УДК 621.391

DOI: 10.15827/0236-235X.122.338-342

Дата подачи статьи: 31.10.17

2018. Т. 31. № 2. С. 338–342

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С КОНТРОЛЕМ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ

Р.В. Допира¹, д.т.н., профессор, старший научный сотрудник, rvdopira@yandex.ruВ.А. Дикарев², д.т.н., профессор, зав. кафедрой, dikva@mail.ruА.Н. Потапов³, к.т.н., доцент, зам. начальника кафедры, potapov_il@mail.ruЕ.Е. Бушев³, адъюнктИ.А. Юрьев⁴, к.т.н., зам. начальника¹ Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, ул. Жигарева, 50, г. Тверь, 170022, Россия² Институт математики, информатики и естественных наук Московского городского педагогического университета, Шереметьевская ул., 29, 127521, г. Москва, Россия³ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия⁴ Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга, ул. Новая Басманная, 20, г. Москва, 107078, Россия

Совершенствование комплексов технических средств связано с необходимостью проведения исследований по продлению ресурса техники при снижении расходов на эксплуатацию. Одним из путей повышения качественных показателей технического состояния таких комплексов на протяжении их жизненного цикла при одновременном снижении расходов на эксплуатацию является переход на техническое обслуживание с периодическим контролем. При эксплуатации объектов АСУ все большее применение находят методы технического обслуживания с периодическим контролем, учитывающие фактическое состояние техники. При этом необходимо отметить, что ни один из методов технического обслуживания не реализуется без проведения профилактики, и каждый из них имеет свою специфику при определении сроков и объемов профилактических работ.

В работе предложено алгоритмическое обеспечение программного комплекса технического обслуживания с контролем уровня надежности средств обеспечения полетов. При разработке алгоритма учитывались объем и периодичность технического обслуживания.

Разработанный алгоритм реализован в виде программного комплекса, позволяющего определить оптимальные периоды технического обслуживания. Работоспособность алгоритма проверена на основе функционирования АРМ руководителя ближней зоны для контроля технического состояния средств радиосвязи. Программный комплекс позволяет определить по техническому состоянию оптимальные периоды технического обслуживания комплексов технических средств.

Ключевые слова: программный комплекс, техническое средство, контроль, уровень надежности, техническое обслуживание, алгоритмическое обеспечение.

Для успешного решения задачи определения рациональной периодичности проведения *технического обслуживания* (ТО) с использованием методов статистического прогнозирования предлагается алгоритм прогнозирования ТО *технических средств* (ТС) обеспечения полетов с контролем уровня надежности [1].

В отличие от известных постановок задачи при использовании предлагаемой системы ТО учитывалось требование периодичности ТО, а также то, что объем работ очередного ТО включает в себя все виды предшествующих.

В качестве критерия эффективности проведения ТО с контролем уровня надежности рассматривается максимальная вероятность безотказной работы системы на заданном отрезке времени при ограничениях на суммарные затраты, связанные с проведением профилактических работ [2].

При этом предполагается, что отказ любого изделя приводит к отказу системы в целом.

Таким образом, максимальная вероятность безотказной работы является гарантированным уровнем

надежности. Для большинства сложных объектов, содержащих большое количество различных элементов, используется экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы [3].

Исходя из того, что отказ любого элемента приводит к отказу системы, математическую постановку задачи сформулируем следующим образом.

Пусть функциональная система состоит из m элементов. Элемент j ($j \in \{1, 2, \dots, m\}$) имеет интенсивность отказов λ_j .

При ТО с контролем уровня надежности вида i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) контролю подвергается множество элементов S_i ($S_i \subset S_{i+1}$, S_n , $n = \{1, 2, \dots, m\}$) с соответствующими затратами r_i . Задано время эксплуатации T .

Требуется определить оптимальный набор периодов ТО элементов $E^* \{\tau_i^*, i = 1, \dots, n\} \subset E$, при котором суммарные затраты $R(E)$ не превышают допустимую величину R_0 и выполняется условие

$$P^*(E^*) = \max_E \min_i P(E, t), \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$, $P(E, t)$ – вероятность безотказной работы системы.

