

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396

Ю.П. Егоров, А.И. Пятаков

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЙСКАМИ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

Егоров Юрий Петрович, доктор технических наук, профессор, окончил радиотехнический факультет Ленинградского высшего морского инженерного училища им. С.О. Макарова. Главный научный сотрудник ФНПЦ АО «НПО «Марс». Специализируется в области макропроектирования больших информационно-управляющих систем. Имеет публикации, монографии, изобретения в области проектирования систем управления. [e-mail: yure@mail.ru].

Пятаков Анатолий Иванович, кандидат технических наук, окончил Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру (там же). Главный специалист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Специализируется в области организации и построения систем передачи дискретных сообщений. Имеет публикации в области надежности комплексов средств автоматизации и передачи данных. [e-mail: uljanovsk-anatol@mail.ru].

Аннотация

Важнейшим аспектом исследования эффективности функционирования комплексов средств автоматизации (КСА) автоматизированных систем управления войсками (АСУВ) является правильный выбор показателей оценки эффективности их функционирования. КСА АСУВ (далее по тексту КСА), как и любой сложный программно-технический комплекс, обладает рядом свойств, обеспечивающих выполнение предъявляемых к нему требований. Требования, в свою очередь, носят нормативный характер, определенный в руководящих документах по автоматизации Вооруженных Сил Российской Федерации. Одним из важных свойств, влияющим на эффективность функционирования КСА, является надежность.

В данной статье приведена модель оценки эффективности КСА при отказах технических и программных средств. Показано, что оценка эффективности КСА относится к детерминированным операциям и может быть представлена как мультипликативная свертка показателей надежности.

Раскрыты два подхода к оценке эффективности и сделан обоснованный выбор в пользу одного из них. Представленная методика позволяет перейти от частных показателей надежности отдельных технических и программных средств к обобщенному показателю надежности комплекса, тесно связанному с целевой функцией КСА.

Представленный подход к оптимизации КСА по критерию эффективность/стоимость позволяет достичь требуемых показателей при минимальных затратах.

Ключевые слова: надежность, оценка надежности, оценка эффективности, надежность комплексов средств автоматизации, показатели надежности, коэффициент сохранения эффективности.

OPTIMIZATION OF AUTOMATED TROOP COMMAND AND CONTROL SYSTEM OPERATION EFFECTIVENESS IN TERMS OF RELIABILITY CRITERION

Iurii Petrovich Egorov, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Radioengineering at the Admiral Makarov Leningrad Higher Maritime School of Engineering; Chief Staff Scientist at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; specializes in the field of macro-design of large-scale information management systems; an author of monographs, articles, inventions in the field of computer-aided control systems design. e-mail: yupe@mail.ru.

Anatolii Ivanovich Piatakov, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; completed his postgraduate studies ibidem; Chief Specialist of FRPC JSC 'RPA 'Mars'; specializes in the field of organization and creation of discrete messages transmitting systems; an author of articles in the field of the automation complexes reliability and data communication. e-mail: uljanovsk-anatol@mail.ru.

Abstract

A right selection between performance evaluation of effectiveness and functioning of automation solutions for automated troop command and control systems (hereinafter referred to as the C2 Systems) is the most important research aspect of its functioning effectiveness. C2 Systems, like any other large hardware and software complexes, have a range of technical features that provide meeting of requirements for these systems. Requirements in its turn are of regulatory nature specified in directive documents on automation of the Armed Forces of the Russian Federation. Reliability is one of the important features that have an impact on effectiveness of C2 Systems functioning.

The article deals with a model of estimation of C2 Systems functioning when hardware and software failure. The estimation of C2 Systems effectiveness was demonstrated to refer to deterministic evaluation procedures and it can be represented as a multiplicative convolution of reliability performance.

Two approaches to the estimation of effectiveness were unveiled and one of these approaches was chosen on a reasonable basis. The presented techniques allow changing the specific reliability performances of specific hardware and software complexes to a summarized system reliability value pertaining to a target function of the automated complex.

The given approach to optimization of automated complexes in terms of cost-effectiveness factor allows to achieve the required performances at minimal costs.

