

УДК 629.7.017.519.21:003.13.
DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-21-30

Модель предупредительных замен элементов сложных систем в зависимости от наработки и количества отказов

В.Е. Емельянов¹, С.П. Матыюк¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Современные условия хозяйственной деятельности эксплуатационных предприятий гражданской авиации актуализируют проблему экономически целесообразных мероприятий по организации технической эксплуатации и обслуживания отраслевого оборудования, в частности средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи. При этом очевидна необходимость перевода указанных средств на техническое обслуживание по состоянию, вызывающего в свою очередь необходимость решения задач, связанных с определением времени предупредительной замены элементов, диагностируемые параметры которых могут достигнуть предельных значений. В настоящем исследовании разработан алгоритм оценки оптимальной замены элементов с помощью метода условной вероятностной характеристики для систем длительного периода эксплуатации и имеющих фиксированное число отказов. Проведена оценка точности определения искомого параметра при условии, что его изменения имеют детерминированную и случайную составляющие. Найдены математическое ожидание и дисперсия полученной оценки. При условии что время функционирования средств между восстановлениями (ремонтами) имеет тенденцию к уменьшению с увеличением числа отказов, получено среднее число конечных отказов, удовлетворяющее интегральному уравнению Вольтерры. Для анализа стоимостных затрат на восстановление в рамках предложенной модели найдено выражение для удельной стоимости работ в зависимости от принятого правила замены и длины ожидаемых циклов. С учетом математического ожидания последней и сопутствующих затрат сформировано двумерное оптимальное правило замены и показана целесообразность использования такого периода замен, который минимизировал максимум средних затрат. Полученные результаты представляются полезными при организации мероприятий по профилактическому обслуживанию средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи на различных этапах их жизненного цикла.

Ключевые слова: предупредительная замена, обслуживание по состоянию, условная вероятностная характеристика, точность оценки, удельная стоимость, двумерное правило замены.

Для цитирования: Емельянов В.Е., Матыюк С.П. Модель предупредительных замен элементов сложных систем в зависимости от наработки и количества отказов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 4. С. 21–30. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-21-30

Model of preventive replacements of complex systems elements depending on the operation time and the number of failures

V.E. Emelyanov¹, S.P. Matiuk¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Modern conditions of economic activity of civil aviation operators make actual the problem of economically feasible measures for the organization of technical operation and maintenance of industry equipment, in particular, means of radio technical support for flights and aeronautical telecommunications. At the same time, it is obvious that these means need to be transferred to maintenance on a condition, which, in turn, causes the need to solve the problems related to determining the time for the preventive replacement of elements which diagnosable parameters can reach limit values. This paper presents an algorithm for estimating the optimal replacement of elements using the conditional probabilistic characteristic method for systems with a long period of operation and having a fixed number of failures. An assessment of the accuracy of determining the desired parameter is carried out, provided that its changes have deterministic and random components. The mathematical expectation and variance of the obtained estimate are found. Provided that the time of means operation between restorations (repairs) tends to decrease with an increase in

the number of failures, the average number of final failures is obtained that satisfies the Volterra integral equation. To analyze the cost of restoration within the framework of the proposed model, an expression was found for the unit cost of work, depending on the accepted replacement rule and the duration of the expected cycles. Taking into account the mathematical expectation of the latter and associated costs, a two-dimensional optimal replacement rule is formed, and the expediency of using such a replacement period that minimizes the maximum average costs is shown. The obtained results are useful in organizing activities for preventive maintenance of radio technical support for flights and aeronautical telecommunications at various stages of their life cycle.

Key words: preventive replacement, condition maintenance, conditional probabilistic characteristic, estimation accuracy, unit cost, two-dimensional replacement rule.

For citation: Emelyanov, V.E., Matyuk, S.P. (2023). Model of preventive replacements of complex systems elements depending on the operation time and the number of failures. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 4, pp. 21–30. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-21-30

Введение

Экономически целесообразные методы организации технической эксплуатации средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи (РТОП и ЭС) предполагают использование технического обслуживания (ТО) по состоянию [1–4]. При этом актуализируется задача выбора времени предупредительной замены элементов, находящихся в предотказовом состоянии. Не останавливаясь на принципах диагностики и контроля, которые достаточно широко проанализированы и представлены в работах [5–7], перейдем к вопросу о планировании ТО.