С учетом повторяемости процесса изменения $P(E, t)$ с периодом τ_n определялось $P(E)$ как вероятность безотказной работы системы в момент времени, предшествующий очередной проверке n :

$$P(E) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau_i), P_i(\tau_i) = \ell^{(-\sum_{j=A_i} \lambda_j) \tau_i}, \quad (2)$$

где $A_i = S_i/S_{i-1}$ – множество элементов системы, которые не проверялись к моменту τ_i ($\bigcup_{i=1}^n A_i = \{1, 2, \dots, m\}$) [5].

Суммарные затраты $R(E)$ с учетом того, что ТО вида i на интервале $[0, \tau_{i+1}]$ проводится $\tau_{i+1}/\tau_i - 1$ раз, определялись следующим образом:

$$R(E) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{T}{\tau_{i+1}} \left(\frac{\tau_{i+1}}{\tau_i} - 1 \right) r_i, \text{ где } \tau_{n+1} = T. \quad (3)$$

Задача выбора оптимального набора периодов ТО сводится к отысканию набора $E^* = \{\tau_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ интервалов времени между проверками τ_i , при котором

$$P^*(E^*) = \max_E P(E), \quad R(E) \leq R_0. \quad (4)$$

Данная задача решалась методом динамического программирования. Для этого вводились переменные x_i ($x_i = \tau_{i+1}/\tau_i$, $1, 2, \dots, x_n = T/\tau_n = 1, 2, \dots$) и τ выражалось через x_i : $\tau_i = \frac{T}{\prod_{y=i}^n x_y}$.

$$\text{Тогда } -\ln P^*(X^*) = \frac{\min_{x_j} \sum_{i=1}^n a_i}{\prod_{y=i}^n x_y}, \quad (5)$$

$$a_i = T \sum_{j \in A_i} \lambda_j, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - 1) r_i \prod_{y=i+1}^n x_y \leq R_0. \quad (7)$$

Требуется найти набор $X^* = (x_i^*, i = 1, 2, \dots, n)$, соответствующий оптимальной периодичности проверок, при котором выполняется условие (4).

С помощью рекуррентного уравнения, полученного путем применения принципа оптимальности Беллмана, на каждом этапе вычислений определялась функция $\phi_i(R_i)$ – min суммарной интенсивности отказов при проведении проверок, решения о проведении которых были приняты на этапах $1, 2, \dots, i-1$ при заданном состоянии затрат R :

$$\phi_i(R_i) = \min_{x_i} \frac{1}{x_i} \left[a_i - \phi_{i-1} \left(\frac{R_i - (x_i - 1)r_i}{x_i} \right) \right]. \quad (8)$$

При последовательном вычислении $\phi_i(R_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) на шаге n определяется $\phi_n(R_0) = -\ln P^*(X^*)$.

Для решения уравнения (8) на каждом шаге i предварительно перебором находится множество

значений вспомогательной функции:

$$\{L_i(\Phi_i)\} = \{L_{i,\beta}, \Phi_{i,\beta}, X_{i,\beta} \mid L_{i,\beta} = \frac{\Phi_{i-1,\alpha} + a_i}{x_i}\},$$

$$\Phi_{i,\beta} = x_i R_{i-1,\alpha} + (x_i - 1)r_i; X_{i,\beta} = X_{i-1,\alpha} \cup \{x_i\}, \quad (9)$$

$$0 \leq \Phi_{i,\beta} \leq R_0, \alpha = 1, l_{i-1}, x_i = 1, 2, \dots$$

Тогда $\{\phi_i(R_i)\} \subseteq \{L_i(R_i)\}$ определим в виде мажорирующей последовательности, потребовав для каждого члена $\alpha \{\phi_i(R_i)\}$ выполнение условия

$$\phi_{i,\alpha} = \min_{\beta \in C_{i,\alpha}} L_{i,\beta}, \quad (10)$$

$$C_{i,\alpha} = \left\{ k \mid \Phi_{i,k} = R_{i,\alpha} = \min_{\beta} \Phi_{i,\beta}, L_{i,\beta} < \phi_{i,\alpha-1} \right\}. \quad (11)$$

