

## РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 629.735

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-1(1)-131-139

Сергей Владов, Сергей Бойко, Алексей Городний,  
Яна Климова, Леонид Вершняк

### ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВЕРТОЛЕТА МИ-8МТВ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Эксплуатация вертолёта Ми-8МТВ продолжается не только в Украине, но и в других странах мира. Таким образом, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы двигателя вертолёта Ми-8МТВ.

*Постановка проблемы.* Исходя из того, что за последние десятилетия количество аварий вертолёта Ми-8МТВ составило не один десяток, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы двигателя.

*Анализ последних исследований и публикаций.* Проблематикой диагностики авиационной техники в Украине занимаются ученые из Национального авиационного университета, работы которых состоят в оптимизации процессов ее технического обслуживания с помощью информационно-управляющих систем, но в их работах вопросы исследования процессов авиационных двигателей рассматриваются поверхностно.

*Постановка задачи.* Разработка математической модели исследования основных режимов работы двигателя вертолёта Ми-8МТВ при его эксплуатации в реальных режимах работы, то есть определение времени переходов из одного режима работы двигателя в другой, что позволит разработать информационно-управляющую систему диагностики и прогнозирования состояния двигателя вертолёта Ми-8МТВ.

*Изложение основного материала.* Проведён анализ особенностей эксплуатации и возможных режимов работы авиационного двигателя вертолёта Ми-8МТВ. Обоснована необходимость применения марковского процесса для контроля состояния авиационных двигателей. Разработано и предложено для дальнейшей реализации математическую модель определения и описания состояния авиационных двигателей.

*Выводы в соответствии со статьёй.* Полученные уравнения описания отказа одного из двигателей показывают, что значение  $\varphi$  зависит от интенсивности появления события, несмотря на тип процесса, что позволит применить стандартные методы построения алгоритма определения непрерывного марковского процесса при имитации работы двигателя вертолёта Ми-8МТВ.

*Ключевые слова:* система контроля состояния; авиационный двигатель вертолёта МИ-8МТВ; марковский процесс.

Рис.: 1. Библ.: 10.

**Постановка проблемы.** Исходя из того, что за последние десятилетия количество аварий вертолёта Ми-8МТВ составило не один десяток, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы двигателя. В настоящее время проблематикой диагностики авиационной техники в Украине занимаются ученые из Национального авиационного университета, основные работы которых состоят в оптимизации процессов ее технического обслуживания с помощью информационно-управляющих систем [1–3]. Однако в их работах не затрагиваются вопросы исследования процессов авиационных двигателей, учет изменения которых может сказать существенное влияние на повышение качества диагностики авиационной техники.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время проблематикой диагностики авиационной техники в Украине занимаются ученые из Национального авиационного университета, основные работы которых состоят в оптимизации процессов ее технического обслуживания с помощью информационно-управляющих систем [1–4]. Однако в их работах вопросы исследования процессов авиационных двигателей рассматриваются поверхностно, при этом, учет изменения состояния которых может существенно повлиять на повышение качества диагностики авиационной техники.

**Определение неисследованных частей общей проблемы.** Таким образом, актуальной научно-практической задачей является диагностика и прогнозирование изменений состояния работы двигателя вертолёта Ми-8МТВ.

**Цель статьи.** Главной целью этой работы есть разработка математической модели исследования основных режимов работы авиационного двигателя вертолета Ми-8МТВ при его эксплуатации в реальных режимах работы, то есть определение времени переходов из одного режима работы двигателя в другой всех возможных вариантах, что позволит разработать информационно-управляющую систему диагностики и прогнозирования состояния двигателя вертолета Ми-8МТВ.

**Изложение основного материала.** Учитывая тот факт, что вертолет Ми-8МТВ имеет два двигателя, считается, что вертолет Ми-8МТВ – система, имеющая надежную работу ( $P \geq 0,9$ ), которая состоит из  $i$  единиц двигателей. Пусть случайное время работы одного двигателя имеет положительное распределение вероятности и не зависит от состояния других единиц двигателей [4, 5]. В более общей математической модели работы системы, состоящей из  $i$  единиц, в которой учитывается взаимосвязь между единицами двигателей, можно считать [5], что показательное распределение имеет случайное время  $\tau_i$  совместной работы к выходу из строя одного из имеющихся единиц двигателей, то есть:

$$P\{\tau_i \leq t\} = 1 - e^{-\varphi_i t}; \tag{1}$$

где  $\varphi_0 = 0, \varphi_i > 0$  при  $i = 1, 2, \dots$

Пусть в общем случае  $P_{ij}(t)$  – вероятность наличия в момент времени  $t$  работоспособных  $j$  единиц двигателей, при условии, что в начальный момент времени  $t = 0$  было  $i$  единиц работоспособных двигателей. Первым шагом задачи диагностики и прогнозирования вероятности отказа одного из двигателей вертолета Ми-8МТВ является получение уравнения для переходных вероятностей отказа одного из двигателей вертолета Ми-8МТВ.

