системой проекций $(X_i, X - X_j)$ искомым областям $\Omega(X_i, X - X_j)$ работоспособных состояний контролируемых параметров, полученных сечением некоторой интегральной функции $\Phi(X) = W$ (рис. 7), при условии выполнения ограничения

$$\forall X : \Phi(X) < W_{\text{тр}}. \quad (6)$$

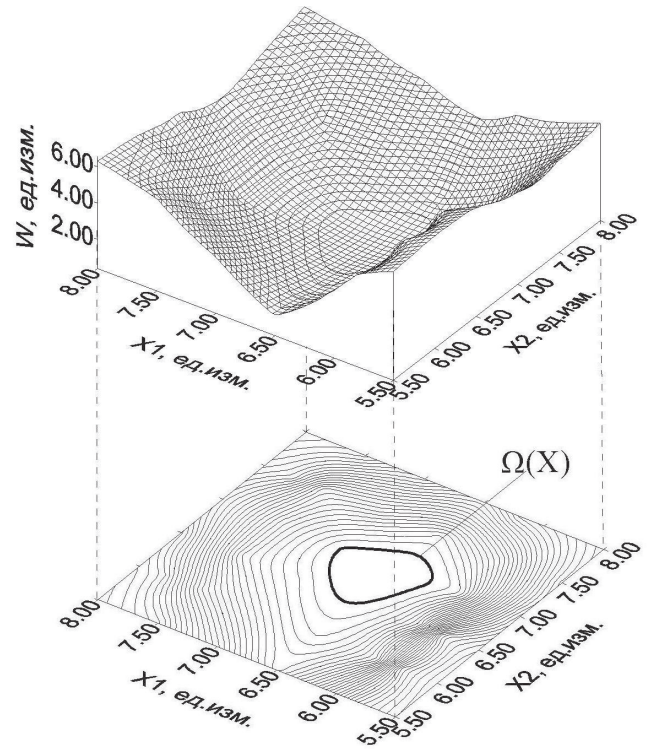


Рис. 7. Интегральная функция ПК W (вверху) и область работоспособности $\Omega(X)$ ОК (внизу)

Таким образом, синтез высокоэффективного обеспечения процесса контроля возможен на основе построения и анализа математических моделей для УАР как ОК в виде

$$W = \Phi(X). \quad (7)$$

Рассмотрим класс подсистем УАР «воздух-воздух» как непрерывных динамических систем на примере СН. Техническая концепция создания типовой СН основана на условии минимума промаха R_h при самонаведении на цель.

Введение ограничения $W_{\text{тр}}$ при использовании ПК в виде заданного промаха R_h позволяет провести сечение поверхности интегральной функции ПК W линией равного уровня (заданного для этого случая значением $R_h = 3$ м). В результате операции такого сечения мы получаем замкнутую область работоспособности ОК $\Omega(X)$ для исследуемых

параметров в заданных условиях (в виде проекции в нижней части рис. 7).

Введение ФАП в виде оператора Φ и реализация процедуры контроля на основе (4)–(7) позволяют определять монотонную зависимость (количественную связь) между техническим состоянием СН УАР в пространстве $\Omega(X)$ и боевым потенциалом ракеты J и в известной степени выявлять ошибки I и II рода ($\zeta_{\text{но}}^{\text{II}}$ и $\zeta_{\text{ло}}^{\text{II}}$).

Так, при использовании метода контроля по ПК (МКПК) Φ по каналу «годен» техническое состояние обуславливает максимум потенциала J ракеты (рис. 8).

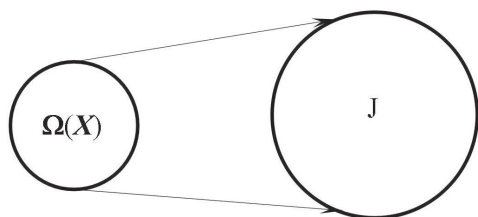


Рис. 8. Отображение результатов МКПК по Φ по каналу «годен» в пространстве J

Однако при возникновении отказа боевой потенциал J ракеты уменьшается до уровня \bar{J}_i ; пропорционально влиянию данного отказа $\bar{\Omega}_i$ (рис. 9) на величину \bar{J}_i .