Программная реализация алгоритма ТО с контролем уровня надежности комплексов ТС обеспечения полетов

Разработанный алгоритм ТО с контролем уровня надежности ТС обеспечения полетов, входящих в состав комплекса средств руководства полетами (КСРП-А), предназначенного для решения задач по автоматическому сбору и обработке информации о воздушной обстановке в аэродромной зоне и непосредственного управления полетами и посадкой воздушных судов с командно-диспетчерского пункта аэродрома, реализован в виде программного комплекса, позволяющего определить оптимальные периоды ТО [6, 7].

Работоспособность алгоритма была проверена на основе функционирования АРМ руководителя ближней зоны для контроля ТС радиосвязи [8]. С этой целью определена периодичность проведения четырех проверок шести элементов s , (микросхемы со средней степенью интеграции, транзисторы германиевые до 2мВт, конденсаторы керамические, резисторы пленочные, дроссели, катушки индуктивности), входящих в состав КСРП-А в ходе проведения профилактических работ, при следующих начальных данных [9]:

– интенсивность отказов элементов $\lambda_j = \{2 \cdot 10^{-7}, 8 \cdot 10^{-7}, 1 \cdot 10^{-7}, 0,4 \cdot 10^{-7}, 0,8 \cdot 10^{-7}, 3 \cdot 10^{-7}\}$;

– время эксплуатации элементов, входящих в состав КСРП-А, $T = 8640$ ч;

– затраты на проведение профилактических работ $R^0 = 15$ ч.

Из формул (2) и (5) определяются A_i и a_i . Например: $A_3 = S_3 \setminus S_2 = \{1, 2, 3, 4, 5\} \setminus \{1, 2, 3\} = \{4, 5\}$. Значения количества элементов – S_i , затрат на проведение профилактических работ – r_i ($i = \overline{1,4}$), множество элементов системы – A_i , которые не проверялись к моменту τ_i и интенсивности отказов a_i , представлены в таблице 1. Далее находятся

$$\phi_{1,\alpha} = \frac{a_1}{x_1} \text{ и } R_{1,\alpha} = (x_1 - 1) \cdot r_1 \leq R^0 \quad (x_1 = \alpha = 1, 2, \dots).$$

Значения суммарной интенсивности отказов $\phi_{1,\alpha}$, затрат $R_{1,\alpha}$ и переменных $x_1 = \alpha$ записываются в

верхнюю строку таблицы 2. Для каждого возможного x_2 и $1, \alpha$ вычисляется $L_{2,\beta}$, $\Phi_{2,\beta}$, $X_{2,\beta} = \{x_1, x_2\}$, $\beta = 1, 17$ [10].

Таблица 1

Значения количества элементов, затрат на проведение профилактических работ, множество элементов системы и интенсивности отказов

Table 1

The number of elements, the cost of maintenance works, a set of system elements and failure rate

i	1	2	3	4
S_i	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, ..., 6
r_i	2	3	4, 5	6
A_i	1, 2	3	4	
$a_i \cdot 10^{-3}$ 1/ч	8,64	0,864	1,037	2,592

Таблица 2

Значения элементов

Table 2

The values of elements

$x_1 = \alpha$ $\phi_{1,\alpha} = 10^{-3}$ $R_{1,\alpha}$	1	2	3	4	5	6	7	8
	8,64 0	4,32 2	2,88 4	2,16 6	1,728 8	1,44 10	1,234 12	1,08 14
β x_1, x_2 $L_{2,\beta} \cdot 10^{-3}$ $\Phi_{2,\beta}$	1 1,1 9,504 0	2 2,1 5,184 2	3 3,1 3,744 4	4 4,1 3,024 6	5 5,1 2,592 8	6 6,1 2,304 10	7 7,1 2,098 12	8 8,1 1,944 14
	9 3 1,2 4,752 3	10 2,2 2,592 7	11 3,2 1,872 11	12 4,2 1,512 15				
	13 1,3 3,168 6	14 2,3 1,728 12						
	15 1,4 2,376 9							
	16 1,5 1,901 12							
	17 1,6 1,584 15							