Разрабатываемой математической моделью является марковский процесс отказа одного из двигателей вертолета Ми-8МТВ  $\xi_t, t \in [0, \infty)$ , на множестве состояний  $N = 0, 1, 2, \dots$ , в котором переходные вероятности  $P_{ij}(t) = P\{\xi_t = j \mid \xi_0 = i\}, i, j \in N$  представлены при  $t \rightarrow 0+$  в виде [5]:

$$P_{i,i-1}(t) = \varphi_i t + o(t); \tag{2}$$

$$P_{ii}(t) = 1 - \varphi_i t + o(t). \tag{3}$$

Скачки процесса простого изменения состояний работы двигателя  $\xi_t$  представлены на рис. 1. Пусть при  $t = 0$  процесс находится в начальном состоянии  $i$ . В момент времени  $\tau_i$   $P\{\tau_i \leq t\} = 1 - e^{-\varphi_i t}$  происходит переход процесса в состояние  $i - 1$  и так далее.

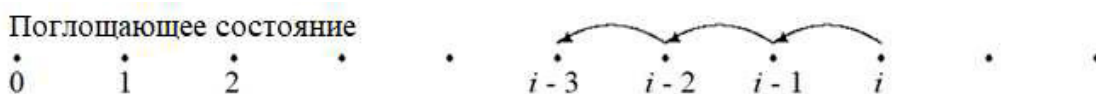


Рис. 1. График изменения состояния двигателя вертолета Ми-8МТВ

Первая (обратная) система дифференциальных уравнений Колмогорова для переходных вероятностей в случае процесса перехода двигателя вертолета Ми-8МТВ из одного состояния в другое имеет вид [5]:

$$\frac{dP_{oj}(t)}{dt} = -\varphi_0 P_{oj}(t); \tag{4}$$

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \varphi_i P_{i-1,j}(t) - \varphi_i P_{ij}(t); \tag{5}$$

где  $i = 1, 2, \dots$  с начальными условиями  $P_{ii}(0) = 1, P_{ij}(0) = 0$  при  $i \neq j$ .

Применив оператор обобщенной производной [5], определенный на аналитических в окрестности нуля функциях, получим:

$$f(s) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j s^j; \quad (6)$$

$$D_s(f) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j \varphi_j s^{j-1}. \quad (7)$$

Свертывая систему с помощью производящей функции переходных вероятностей

$$G_j(t; z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} P_{ij}(t); \quad (8)$$

при  $j \in N$ , имеем цепочку равенств в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dG_j}{dt} &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{i-1,j}(t)}{dt} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \\ &= z \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^{i-1}}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{i-1,j}(t)}{dt} - z \sum_{i=1}^{\infty} \frac{z^{i-1}}{\varphi_1 \dots \varphi_{i-1}} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} = zG_j - zD_z(G_j) = z(1 - D_z)G_j. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, первая система дифференциальных уравнений получает вид:

$$\frac{dG_j(t; z)}{dt} = z(1 - D_z)G_j(t; z) \quad (10)$$

с начальным условием  $G_j(0; z) = \frac{z^j}{\varphi_1 \dots \varphi_j}$ .

Вторая (прямая) система дифференциальных уравнений Колмогорова для переходных вероятностей в случае изменения состояния работы двигателя вертолета Ми-8МТВ имеет вид [5]:

$$\frac{dP_{i0}(t)}{dt} = -P_{i0}(t)\varphi_0 + P_{i1}(t)\varphi_1; \quad (11)$$

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = -P_{ij}(t)\varphi_j + P_{ij+1}(t)\varphi_{j+1}; \quad (12)$$

где  $j = 1, 2, \dots$  с начальными условиями  $P_{ii}(0) = 1, P_{ij}(0) = 0$  при  $i \neq j$ .

Свертывая систему с помощью производящей функции переходных вероятностей

$$F_i(t; s) = \sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t) s^j; \quad (13)$$

при  $j \in N, |s| \leq 1$ , имеем цепочку равенств в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dt} &= \sum_{j=0}^{\infty} \frac{dP_{ij}(t)}{dt} s^j = -\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t)\varphi_j s^j + \sum_{j=0}^{\infty} P_{i,j+1}(t)\varphi_{j+1} s^j = -s \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij}(t)\varphi_j s^{j-1} + \\ &+ \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij}(t)\varphi_j s^{j-1} = -sD_s(F_i) + D_s(F_i) = -(s+1)D_s(F_i). \end{aligned} \quad (14)$$

Вторая система дифференциальных уравнений получает вид:

$$\frac{dF_i}{dt} = -(s+1)D_s(F_i) \quad (15)$$

с начальным условием  $F_i(0; s) = s^i$ .