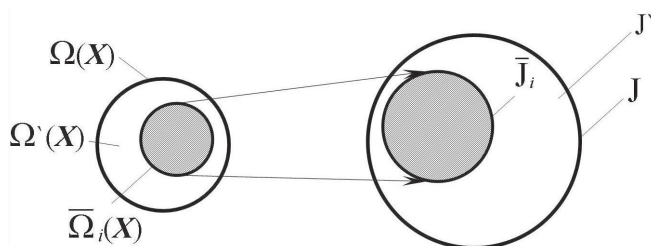


Рис. 9. Отображение результатов МКПК по Φ по каналу «ограниченно годен» в пространстве J

На рис. 9 обозначено:

$\Omega(X)$ — полное множество всех работоспособных состояний СН УАР (технических состояний);

J — полный боевой потенциал УАР (заданный соответствующими ТТХ);

$\bar{\Omega}_i(X)$ — некоторая частная область неработоспособного состояния СН УАР (обусловленная отказом по параметру X_i);

\bar{J}_i — некоторый недоступный боевой потенциал УАР (по ряду ТТХ, обусловленный отказом СН УАР по параметру X_i);

$\Omega'(X)$ — некоторый запас работоспособности УАР;

J — некоторый запас боевого потенциала УАР (с ухудшенными ТТХ).

Таким образом, становится возможным отображение монотонной связи между ТС подсистем ракеты S в пространстве ПК высшего уровня и боевого потенциала УАР J . Применяя многоальтернативную схему оценки ТС подсистем УАР «годен» — «ограниченно годен» — «брак», можно искусственно расширить область $\Omega'(X)$ наблюдаемых промежуточных технических состояний ОК, характеризующую запас работоспособности УАР (рис. 10).

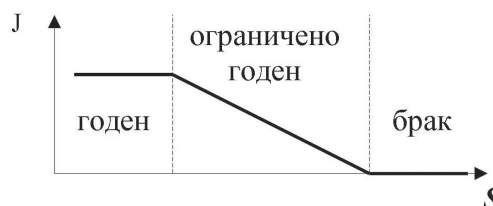


Рис. 10. Графическая интерпретация боевого потенциала ракеты J при изменении технического состояния S при использовании МКПК Φ

Выводы

При организации контроля СН УАР с использованием ПК в виде ФАП на основе (4)–(7) становится возможным проведение процедуры категорирования ТС УАР по категориям состояний: ОК исправен и работоспособен (заключение «годен»); ОК не исправен, но работоспособен (заключение «ограниченно годен»); ОК не исправен и не работоспособен (заключение «брак»). Это является необходимым условием реализации прогрессивной стратегии эксплуатации УАР по состоянию в современной системе технической эксплуатации.

Библиографический список

1. *Заковряшин А.И.* Метод количественных оценок технических состояний сложных систем // Электронный журнал «Труды МАИ». Вып. №72, 2014. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47270>, 07.04.2015.
2. *Заковряшин А.И.* Конструирование РЭА с учетом особенностей эксплуатации: Учеб. пособие. — М.: Радио и связь, 1988. — 120 с.
3. *Заковряшин А.И., Агалецкий П.С.* Элементы интегрированной логистической поддержки сложных систем // Электронный журнал «Труды МАИ». Вып. №49, 2011. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28070&PAGEN_2=2 -07.04.2015.
4. *Заковряшин А.И.* Интеллектуальная система технического диагностирования. Электронный журнал

«Труды МАИ». Вып. №49. 2011. Режим доступа — http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28071&PAGEN_2=2 -07.04.2015.

5. Захаров И.В., Соколов О.В. Оценка методической достоверности контроля систем наведения авиационных управляемых ракет // Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. 2001. Вып. 1(8). С. 53-60.