Методы и методология исследования

Совокупность деградиационных процессов, в качестве которых можно рассматривать снижение показателей безотказности элементов, вызванное их «старением», влиянием непреднамеренных электромагнитных помех, нестабильностью источников питания и подобным, воздействующих на элементы средств, представим в виде математического ожидания функции ψ_i вектора Y [8, 9]:

$$\xi = M [\psi_i(Y)]. \quad (1)$$

Вектор Y является аналогом закона распределения времени безотказной работы. Будем его рассматривать как два вектора W и V

таким образом, что к вектору V будут относиться все значения воздействий, для которых возможно аналитическое определение вероятностных характеристик [10, 11]. Тогда условное значение вероятностной характеристики $\xi_{\text{усл.}}$ будет зависеть от вектора W :

$$\xi_{\text{усл.}} = \xi_{\text{усл.}}(W). \quad (2)$$

Для определения априорной оценки оптимальной замены элементов можно в соответствии с [12, 13] использовать метод статистических испытаний. При наличии выборки K оценка $\tilde{\xi}$ будет равна

$$\tilde{\xi} = K^{-1} \sum_{j=1}^k \xi_{\text{усл.}}(W_j), \quad (3)$$

где W_j – случайное значение вектора W в j -м эксперименте.

Для оценки точности определения $\tilde{\xi}$ введем функцию ψ_2 , которая определяет зависимость вектора Y от W и V :

$$Y = \psi_2(W, V).$$

Фактически соотношение (3) определяется типом процессов, описывающих функциональное состояние средств РТОП и ЭС [14, 15].

С учетом сказанного имеем

$$\xi = M [\psi_1\{\psi_2(W, V)\}]$$

и далее

$$\xi_{\text{усл.}}(W) = \int_{V_H}^{V_B} \psi(W, V) f(v/w) dv, \quad (4)$$

где $f(v/w)$ – условная плотность распределения вектора (ПРВ) V ; V_H и V_B – границы значений случайных воздействий.

$$M[\xi] = \int_{V_H}^{V_B} \int_{W_1}^{W_2} \psi(W_j, V) f(v/w) \varphi(w) dv dw = \xi, \quad (6)$$

$$\tilde{D} = K^{-1} \left\{ \left[\int_{V_H}^{V_B} \int_{W_1}^{W_2} \psi(W, V) f(v/w) dv \right]^2 \varphi(w) dw - \left[\int_{V_H}^{V_B} \int_{W_1}^{W_2} \psi(W, V) f(v/w) \varphi(w) dv dw \right]^2 \right\},$$

где $\varphi(w)$ – ПРВ W ; W_1 и W_2 – граничные значения вектора W .

Далее имеем

$$\xi = K^{-1} \sum_{j=1}^k \psi(W_j, V_i).$$

Дальнейшее решение задачи ищем в нахождении некоторого оптимального правила замены $Q = Q(T, N)_{\text{опт}}$, где T – наработка, N – количество отказов.

Отметим, что в соответствии с [16–18] среднее число отказов $R(t)$ наработки имеет конечное число и удовлетворяет интегральному уравнению Вольтерры:

$$R(t) = F(t) + \int_0^t H(t-\tau) F(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где $F(t)$ – ПРВ времени k -го отказа; $H(t)$ – функция восстановления.

Выигрыш в точности оценки ξ по сравнению со статистическими определениями $\xi = K^{-1} \sum_{j=1}^k \psi(W_j, V_i)$ определяется соотношением соответствующих дисперсий $\eta = \tilde{D}/\hat{D}$.

Соответственно, соотношение для оценки ξ примет вид

$$\xi = K^{-1} \sum_{j=1}^k \int_{V_H}^{V_B} \psi(W_j, V) f(v, w_j) dv. \quad (5)$$

Математическое ожидание и дисперсия оценки ξ равны

В предположении, что $\eta > 1$, мы имеем счетную последовательность $\{\xi(t), t \geq 0\}$ и последовательность некоторых независимых случайных переменных $\{\theta_n > 0, n = 1, 2, \dots\}$. ФРВ θ_n обозначим как $F(\alpha^{n+1}, t)$, $\alpha > 0$.