Например, при $x_2 = 2$ и $1, \alpha = 1, 3$:

$$L_{2,11} = (\phi_{1,3} = 2,88 \cdot 10^{-2}) (x_2 = 2) + (a_2 = 0,864 \cdot 10^{-2}) + (a_2 = 0,864 \cdot 10^{-2}) / (x_2 = 2) = 1,872 \cdot 10^{-2},$$

$$\Phi_{2,11} = (R_{1,3} = 4) \cdot (x_2 = 2) + ((x_2 = 2) - 1) \cdot (r_2 = 3) = 11.$$

Из выражений (10) и (11) выделяется последовательность $\{\phi_2(R_2)\}$, члены которой отмечены номерами α в правом верхнем углу соответствующих клеток таблицы 2.

Например, пусть выделены первые четыре члена $\{\phi_2(R_2)\}$. Для определения члена $a = 5$ предварительно определяется подмножество $C_{2,5}$. Для этого, используя (11), в таблице 2 отыскиваются члены $\{L_2(\Phi_2)\}$ с номерами $\beta = 4, 8, 10, 17$, отвечающие условию $L_{2,\beta} < \phi_{2,4} = L_{2,3} = 3,744 \cdot 10^{-2}$, и выделяется среди них подмножество $C_{2,5} = \{4, 13\}$ членов, обладающих минимальным $\Phi_{2,\beta} = R_{2,\beta} = 6$, $\phi_{2,\alpha} = \min_{\beta=\{4,13\}} L_{2,\beta} = 3,024 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, пятым членом $\{\phi_2(R_2)\}$ является член $\{L_{2,\beta}\}$ с номером $\beta = 4$.

На следующих $i = 3, 4$ шагах поиска проводятся аналогичные вычисления, результаты которых приведены в таблице 3. Это означает, что элементы 1 и 2 необходимо проверять с периодичностью 199 ч, а элементы 1, 2, ..., 6 с периодичностью 399 ч. При этом вероятность безотказной работы $P^* = 0,964$ [9].

Из таблицы 3 $-\ln P^* = \phi_{4,10} = 3,686$, $X^* = \{3, 1, 1, 2\}$ и $E^* = \{\tau_1^* = 1,44 \cdot 10^3, \tau_2^* = \tau_3^* = \tau_4^* = 4,32 \cdot 10^3\}$.

Это означает, что элементы 1, 2 необходимо проверять с периодичностью 1 440 ч, а элементы 1–6 с периодичностью 4 320 ч. При этом вероятность безотказной работы $P^* = 0,964$. На рисунках 1 и 2 показаны, соответственно, заданные и выходные параметры оптимизации периодичностей проверок ТС обеспечения полетов на основе программного комплекса ТО с контролем уровня надежности.

Структура программного комплекса ТО с контролем уровня надежности средств обеспечения полетов

Разработанный алгоритм ТО с контролем уровня надежности комплекса технических средств (КТС) обеспечения полетов реализован в виде программного комплекса, структура которого представлена на рисунке 3.

Таблица 3

Результаты вычислений

Table 3

Computational results

α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1, x_2 $\phi_{2,\alpha} \cdot 10^{-2}$ $R_{2,\alpha}$	1,1 9,504 0	2,1 5,184 2	1,2 4,752 3	3,1 3,744 4	4,1 3,024 6	2,2 2,592 7	1,4 2,376 9	3,2 1,872 11	2,3 1,728 12	4,2 1,512 15
x_1, x_2, x_3 $\phi_{3,\alpha} \cdot 10^{-2}$ $R_{3,\alpha}$	1,1,1 10,541 0	2,1 6,221 2	1,2,1 5,789 3	3,1,1 4,781 4	4,1,1 4,061 6	2,2,1 3,629 7	2,1,2 3,110 8	1,2,2 2,894 10	3,1,2 2,390 12	2,1,3 2,074 14
x_1, x_2, x_3, x_4 $\phi_{4,\alpha} \cdot 10^{-2}$ $R_{4,\alpha}$	1,1,1,1 13,133 0	2,1,1,1 8,813 2	1,2,1,1 8,381 3	3,1,1,1 7,373 4	4,1,1,2 6,566 6	2,2,1,1 6,221 7	2,1,2,1 5,702 8	2,1,1,2 4,406 10	1,2,1,2 4,190 12	3,1,1,2 3,686 14