Key words: reliability, reliability evaluation, estimation of effectiveness, reliability of automated systems, reliability performance, retention factor.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших вопросов, решаемых на этапе проектирования автоматизированной системы управления войсками (АСУВ), является оценка ожидаемой эффективности функционирования системы, которая во многом определяется эффективностью функционирования комплексов средств автоматизации (КСА) управления войсками. Проблема оценки эффективности функционирования АСУВ, несмотря на многочисленные исследования и публикации [1–4], по-прежнему, ввиду своей сложности, является актуальной. Мало освещенным направлением остается оценка эффективности функционирования КСА, особенно в зависимости от надежности.

В общетеоретическом плане оценка эффективности функционирования КСА в части надежности включает решение следующих самостоятельных задач [5]:

- обоснование системы показателей надежности КСА с позиций их максимального соответствия целям функционирования АСУВ;

- обоснование критерия эффективности КСА при отказах, согласованного с целями функционирования АСУВ;

- оценка значений показателей эффективности КСА при отказах, согласованных с целями функционирования АСУВ.

Результаты оценки эффективности служат основой для выработки решений по совершенствованию КСА путем целенаправленного изменения его характеристик.

Оценка ожидаемой эффективности АСУВ в зависимости от надежности КСА представляет собой сложную научную проблему ввиду неоднозначности решения задачи обоснования показателей и критериев эффективности АСУВ и их отображения на множестве показателей надежности КСА.

Проблематике разработки методики влияния надежности технических (ТС) и программных средств (ПС) на эффективность выполнения заданных функций и задач КСА посвящена данная статья.

1 Модель оценки эффективности КСА при отказах

Модель оценки эффективности КСА при отказах относится к детерминированным моделям [2]. Детерминированные модели характеризуются тем, что отказы и исходы функционирования (состояния КСА) связаны однозначно – каждому отказу соответствует вполне определенный исход. Поэтому по существу безразлично, что выбирать в качестве критерия – отказы или исходы функционирования.

КСА может находиться в следующих состояниях [6]:

- работоспособен (s_p);
- частично работоспособен (s_{cp});
- неработоспособен (s_{np});

Состояния $s \in S$ определяются состоянием элементов КСА – ТС и ПС.

КСА находится в состоянии s_p , если в этом состоянии находятся все ТС и ПС.

КСА находится в состоянии s_{cp} , если неработоспособно или частично работоспособно хотя бы одно из ТС или ПС но при этом показатель функционирования не ниже требуемого порога качества.

КСА находится в состоянии s_{np} , если неработоспособно или частично не работоспособно хотя бы одно из ТС или ПС, но при этом показатель функционирования ниже требуемого порога качества.

Предлагаются следующие критерии состояний КСА:

- частичный отказ наблюдается, если КСА переходит в состояние s_{cp} ;
- полный отказ наблюдается, если КСА переходит в состояние s_{np} .

Простой характер связи между отказами и исходами функционирования определяет и относительную простоту модели оценки эффективности КСА при отказах.

Поскольку каждый отказ связан лишь с одним определенным исходом, ценность исхода $F(s_i)$ может служить критерием эффективности КСА при отказах:

$$E(\bar{x}_i) = f(F(s_i)), \quad (1)$$

где $E(\bar{x}_i)$ – критерий эффективности КСА для i -го исхода (состояния ТС или ПС) КСА;

\bar{x}_i – вектор отказов для i -го состояния ТС или ПС КСА;

$F(s_i)$ – значение функции ценности (ФЦ);

s_i – исход функционирования КСА.

Функция $f(F(s_i))$, которая каждому исходу s_i ставит в соответствие какое-то действительное число $F(s_i)$, является ФЦ, если выполняются условия:

- эквивалентности исходов [$s_1 \cong s_2 \Rightarrow F(s_1) = F(s_2)$];
- предпочтительности исходов [$s_1 > s_2 \Rightarrow F(s_1) > F(s_2)$].

Из определения следует, что две функции $F(s_1)$ и $F(s_2)$ эквивалентны, если обеспечивают одинаковые исходы на множестве S , что характерно для резервируемых элементов КСА.

Кроме того, $F(s_1)$ и $F(s_2)$ будут эквивалентными, если одна из них представляет собой линейное преобразование другой, что характерно для последовательного соединения элементов в структурной схеме надежности КСА. Это означает, что отказ одного из последовательных элементов, в свою очередь, обеспечивает преобразование функции цели в линейную функцию.