METHODIC PREREQUISITES TO THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL STATE OF ONE CLASS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Zaharov I.V.*, Trubnikov A.A.** , Reshetnikov D.A.**

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoeshosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

* e-mail: il-ya-zakharov@yandex.ru

** e-mail: a-trubnikov@inbox.ru

*** e-mail: grapler@yandex.ru

Abstract

In terms of the guidance system of the guided aircraft “air-to-air” missile methodic prerequisites of the assessment of the technical state of one class of complex technical systems were suggested. The assessment of the technical state of the guidance system of the guided aircraft missile commentary was carried out using two methods. The first one was the parameter control method in the universe of linear nonqualified tolerances. The second one was the verifying method on figure of merit in the functional-hardware potential field. The presentation of returns of control was deduced using both accounted methods in the space of parameters specified a combat potential of the guided aircraft missile.

The method of the assessment of the technical state of complex technical systems and its instantiation inside of the intellectual technical diagnosis system were in [1-4] established. In this article the development of the above mentioned approach for the assessment of the technical state of the guidance system of the guided aircraft “air-to-air” missile was reproduced.

In [5] the hybrid control method was offered. Within the framework of this method the current technique of parametric control and cueing on figure of merit were used. For a score of reasons the instantiation to the full the policy of maintenance with respect to state of systems within classic understanding for wide-ranging total of guided aircraft missiles as exploitation objects is impossible. Therefore for the instantiation of operation and maintenance of guided aircraft missiles with respect to state a new method can be used. This method was named « the method of the utmost complete usage of

the real technical state of a guided aircraft missile while decision making “in situ”.

The instantiation of such method assumes usage of the multialternative checking circuit: “effective - qualified fit - defect”, based on the assessment of the technical state of the guided aircraft missile. For this purpose a new notion J was introduced that was named a combat potential of the guided aircraft missile. J was determined by the total of tactical and technical missile characteristics $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k$, providing its dissemination against specific crowd of goals, under the crowd desired condition of the tactical employment. Thereafter the fault if only one any of parameters X (of the missile as the unit under test), defined in the space $Q^R(X)$ of the system of linearly independent permissible limits, spasmodically lower on 100% the whole combat potential of the missile notwithstanding that a limited stamina of the unit under test $Q^R(X)$ stayed behind.

Let us introduce a new mathematical object F - the functional-hardware potential (FHP). F identically specified by the crowd of subsystem duties of the guided aircraft missile. These duties strictly reflect the sequence and the quality of carrying out missions of the guided aircraft missile. The above mentioned crowd was in practice implemented on missile board by defined total of on all fours of instrument room decisions. Let us analyze the class of the guided aircraft “air-to-air” missile subsystems as persistent dynamic systems in terms of the guidance system. The engineering philosophy of development of the standard guidance system is based on the condition for miss minimum R_h while target

homing. Then the design of high performance securing control process is possible on the ground of construction and analysis of mathematical models for the guided aircraft missile as the unit under test using figure of merit W of the true miss.

Hence it becomes possible the presentation of a monotonic association between the technical state of S missile subsystems in the figure of high merit space and the combat potential J of the guided aircraft missile. The usage of the multialternative checking circuit: “effective - qualified fit - defect” does possible the made-up enhancement of $\Omega(X)$ - the area of observed intermediate technical states of the unit under test. This area features the guided aircraft missile stamina which forms the requirement for the instantiation of advanced the guided aircraft missile performance strategy inside of the modern system of technical exploitation.

Keywords: assessment of the technical state, guidance system, figure of merit, functional-hardware potential, combat potential, unalarmed failure, fictitious failure, information system of commanding technical state.

References

1. Zakovryashin A.I. *Elektronnyi zhurnal “Trudy MAI”*, 2014, no.72, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=47270> (accessed 07.04.2015).
2. Zakovryashin A.I. *Konstruirovaniye REA s uchetom osobennosti ekspluatatsii* (Construction electronics allowing for the operation), Moscow, Radio i svyaz', 1988, 120 p.
3. Zakovryashin A.I., Agaletskii P.S. *Elektronnyi zhurnal “Trudy MAI”*, 2011, no.49, available at: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28070&PAGEN_2=2 (accessed 07.04.2015).
4. Zakovryashin A.I. *Elektronnyi zhurnal “Trudy MAI”*, 2011, no.49, available at: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28071&PAGEN_2=2 (accessed 07.04.2015).
5. Zakharov I.V., Sokolov O.V. *Trudy GosNIAS. Voprosy avioniki*, 2001, no. 1(8), pp.53-60.