Если время наработки $T_n = \sum_{i=1}^n \theta_i$, $\{\xi(t) \geq n\} = \{\theta_n \leq t\}$, то процесс $\xi(t)$ можно считать геометрическим [16, 19]. T_n является временем n -й замены, а θ_n – n -м интервалом времени между заменами.

Будем считать, что восстановление средств РТОП и ЭС производится сразу после отказа и Q_n – время восстановления после n -го отказа. Запишем ФРВ в виде $F(\alpha^{n-1}, t)$ и $G(\beta^{n-1}, t)$ соответственно. Принимаем, что $\alpha \geq 1$ – постоянная, $0 < \beta < 1$ – постоянная и $M[\theta_i] = \lambda > 0$, $M[\theta_j] = \mu > 0$. Также предположим, что c_1 – стоимость восстановления в единицу времени, c_2 – стоимость замены.

Процесс восстановления можно записать в виде $\{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots\}$, где T_i – время i -й замены. Средняя стоимость работы в единицу времени $c[\Delta(T, N)]$ при правиле замены Δ будет определяться отношением ожидаемой стоимости цикла работ к ожидаемой длине цикла L , определяемой следующим образом:

$$L = \left(T + \sum_{i=1}^R Q_i \right) \lambda(X_n > T) + \left(\sum_{j=1}^N \theta_j + \sum_{i=1}^{N-1} Q_i \right) \lambda(X_n \leq T), \quad (8)$$

где $X_n = \sum_{j=1}^N \theta_j$ – время безотказной работы; $X_n = \sum_{i=1}^N Q_i$ – время восстановления аппаратуры; $N \geq 1$, R – число отказов до момента времени T ;
 $R = 0, 1, 2, \dots, N-1$; λ – функция отображения,

$$\lambda = \begin{cases} 1, \text{ если } L = T + \sum_{j=1}^R Q_j, \\ 0, \text{ если } L = \sum_{j=1}^N \theta_j + \sum_{i=1}^{N-1} Q_i. \end{cases}$$

После ряда несложных преобразований определим математическое ожидание величины L :

$$\begin{aligned} M[L] &= M \left\{ \left[T + \sum_{i=1}^R Q_i \right] \lambda(X_n > T) + \left(\sum_{j=1}^N \theta_j + \sum_{i=1}^{N-1} Q_i \right) \lambda(X_n \leq T) \right\} = \\ &= \int_0^T \bar{F}_N(x) dx + \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \sum_{i=1}^{N-1} F_i(T) + \frac{\mu}{\beta^{i+1}} \sum_{i=1}^{N-1} [\lambda(X_i < T < X_j)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Пусть $L_{N+1} = \sum_{j=i+1}^N Q_j$ – длина цикла функционирования с j до N отказа; $X_N = X_i + L_{N-1}$ – время безотказной работы средства РТОП и ЭС.

Тогда $G_{N-1}(\varepsilon) = \int_0^\infty G_{N-1-i}[\alpha(\varepsilon - q)] dG(q)$ – распределение L_{N-1} ;

$G_{N-1+i}[\alpha(\varepsilon - q)]$ – ФПР $\sum_{j=i+2}^N Q_j$ в момент $(\varepsilon - q)$;

$G(q) = F(\beta^i, q)$ – ФПР Q_{i+1} .

Поскольку $G(v) = F(\alpha^i, v)$, то $G_{N-1}(\varepsilon) = F_{N-1}(\alpha^i, \varepsilon)$, то выражение для вероятности того, что время наработки после i -го отказа превзойдет T , запишется в виде

$$\begin{aligned} M[\lambda(X_i < T < X_j)] &= P(X_i < T < X_j + L_{N-1}) = \\ &= \int_0^T \int_{T-x}^\infty dG_{N-1}(\varepsilon) df_i(x) = \int_0^T F_{N-1}[\alpha(T-x)] dF(x). \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) примет вид

$$M[L] = \int_0^T F_N(x) dx + \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \sum_{i=1}^{N-1} F_N(T) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \int_0^T F_{N-1}[\alpha(T-x)] dF(x). \quad (11)$$