Исход s_1 предпочтительнее исхода s_2 , если значение ФЦ для исхода $F(s_1)$ выше значения ФЦ для исхода $F(s_2)$.

Результатом оценки должен быть выбор (построение) такой схемы КСА, которая обладает максимальной ценностью

$$\max E(\bar{x}_i) = \max F(s_i). \quad (2)$$

Для достижения максимальной ценности в части надежности при проектировании КСА предусматриваются следующие меры:

- выбор компонентов с требуемыми характеристиками надежности;
- резервирование аппаратных средств;
- применение отказоустойчивых программных средств;
- резервное копирование баз данных;
- выбор рациональной периодичности и объема профилактических мероприятий;
- сокращение времени восстановления за счет средств детального диагностирования места отказа.

Бесконечно увеличивать ценность нецелесообразно, так как каждое из перечисленных выше мероприятий требует финансовых затрат. Поэтому оптимизируют ФЦ по критерию эффективность/стоимость.

$$E(\bar{x}_{opt}) = \max E(\bar{x}_i) \min D(r_i), \quad (3)$$

где $D(r_i)$ – экономический показатель, обеспечивающий требуемую надежность;

r_i – затраченный ресурс для достижения требуемой надежности.

Рассмотренная общая схема оценки эффективности детерминированных операций справедлива и в случае, когда ФЦ определена не на множестве исходов, а на скалярных значениях показателей надежности:

- отказоустойчивости (средняя наработка на отказ T_o);
- ремонтпригодности (среднее время восстановления T_g);
- комплексных показателей надежности (коэффициент готовности K_{oz} , коэффициент оперативной готовности K_{op});
- долговечности (средний срок службы до списания $T_{сл. ср. сл}$);
- сохраняемости (средний срок сохраняемости $T_{с. ср}$, средняя дальность транспортирования $L_{тр. ср}$).

Однако и в этом случае без ФЦ, являющейся одновременно и функцией эффективности, не обойтись. В

общем случае это обусловлено состоятельностью показателей надежности, находящихся в так называемой области Парето.

Под областью Парето (Y) понимается такая область значений показателей надежности КСА, в которой ни один из допустимых показателей надежности $y \in Y$ не доминирует над другими. При большом количестве доминирующих параметров (три и более) вычисление ФЦ становится затруднительным.

В этом случае показатель эффективности КСА строят в виде [3]:

$$E(\bar{x}_i) = f(F(y_{ij})) = f(F_{i1}(Y_1), F_{i2}(Y_2), \dots, F_{ij}(Y_j), \dots, F_{in}(Y_n)), \quad (4)$$

где $f(F(y_{ij}))$ – ФЦ для i -го исхода (состояния) КСА в зависимости от состояния j -го ТС или ПС;

\bar{x}_i – вектор отказов для i -го состояния ТС или ПС КСА;

n – количество элементов, входящих в состав КСА;

$F_{ij}(Y_j)$ – значение функции ценности для i -го состояния КСА в зависимости от состояния j -го ТС или ПС;

Y_j – показатели надежности j -го ТС или ПС.

Ценность (значимость) отдельных элементов в функционировании КСА различна (сервер, автоматизированное рабочее место (АРМ), принтер и т. д.). Следовательно, при одинаковых значениях показателей надежности $y \in Y$ для различных ТС или ПС должен различаться исход функционирования при отказах.

С учетом значимости элементов КСА ФЦ для детерминированного состояния КСА представляется в виде:

$$f(F(y_j)) = g_1 F_1(Y_1) \cdot g_2 F_2(Y_2) \cdot \dots \cdot g_n F_n(Y_n) = \prod_{j=1}^n g_j F_j(Y_j), \quad (5)$$

где $F_j(Y_j)$ – значение ФЦ для j -го элемента (ТС или ПС) КСА;

g_j – весовой коэффициент.