Рис. 1. Заданные параметры оптимизации периодичностей проверок систем

Fig. 1. Set parameters of optimization of the system inspection frequency

Рис. 2. Выходные параметры оптимизации периодичностей проверок систем

Fig. 2. The output optimization parameters of the system inspection frequency

Рис. 3. Структура программного комплекса ТО с контролем уровня надежности средств обеспечения полетов

Fig. 3. The structure of the software package of technical maintenance with the control of the reliability level of flight support facilities

Работоспособность данного алгоритма проверена на основе функционирования АРМ руководителя ближней зоны для контроля ТС средств радиосвязи. Программный комплекс ТО с контролем уровня надежности средств обеспечения полетов позволяет по техническому состоянию определить оптимальные периоды ТО КТС.

Литература

1. Дикарев В.А. Обработка параметров системы информационного обеспечения авиационных комплексов радиоэлектронной борьбы // Радиотехника. 2001. № 4. С. 59–64.
2. Абу-Абед Ф.Н., Помазуев О.Н., Платонов А.Ю., Мионов А.М., Рюмшин А.Р. Методика определения показателей качества обнаружения радиолокационных станций // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 118–124.
3. Бушнев Е.Е. Техническая эксплуатация радиоэлектронных средств по состоянию // Основные направления адаптации объединенной системы ПВО государств-участников СНГ к решению задач воздушно-космической обороны: сб. матер. Междунар. воен.-науч. конф. 2016. Т. 1. С. 33–38.
4. Кирпичников А.П., Моисеев С.Н., Лебедев В.В., Сухарев В.А., Герасимов И.В., Олешко В.С., Ткаченко Д.П. Оп-

тимизация методов технического обслуживания радиотехнических систем // Вестн. Казанского технологич. ун-та. 2013. № 14. С. 178–181.

5. Сысоев В.В., Крутских П.П., Свинцов А.А. Математическая модель информационного конфликта // Радиотехника. 2001. № 3. С. 77–80.

6. Лебедев В.В., Потапов А.Н. Оптимизация периодичности и объема профилактических работ при планировании и организации технического обслуживания комплексов («ОПОПР – ПОТОК»). Свид. о гос. регистр. прогн. для ЭВМ 2007610585. Российская Федерация. № 2006614190; заявл. 08.12.06; зарегистр. 06.02.07.

7. Бунин А.В., Потапов А.Н., Бушнев Е.Е. Модернизированный метод формирования смешанной системы управления техническим состоянием на основе декомпозиции комплексов радиотехнических средств // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 5. С. 61–74.

8. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М.: Логос, 2003. 208 с.

9. Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. Ibid. 2003, vol. 29, no. 4, pp. 815–835.

10. Gertler J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. Proc. IEEE Control Systems Magazine, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 361–376.

**ALGORITHMIC SOFTWARE OF SOFTWARE MAINTENANCE COMPLEX CONTROLLING
THE RELIABILITY LEVEL OF FLIGHT FACILITIES**

R.V. Dopira¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, rvdopira@yandex.ru

V.A. Dikarev², Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Chair, dikva@mail.ru

A.N. Potapov³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Chair, potapov_il@mail.ru

E.E. Bueshev³, Adjunct

I.A. Yuriev⁴, Ph.D. (Engineering), Deputy Head

¹ Military Academy of the Aerospace Defence, Zhigarev St. 50, Tver, 170022, Russian Federation

² Institute of Mathematics, Informatics and Natural Sciences of the Moscow City Pedagogical University, Sheremetevskaya St. 29, 127521, Moscow, Russian Federation