Далее с учетом принятых предпосылок получим

$$C[\Delta(T, N)] = \frac{C_1 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} F_N(T) + \sum_{i=1}^{N-1} \int_0^T \bar{F}_{N-1}[\alpha^i(T-x)] dF_i(x) + C_3 - C_2 \int_0^T \bar{F}_N(x) dx}{\int_0^T F_N(x) dx + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} F_N(T) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \int_0^T \bar{F}_{N-1}[\alpha^i(T-x)] dF(x)}. \quad (12)$$

Выражение (12) легко проанализировать при фиксации одного из аргументов. Предположим, что $N = r$, тогда $C[\Delta(T, N)] = C_r(T)$, $r = 1, 2, \dots$. Исследуя (12) на экстремум при различных $N = 1, 2, \dots, r, \dots$, можно найти $T_{1,opt}, T_{2,opt}, \dots, T_{r,opt}, \dots$ такие, при которых $C_1(T_{1,opt}), C_2(T_{2,opt}), \dots, C_r(T_{r,opt}), \dots$ будут минимальными.

Результаты исследования

Тогда двумерное оптимальное правило замены, аналогичное исследуемому в работе [6], запишется в виде

$$\{\Delta(T, N)\}_{opt.} = \min N[C_n(T_{n,opt})]. \quad (13)$$

Однако мы попытаемся проанализировать процесс (13) в расширенном виде:

$$\{\Delta(T, N)\} \rightarrow \min C(T_{n,opt}). \quad (14)$$

В предположении, что интервал времени между двумя последовательными заменами является циклом восстановления [20], запишем

$$C(T_n, N) = C_{\text{ц}}/L,$$

где $C_{\text{ц}}$ – ожидаемая стоимость цикла работ, имеющего длину L ;

$$L = \left(T + \sum_{i=1}^k C_i\right) \chi(\theta_N \geq T) + \left(\sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N C_i\right) \chi(Q_n \leq T), \quad N \geq 1, \quad (15)$$

где k – число отказов до момента времени T в случае, когда $\theta_N > T$, $k = \overline{0, N-1}$; $\chi(A)$ – индикатор события A , $\chi(A) = 1, \chi(\bar{A}) = 0$.

Тогда после несложных преобразований можно записать выражение для математического ожидания длины цикла:

$$M[L] = \int_0^T \bar{F}_n(v) dv + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} F_N(T) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} M\{\chi(\Theta_i < T < \Theta_N)\}. \quad (16)$$

При этом

$$G_{N-1}(t) = \int_0^\infty G_{N+1}[\alpha(1-y)dG(y)], \quad (17)$$

где $G_{N-1}[\alpha(1-y)]$ – ФРВ $\sum_{j=i+2}^N x_j$, $Q G(y) = F(\beta^i y)$ – ФРВ Y_{i+1} .

Тогда вероятность того, что время наработки после i -го отказа превысит значение T , определится из уравнения

$$\begin{aligned} M[\chi(\Theta_i < T < \Theta_N)] &= \\ &= P[\Theta_i < T < (\Theta_i + L_{N+i})] = \int_0^T F_{N-i}[\alpha^i(T-v)dF_i(v)]. \end{aligned} \quad (18)$$

С учетом (18) получаем

$$M(L) = \int_0^T F_N(v) dv + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i+1}} \int_0^T F_{N-1}[\alpha^i(T-v)dF_i(v)].$$

Окончательно из (14) и (16) для средней стоимости работ имеем двумерную функцию следующего вида:

$$C(T_H, N) = \frac{C_1 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \int_0^T \bar{F}_N[\alpha^i(T-v)] dF_i(v) + C_2 - C_1 \int_0^T \bar{F}_N(v) dv}{\int_0^T \bar{F}_N(v) dv + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} F_N(T) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu}{\beta^{i-1}} \int_0^T \bar{F}_N[\alpha^i(T-v)] dF_i(v)}. \quad (19)$$

При фиксированном значении числа отказов $N = h$, $h = 1, 2, \dots$ несложно определить $C_h(C_{Hh}^*)$.