Очевидно условие – сумма весовых коэффициентов должна быть равна единице:

$$\sum_{j=1}^n g_j = 1. \quad (6)$$

Таким образом, при оценке эффективности в детерминированных операциях, когда разработчику известны значения показателей надежности составных элементов КСА и их допустимые диапазоны изменений, процедура построения критерия эффективности сводится к следующему:

- построение для каждого элемента КСА ФЦ $F_j(Y_j)$;
- определение весовых коэффициентов g_j ;
- представление функции эффективности в виде

$$E(\bar{x}_j) = \prod_{j=1}^n g_j F_j(Y_j). \quad (7)$$

2 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КСА ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

Выбор показателя надежности для ФЦ

КСА, как правило, относятся к изделиям непрерывного длительного применения. Для изделий данного типа нормируются следующие показатели надежности:

- а) единичные:
 - средняя наработка на отказ T_o ,
 - среднее время восстановления T_g ;
- б) комплексные:
 - коэффициент готовности K_z ,
 - коэффициент оперативной готовности K_{oz} .

Задача КСА в части надежности – обеспечение безотказного выполнения возложенных на него функций в заданном интервале времени в допустимых условиях обстановки.

Из анализа содержания задачи оценки эффективности видно, что традиционно используемые показатели, такие как: наработка на отказ, среднее время восстановления и коэффициент готовности – не позволяют достаточно полно оценивать эффективность выполнения КСА своих функций с точки зрения надежности.

Основным критерием оценки состояния КСА является его способность не допускать перерывов в функционировании задач по своему предназначению. То есть КСА должен сохранять работоспособное состояние в течение всего времени, отводимого на решение j -й функциональной задачи (ФЗ) t_{ϕ_3} . Вследствие стохастической природы протекающих в КСА процессов данный показатель состояния КСА является случайным. Математически оценивается такое состояние коэффициентом оперативной готовности.

Коэффициент оперативной готовности (K_{oz}) – это вероятность того, что изделие в момент времени t находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале $(t + t_{\phi_3})$. Коэффициент оперативной готовности при определенных условиях представляет собой произведение коэффициента готовности и вероятности безотказной работы [7]:

$$K_{oz} = K_z \cdot P_i(t + t_{\phi_3}), \quad (8)$$

где $P_i(t + t_{\phi_3})$ – вероятность безотказной работы в течение времени, отводимого на решение i -й ФЗ;

$$K_z = \frac{T_o}{T_o + T_g} \text{ – коэффициент готовности.} \quad (9)$$

Коэффициент готовности – это вероятность того, что КСА окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени.

Коэффициент эффективности КСА E_{ϕ} предлагается определять на основе K_{oz} его компонентов. При этом выражение (7) представляется в следующем виде:

$$E_{\phi} = \prod_{j=1}^n g_j \cdot K_{oz_j}. \quad (10)$$

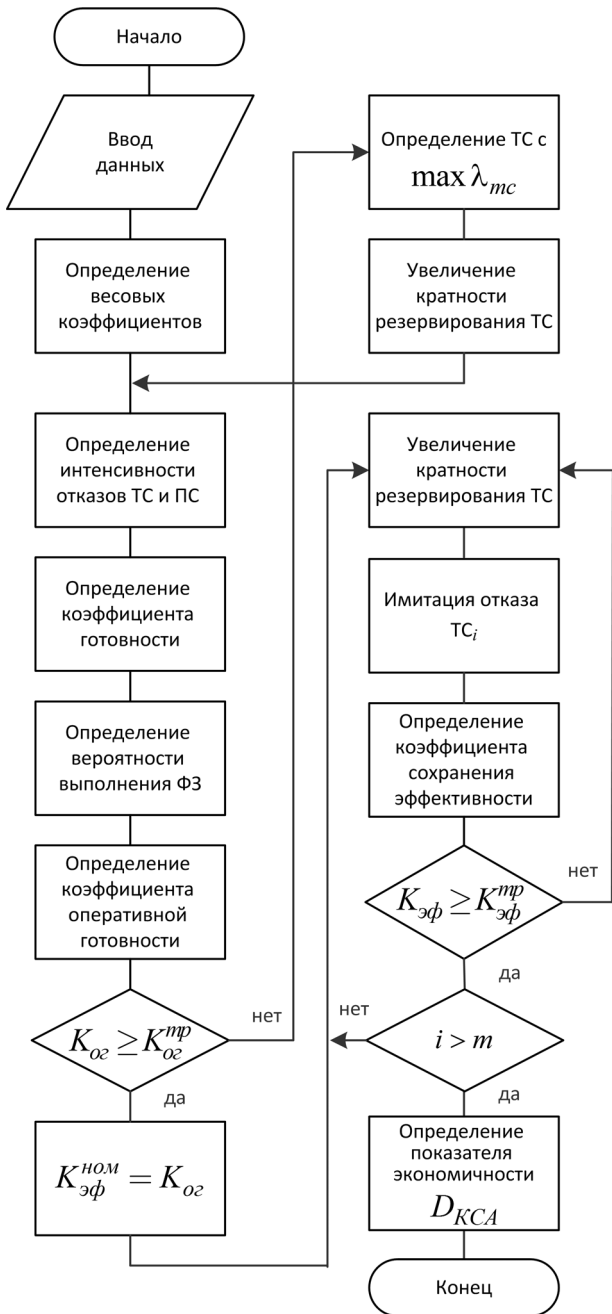


Рис. 3. Алгоритм оптимизации ССН КСА

Оптимизация ССН КСА по критерию эффективность/стоимость

Для обеспечения требуемого уровня надежности используют резервирование различной кратности. Оптимизацию ССН КСА в зависимости от кратности резервирования проведем в два шага.

На первом шаге оптимизации следует вычислить наработку на отказ каждого из последовательно включенных элементов, а затем для всей схемы.

Используя математический аппарат, приведенный выше, вычисляем коэффициент оперативной готовности КСА. При этом возможны два исхода:

а) если $K_{оз} \geq K_{оз}^{mp}$, то принимаем, что номинальный коэффициент сохранения эффективности равен коэффи-

циенту оперативной готовности $K_{эф}^{ном} = K_{оз}$;

б) если $K_{оз} < K_{оз}^{mp}$, то находим самый ненадежный элемент ССН и резервируем его.

Повторно вычисляем коэффициент оперативной готовности КСА. И так до тех пор, пока не будет выполнено условие а).

На втором шаге оптимизации, учитывая, что отказы ТС – события независимые, а время восстановления ТС после отказа много меньше наработки на отказ $T_г \ll T_о$, проводим оценку коэффициента сохранения эффективности при условии отказа одного из ТС КСА. Оценку проводим для каждого ТС в отдельности, при этом возможны два исхода:

в) если $K_{эф} \geq K_{эф}^{mp}$, то считаем резервирование оптимальным;

г) если $K_{эф} < K_{эф}^{mp}$, то находим самый ненадежный элемент ССН и увеличиваем кратность его резервирования.

Повторно вычисляем коэффициент сохранения эффективности КСА. И так до тех пор, пока не будет выполнено условие в).

Алгоритм оптимизации КСА по критерию эффективность/стоимость приведен на рисунке 3.

Работа алгоритма завершается, когда выполнено условие $K_{эф} \geq K_{эф}^{mp}$.

Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$ характеризует техническую сторону эффективности способов обеспечения надежности. Стоимостную сторону обеспечения надежности характеризует показатель экономичности:

$$D_{КСА} \geq \frac{D_n - D_u}{D_u}, \tag{14}$$

где D_n – полученный экономический показатель, обеспечивающий требуемую надежность;

D_u – экономический показатель реализации исходного уровня надежности.

Графическая интерпретация оптимизационного алгоритма приведена на рисунке 4.

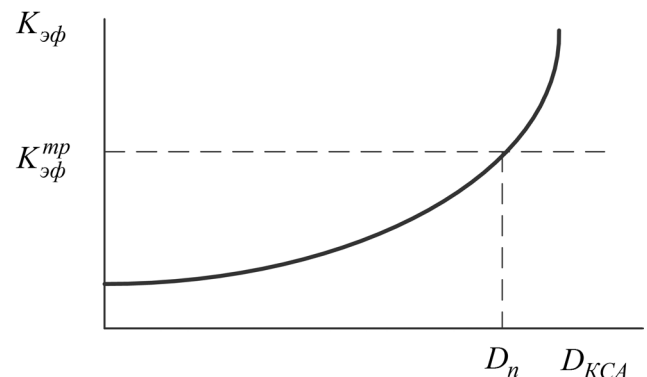


Рис. 4. Графическая интерпретация оптимизационного алгоритма

Из рисунка 4 видно, что наращивание резервирования КСА (увеличения его стоимости) прекращается при достижении требуемого показателя надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья направлена на дальнейшее развитие теории оценки эффективности КСА при отказах как ТС, так и ПС прежде всего в части совершенствования ее научно-методического аппарата. Предложенный подход расширяет границы известных методов оценки эффективности КСА и позволяет свести оценку к построению скалярного критерия эффективности, в значительной степени определяемого показателями надежности КСА.