Соответственно, двойная производящая функция

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} F_i(t; s) = \sum_{i,j=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i} P_{ij}(t) s^j = \sum_{i,j=0}^{\infty} G_j(t; z) s^j \quad (16)$$

удовлетворяет уравнениям:

$$\frac{dF}{dt} = z(1 - D_z)F; \quad (17)$$

$$\frac{dF}{dt} = (1 - s)D_s(F) \quad (18)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e(zs)$ .

Функция  $e(z)$ , определенная равенством [6]

$$e(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\varphi_1 \dots \varphi_i}; \quad (19)$$

является собственной функцией оператора обобщенной производной  $D_z$ , то есть:

$$D_z(e(z)) = e(z). \quad (20)$$

Применим известные выражения переходных вероятностей [5] для математического описания процесса полного отказа двигателя вертолета Ми-8МТВ:

$$P_{ij}(t) = \varphi_i \dots \varphi_{j+1} \sum_{n=j}^i \frac{e^{-\varphi_n t}}{(\varphi_1 - \varphi_n)(\varphi_{n+1} - \varphi_n)(\varphi_{n-1} - \varphi_n) \dots (\varphi_j - \varphi_n)}; \quad (21)$$

при  $j < i$ , применив которые, легко получить решения уравнений (17) и (18) в виде ряда с разделенными переменными:

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\varphi_1 \dots \varphi_i} \overline{C}_n(z) C_n(s) e^{-\varphi_n t}; \quad (22)$$

где

$$\overline{C}_n(z) = z^n + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^{n+k}}{(\varphi_{n+1} - \varphi_n) \dots (\varphi_{n+k} - \varphi_n)}; \quad (23)$$

$$C_n(s) = s^n + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\varphi_{k+1} \dots \varphi_n}{(\varphi_k - \varphi_n) \dots (\varphi_{n-1} - \varphi_n)}. \quad (24)$$

При  $\varphi_{i+1} > \varphi_i$ ,  $i \in N$ , и  $\lim_{i \rightarrow \infty} \varphi_i = \infty$  ряд (22) абсолютно сходится при любых значениях  $z$ ,  $|s| < 1$  и  $t \in [0, \infty)$ . При  $t = 0$  получаем разложение обобщенной экспоненты (3.19):

$$e(zs) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\varphi_1 \dots \varphi_n} \overline{C}_n(z) C_n(s). \quad (25)$$

Для процесса отказа двигателя как функции линейного типа, когда  $(\lambda > 0)$ , то есть  $\varphi_i = i\lambda$ , оператор обобщенной производной совпадает с обычной производной и имеет вид:

$$D_z \lambda = \frac{d}{ds}. \quad (26)$$

В результате уравнения (17) и (18) принимают вид:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z \left( 1 - \frac{d^2 F}{dz^2} \right); \quad (27)$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda(1-s) \frac{dF}{ds}; \quad (28)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ . Тогда выражения (22) и (25) принимают вид:

$$F(t; z; s) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{\lambda}\right)^i}{i!} e^{\frac{z}{\lambda}} (s-1)^i e^{-\lambda t}; \quad (29)$$

$$e(zs) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} e^z (s-1)^n. \quad (30)$$

Суммируя ряд (29), приходим к замкнутому выражению для двойной производящей функции

$$F(t; z; s) = e^{\frac{z}{\lambda}(1+(s-1)e^{-\lambda t})}. \quad (31)$$

Отсюда и из определения  $F(t; z, s)$  получаем:

$$F_i(t; s) = (1 - e^{-\lambda t} + se^{-\lambda t})^i; \quad (32)$$

при  $i \in N$ .

Соотношение (32) означает, что случайные времена работы каждого из имеющихся  $i$  единиц двигателей не зависят друг от друга; такое свойство независимости имеет место только для процесса линейного типа.

Для приложений в математической теории надежности [4, 5] представляет интерес нахождение аналогичного (32) замкнутого интегрального представления для производящей функции  $F_i(t; s)$ , как решения уравнений Колмогорова (17) и (18) для процесса отказа одного из двигателей (путем суммирования ряда Фурье (22)), при частных предположениях о функции  $\varphi_i = \varphi(i)$  [7–10].