Обсуждение полученных результатов

Ввиду того что жизненный цикл любого средства ограничен, существует минимальная средняя стоимость работы в единицу времени, которую можно определить с помощью ряда $\{C_1(C_{H1}^*), C_2(C_{H2}^*), \dots, C_h(C_{Hh}^*)\}$, откуда получить правило предупредительной замены

$$C[\Delta(T_H, N)^*] = \min_N C_n(T_{Hn}^*). \quad (20)$$

Соотношение (20) можно пояснить следующим образом: выражение (19), представляющее собой двумерную функцию, несложно проанализировать при фиксации одного из аргументов. Пусть $N = r$, тогда $C(T_H, N) = C_r(T_H)$, $r = 1, 2, \dots$; исследуя (19) на экстремум при $N = 1, 2, \dots, r, \dots$, можно найти $T_{1opt}, T_{2opt}, \dots, T_{ropt}, \dots$ соответственно такими, чтобы $C_1(T_{1opt}), C_2(T_{2opt}), \dots, C_r(T_{ropt}), \dots$ были минимальными, что в свою очередь позволяет записать оптимальное правило замены в виде (20). Авторы считают необходимым отметить тот факт, что в работе [21] указана предпочтительность использования соотношения (20), чем соотношений вида $C(T_{opt})$ или $C(N_{opt})$.

Вышеизложенное позволяет авторам высказать предположение о корректности используемого метода условной вероятности характеристики, так как он приводит к результатам, аналогичным результатам в [16, 22, 23], представляемым как правило исчерпания ресурса и аналогичным результату, полученному в работе [24, 25] при выборе пра-

вил предупредительной замены элементов сложных систем.

Заключение

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы в следующих практических ситуациях:

- при разработке гибких алгоритмов проведения профилактических мероприятий по проведению технического обслуживания по состоянию;
- прогнозирования уровня эксплуатационных расходов;
- оценки показателей безотказности средств РТОП и ЭС для различных фазовых состояний их жизненного цикла.

Правда, при этом необходимо отметить тот факт, что решение указанной задачи требует априорного знания законов распределения времени безотказной работы и в дальнейшем статистических данных с выборкой необходимого объема.

Список литературы

1. Емельянов А.Е., Суханова Н.В. Повышение качества сетевого управления технологическими процессами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 646–652. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-646-652
2. Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Особенности диагностики технических систем с использованием мультиклассовой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2 (38). С. 45–52. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-5

3. **Щербаков М.В., Сай Ван К.** Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
4. **Юрков Н.К.** Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4 (36). С. 5–12. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-4-1
5. **Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф.** Эксплуатация авиационных систем по состоянию. М.: Транспорт, 1981. 197 с.
6. **Воробьев В.Г., Кузнецов С.В., Зыль В.П.** Основы теории технической эксплуатации пилотажно-навигационного оборудования. М.: Транспорт, 1999. 334 с.
7. **Емельянов В.Е., Логвин А.Н.** Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования. М.: МОРКНИГА, 2014. 730 с.
8. **Базилевский М.П.** Многофакторные модели полносвязной линейной регрессии без ограничений на соотношения дисперсий ошибок переменных // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14, № 2. С. 92–97. DOI: 10.14357/19922264200213
9. **Маслаков М.Л.** Вероятностные характеристики бестестовых методов адаптивной коррекции сигналов // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 2. С. 145–154. DOI: 10.31857/S0033849421020108
10. **Агаларов Я.М.** Оптимизация порогового управления переключением скорости обслуживания в системе массового обслуживания G/M/1 // Информатика и ее применения. 2022. Т. 16, № 1. С. 73–81. DOI: 10.14357/19922264220111
11. **Базилевский М.П.** Критерии нелинейности квазилинейных регрессионных моделей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4. С. 185–195. DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.015
12. **Вентцель А.Д., Овчаров Л.А.** Курс теории случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 383 с.
13. **Горбунов Ю.Н.** Повышение точности измерения временных интервалов радиоприема в рамках рекурсивных многоэтапных Байесовских оценок // РЭНСИТ. 2019. Т. 11, № 3. С. 291–298. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.291
14. **Босов А.В.** Управление линейным выходом марковской цепи по квадратичному критерию. Случай полной информации // Информатика и ее применения. 2022. Т. 16, № 2. С. 19–26. DOI: 10.14357/19922264220203
15. **Киселев В.В.** Метод нахождения недоминируемых решений в задачах декомпозиции моделей сложных систем // Математическое моделирование и численные методы. 2022. № 1 (33). С. 129–140. DOI: 10.18698/2309-3684-2022-1-129140
16. **Барзилович Е.Ю.** Стохастические модели принятия оптимальных решений в экономических исследованиях. М.: МРЦОН Госатомнадзора России, 1999. 452 с.
17. **Каракеев Т.Т., Кугубаева Ж.Т.** Регуляризация линейных интегральных уравнений Вольтерра третьего рода с оператором умножения на неубывающую функцию // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020. № 21. С. 39–44. DOI: 10.26160/2474-5901-2020-21-39-44
18. **Корыпаева Ю.В., Алейникова Н.А., Красова Н.Е.** Анализ математической модели надежности ответственного узла радиотехнического устройства при наличии резервных блоков в случае опасности короткого замыкания [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 1 (28). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.009 (дата обращения: 10.08.2022).
19. **Попков А.С.** Построение множеств достижимости и управляемости в специальной линейной задаче управления // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17, № 3. С. 294–308. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.307
20. **Аргучинцев А.В., Срочко В.А.** Процедура регуляризации билинейных задач оптимального управления на основе конечномерной модели // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17, № 3. С. 309–324. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.308

бургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18, № 1. С. 179–187. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2022.115

21. **Yuan L.Z.** A discussion on "A bivariate optimal replacement policy for a repairable system" // *European Journal of Operational Research*. 2007. Iss. 1. Pp. 275–276. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.03.035

22. **Барышников А.В.** Методика оптимизации предупредительных замен в задаче планирования производственного цикла ремонтного предприятия / А.В. Барышников, А. Чернявский, В. Борщ, А. Моисеев [Электронный ресурс] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. DOI: 10.7463/0813.0615305 (дата обращения: 18.11.2022).

23. **Секретарев Ю.А., Левин В.М.** Риск-ориентированные модели управления ремонтом оборудования в системах электроснабжения с монопотребителем // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2021. Т. 14, № 1. С. 17–32. DOI: 10.17516/1999-494X-0295

24. **Белов В.Ф.** Моделирование среды предприятия с использованием дискретных вычислительных алгоритмов / В.Ф. Белов, С.С. Гаврюшин, Ю.Н. Маркова, А.И. Занкин // *Математическое моделирование и численные методы*. 2022. № 1 (33). С. 109–128. DOI: 10.18698/2309-3684-2022-1-109128

25. **Stadje W., Zuckerman D.** Optimal strategies for some repair replacement models // *Advances in Applied Probability*. 1990. Vol. 22, no. 3. Pp. 641–656. DOI: 10.2307/1427462

References

1. **Emelyanov, A.E., Sukhanova, N.V.** (2021). Improving the quality of network management of technological processes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 21, no. 5, pp. 646–652. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-646-652 (in Russian)

2. **Klyachkin, V.N., Karpunina, I.N.** (2022). Features of diagnostics of technical sys-

tems using multiclass classification. *Reliability & Quality of Complex Systems*, no. 2 (38), pp. 45–52. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-5 (in Russian)

3. **Shcherbakov, M.V., Sai Van, C.** (2020). Architecture of predictive maintenance system of complex multi-object systems in industry 4.0 concept. *Software & Systems*, no. 2, pp. 186–194. (in Russian)

4. **Yurkov, N.K.** (2021). The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Reliability & Quality of Complex Systems*, no. 4 (36), pp. 5–12. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-4-1 (in Russian)

5. **Barzilovich, Ye.Yu., Voskoboyev, V.F.** (1981). Aircraft systems operation by condition. Moscow: Transport, 197 p. (in Russian)

6. **Vorobyev, V.G., Kuznetsov, S.V., Zyl, V.P.** (1999). Fundamentals of the theory of technical operation of flight and navigation equipment. Moscow: Transport, 334 p. (in Russian)

7. **Emelyanov, V.E., Logvin, A.N.** (2014). Technical operation of aviation radio-electronic equipment. Moscow: MORKNIGA, 730 p. (in Russian)

8. **Bazilevskiy, M.P.** (2020). Multifactor fully connected linear regression models without constraints to the ratios of variables errors variances. *Informatics and Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 92–97. DOI: 10.14357/19922264200213 (in Russian)

9. **Maslakov, M.L.** (2021). Probabilistic characteristics of non-test adaptive signal correction methods. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 145–154. DOI: 10.31857/S0033849421020108

10. **Agalarov, Ya.M.** (2022). Optimization of the threshold service speed control in the G/M/L queue. *Informatics and Applications*, vol. 16, no. 1, pp. 73–81. DOI: 10.14357/19922264220111 (in Russian)