Предлагаемый методический подход к оценке ожидаемой эффективности КСА, учитывающий связь между отказами и исходами функционирования, определяет относительную простоту модели оценки эффективности, делает ее наглядной и логически завершенной.

Предлагаемая методика позволяет определить допустимый уровень безотказного выполнения возложенных на КСА функций в заданном интервале времени в допустимых условиях обстановки.

Неравнозначность вклада отдельных ТС и ПС в целевое предназначение КСА учитывается в методике через весовой коэффициент, определяющий значимость отдельных элементов в функционировании КСА.

Проведенная оптимизация структурной схемы КСА выполнена по критерию эффективность/стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системный анализ в управлении / В.С. Анфилатов [и др.]. – М. : Финансы и статистика, 2005. – 368 с.
2. Сосюра О.В. Теоретические основы оценки эффективности управления войсками // Военная мысль. – 1997. – № 11. – С. 32–39.
3. Основы общей теории систем. Ч. 1. / А.А. Попов, И.М. Телушкин, С.Н. Бушув [и др.] ; под ред. И.М. Телушкина. – СПб. : ВАС, 1992. – 248 с.
4. Синявский В.К. Возможный подход к оценке эффективности системы управления войсками (силами) // Наука и военная безопасность. – 2008. – № 2. – С. 12–18.
5. Надежность и эффективность в технике : Справочник. В 10 т. Т. 1 : Методология. Организация. Терминология / под ред. А.И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.

6. Егоров Ю.П., Пятаков А.И., Егоров Д.П. Обеспечение надежности интегрированных автоматизированных систем специального назначения на этапах проектирования // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 4 (50). – С. 5–13.

7. Егоров Ю.П., Пятаков А.И., Сулейманова Л.И. Оценка готовности программно-технического комплекса к решению функциональных задач // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2 (52). – С. 20–27.

REFERENCES

1. Anfilatov V.S. et al. *Sistemnyi analiz v upravlenii* [System Analysis in Management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005. 368 p.
2. Sosiura O.V. *Teoreticheskie osnovy otsenki effektivnosti upravleniia voiskami* [Fundamentals of Estimation of Troop Command and Control Effectiveness]. *Voennaia mysl* [Military Thought], 1997, no. 11, pp. 32–39.
3. Popov A.A., Telushkin I.M., Bushuev S.N., et al. *Osnovy obshchei teorii sistem. Ch. 1. pod red. I.M. Telushkina* [General Systems Theory Base. Part.1, edited by I.M. Telushkina]. St.Petersburg, VAS Publ, 1992. 248 p.
4. Siniavskii V.K. *Vozmozhnyi podkhod k otsenke effektivnosti sistemy upravleniia voiskami (silami)* [A Feasible Approach to the Estimation of Troop Command and Control System Efficiency]. *Nauka i voennaia bezopasnost* [Science and Military Security], 2008, no. 2, pp. 12–18.
5. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Spravochnik. V 10 t., T. 1: Metodologiya. Organizatsiia. Terminologiya*. Pod red. A.I. Rembezy [Reliability and Effectiveness in Technics. Guide in 10 volumes, vol. 1. Methodology. Organization. Definitions. Edited by A.I. Rembezy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p.
6. Egorov Yu.P., Piatakov A.I., Egorov D.P. *Obespechenie nadezhnosti integrirovannykh avtomatizirovannykh sistem spetsialnogo naznachenii na etapakh proektirovaniia* [Reliability Assurance of Integrated Computer-Aided Systems of Special Purpose at the Designing Stages]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 4 (50), pp. 5–13.
7. Egorov Yu.P., Piatakov A.I., Suleimanova L.I. *Otsenka gotovnosti programmno-tekhnicheskogo kompleksa k resheniiu funktsionalnykh zadach* [Estimation of Hardware and Software Complex Readiness to Solve the Functional Tasks]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2018, no. 2 (52), pp. 20–27.