³ Military Scholastic-Scientific Centre of the Air Forces "Zhukovsky and Gagarin Air Forces Academy", Starykh Bolshhevikov St. 54a, Voronezh, 394064, Russian Federation

⁴ Central Research Radiotechnical Institute named after academician A.I. Berg, Novaya Basmannaya St. 20, Moscow, 107078, Russian Federation

Abstract. Improvement of technical means complexes is related to the need for research on extending the life of equipment while reducing operational costs. One of the ways of improving qualitative indicators of a technical condition (TC) of such complexes throughout their life cycle while reducing operational costs is the transition to technical service (TS) with periodical inspection. Nowadays when using automated control systems (management information systems), maintenance methods with periodic monitoring that consider the actual condition of the equipment are becoming more and more popular. It should be noted that none of the methods is implemented without the prevention; each of them has its specificity when determining the timing and amount of preventive maintenance.

To solve of the problem of determining rational frequency using statistical projections successfully, the paper proposes algorithmic support for software maintenance complex controlling the level of reliability of flight facilities. In this case, the developers of an algorithm took into account the volume and frequency of maintenance.

The developed algorithm is implemented as a software complex, which allows determining optimal periods of maintenance. The algorithm efficiency is verified based on functioning of the automated workplace of a near zone head to control the engineering status of radio facilities. According to the engineering status, the software package determines the optimal maintenance periods for technical means complexes.

Keywords: software package, technical means, reliability level, maintenance, algorithmic support.

References

1. Dikarev V.A. Processing parameters of the information support system of aviation warfare systems. *Radiotekhnika* [Jour. Radioengineering]. 2001, no. 4, pp. 59–64 (in Russ.).
2. Abu-Abad F.N., Pomazuev O.N., Platonov A.Yu., Mironov A.M., Rumson A.R. The method of quality factors estimation for radar detection. *Programmye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2014, no. 2 (106), pp. 118–124 (in Russ.).
3. Bueshev E.E. Technical operation of radioelectronic means. *Osnovnye napravleniya adaptatsii obyedinennoy sistemy PVO gosudarstv-uchastnikov SNG k resheniyu zadach vozdushno-kosmicheskoy oborony: sb. mater. Mezhdunar. voen.-nauch. konf.* [Proc. Int. Military and Scientific Conf. "Basic Directions of Adaptation of the Joint Air Defense System of Member States of the CIS to the Solution of Aerospace Defense Problems"]. Tver, 2016, vol. 1, pp. 33–38 (in Russ.).
4. Kirpichnikov A.P., Moiseev S.N., Lebedev V.V., Sukharev V.A., Gerasimov I.V., Oleshko V.S., Tkachenko D.P. Optimization of methods of radio engineering systems maintenance. *Vestn. tekhnologicheskogo univ.* [Herald of Kazan Technological Univ.]. Kazan, 2013, no. 14, pp. 178–181 (in Russ.).
5. Sysoev V.V., Krutskikh P.P., Svintsov A.A. Mathematical model of an information conflict. *Radiotekhnika* [Jour. Radioengineering]. 2001, no. 3, pp. 77–80 (in Russ.).
6. Lebedev V.V., Potapov A.N. *Optimizatsiya periodichnosti i obyoma profilakticheskikh rabot pri planirovani i organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya kompleksov ("OPOPR – POTOK")* [Optimization of the frequency and volume of maintenance work in the planning and organization of maintenance systems ("OPOPR – POTOK")]. Certificate of registration of a computer program 2007610585. No. 2006614190 (in Russ.).
7. Bunin A.V., Potapov A.N., Bueshev E.E. The modernized method of a mixed technical state control system formation based on the decomposition of radio aids complexes. *Nauch. vestn. MGTU* [Civil Aviation High Technologies]. Moscow, MGTU GA, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 61–74 (in Russ.).
8. Aleksandrovskaya L.N. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Modern Methods of Providing Complex Technical Systems Reliability]. Moscow, Logos Publ., 2003, 208 p.
9. Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. *Ibid.* 2003, vol. 29, no. 4, pp. 815–835.
10. Gertler J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 361–376.