11. **Bazilevskiy, M.P.** (2018). Nonlinear criteria of quasilinear regression models. Modeling, *Optimization and Information Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 185–195. DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.015 (in Russian)

12. **Venttsel, A.D., Ovcharov, L.A.** (1991). The course on the theory of random processes and its engineering applications. Moscow: Nauka, 383 p. (in Russian)
13. **Gorbunov, Yu.N.** (2019). Improving the accuracy of measurement time intervals of radio reception in the framework of recursive multi-stage Bayesian estimates. *RENSIT*, vol. 11, no. 3, pp. 291–298. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.291 (in Russian)
14. **Bosov, A.V.** (2022). Linear output control of Markov chain by square criterion. Complete information case. *Informatics and Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 19–26. DOI: 10.14357/19922264220203 (in Russian)
15. **Kiselev, V.V.** (2022). Method of finding non-dominant solutions in decomposition problems. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, no. 1 (33), pp. 129–140. DOI: 10.18698/2309-3684-2022-1-129140 (in Russian)
16. **Barzilovich, Ye.Yu.** (1999). Stochastic models for making optimal decisions in economic research. Moscow: MRTSON Gosatomnadzora Rossii, 452 p. (in Russian)
17. **Karakeyev, T.T., Kugubayeva, Zh.T.** (2020). Regularization of Volterra linear integral equations of the third kind with the multiplication operator to non-decreasing function. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, no. 21, pp. 39–44. DOI: 10.26160/2474-5901-2020-21-33-38 (in Russian)
18. **Korypayeva, Yu.V., Aleynikova, N.A., Krasova, N.Ye.** (2020). Analysis of mathematical model of reliability of the responsible node of the radio engineering device in the presence of reserve blocks in case of danger of short circuit. *Modeling, Optimization and Information Technology*, vol. 8, no. 1. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.009 (accessed: 10.08.2022). (in Russian)
19. **Popkov, A.S.** (2021). Construction of reachability and controllability sets in a special linear control problem. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, vol. 17, no. 3, pp. 294–308. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.307 (in Russian)
20. **Arguchintsev, A.V., Srochko, V.A.** (2022). Procedure for regularization of bilinear optimal control problems based on a nite-dimensional model. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, vol. 18, no. 1, pp. 179–187. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2022.115 (in Russian)
21. **Yuan, L.Z.** (2007). A discussion on “A bivariate optimal replacement policy for a repairable system”. *European Journal of Operational Research*, issue 1, pp. 275–276. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.03.035
22. **Baryshnikov, A.V., Chernyavskiy, A., Borshch, V., Moiseyev, A.** (2013). Optimization technique of preventive replacements in the task of planning the repairer's production cycle. *Scientific Periodical of the Bauman MSTU Science and Education*, no. 8. DOI: 10.7463/0813.0615305 (accessed: 18.11.2022). (in Russian)
23. **Sekretarev, Yu.A., Levin, V.M.** (2021). Risk-based models of equipment repair management in power supply systems with a mono consumer. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, vol. 14, no. 1, pp. 17–32. DOI: 10.17516/1999-494X-0295 (in Russian)
24. **Belov, V.F., Gavriushin, S.S., Markova, Y.N., Zankin, A.I.** (2022). Modelling of industrial environment with the help of discrete numerical algorithms. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, no. 1 (33), pp. 109–128. DOI: 10.18698/2309-3684-2022-1-109128 (in Russian)
25. **Stadje, W., Zuckerman, D.** (1990). Optimal strategies for some repair replacement models. *Advances in Applied Probability*, vol. 22, no. 3, pp. 641–656. DOI: 10.2307/1427462

Сведения об авторах

Емельянов Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, v.emelianov@mstuca.aero.

Матыюк Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, s.matiuk@mstuca.aero.

Information about the authors

Vladimir E. Emelyanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Radio Engineering and Information Security Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.emelianov@mstuca.aero.

Sergei P. Matiuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Radio Engineering and Information Security Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.matiuk@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	01.03.2023	Received	01.03.2023
Одобрена после рецензирования	12.04.2023	Approved after reviewing	12.04.2023
Принята в печать	20.07.2023	Accepted for publication	20.07.2023