В случае процесса квадратичного типа полагается, что

$$\varphi_i = i(i-1)\lambda. \quad (33)$$

Тогда при

$$D_s = \lambda s \frac{d^2}{ds^2}; \quad (34)$$

имеем систему уравнений:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z^2 \left( \frac{dF}{dz} - \frac{d^2 F}{dz^2} \right); \quad (35)$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda (s - s^2) \frac{d^2 F}{ds^2}; \quad (36)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ .

В случае процесса полиномиального типа полагают

$$\varphi_i = i(i-1)\dots(i-k+1)\lambda; \quad (37)$$

где  $k = 3, 4, \dots$

Тогда

$$\frac{dF}{dt} = \lambda z^k \left( \frac{d^{k-1} F}{dz^{k-1}} - \frac{d^k F}{dz^k} \right); \quad (38)$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda (s^{k-1} - s^k) \frac{d^k F}{ds^k}; \quad (39)$$

с начальным условием  $F(0; z; s) = e^{zs}$ .

Замечание. Поскольку вертолет Ми-8МТВ имеет два двигателя ТВЗ-117, то процесс полиномиального типа сводится процессу квадратичного типа вследствие того, что показатель степени  $k$  может принимать лишь значение 2 [5].

В случае процесса степенного типа полагается, что:

$$\varphi_i = i^\rho \lambda; \quad (40)$$

где  $0 < \rho < 1$ .

В случае процесса пуассоновского типа полагается, что

$$\varphi_0 = 0; \varphi_i = \lambda; \quad (41)$$

где  $i = 1, 2, \dots$ ,  
тогда

$$D_s(f) = \lambda \frac{f(s) - f(0)}{s}. \quad (42)$$

**Выводы и предложения.** Таким образом, полученные уравнения описания отказа одного из двигателей показывают, что значение  $\varphi_i$  зависит от интенсивности появления события  $\lambda$ , несмотря на тип процесса (квадратичный, полиномиальный, степенной или пуассоновский), что позволит применить стандартные методы построения алгоритма определения непрерывного марковского процесса при имитации работы двигателя вертолета Ми-8МТВ.

#### Список использованных источников

1. *Інформаційні технології забезпечення конструктивно-експлуатаційних властивостей повітряних суден та авіаційних двигунів* / С. О. Дмитрієв, О. В. Попов, Д. В. Попов, Г. О. Арістов // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 67–72.
2. *Формування програм технічного обслуговування авіаційних двигунів* / С. О. Дмитрієв, В. І. Бурлаков, О. В. Попов, Д. В. Попов // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2013. – № 7 (104). – С. 190–194.
3. *Формалізація процедур та визначення оптимальних програм технічного обслуговування повітряних суден та авіаційних двигунів* / С. О. Дмитрієв, В. І. Бурлаков, О. В. Попов, Д. В. Попов // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2014. – № 9 (116). – С. 177–181.
4. *Деревянко И. Г.* Конструкция и эксплуатация вертолета Ми-8МТВ-1 / И. Г. Деревянко. – Кременчуг : КЛК НАУ, 2011. – 142 с.
5. *Острейковский В. А.* Теория надежности / В. А. Острейковский. – М. : Абрис, 2012. – 463 с.
6. *Тимонин В. И.* Точные распределения статистик типа Колмогорова-Смирнова, применяемых для анализа остаточной надежности резервированных систем / В. И. Тимонин, М. А. Ермолаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Вып. 10. – С. 66–72.
7. *Калинкин А. В.* Уравнения марковского процесса гибели в математической теории надежности [Электронный ресурс] / А. В. Калинкин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 14. – Режим доступа : <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1150.html>.
8. *Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost* / Denisov Y. O., Stepenko S. A., Gorodny A. N., Kravchenko V. A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2014. – P. 393–397.
9. *Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit* / Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2016. – P. 327–332.
10. *Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies* / Gorodny O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. – P. 232–235.

## References

1. Dmitriev, S. O., Popov, O. V., Popov, D. V. & Aristov, G. O. (2015). Informatsiini tekhnolohii zabezpechennia konstruktyvno-eksploatatsiinykh vlastyvoستي povitrianykh suden ta aviatsiinykh dvyhunyiv [Information technologies for maintenance of structural and operational properties of flying ships and aviation engines]. *Vestnik dvigatelestroeniia – Herald of engine building*, 2, 67–72 [in Ukrainian].
2. Dmitriev, S. O., Burlakov, V. I., Popov, O. V. & Popov, D. V. (2013). Formuvannia program tehničnogo obsluhovuvannia aviatsiinykh dvyhunyiv [Formation of aviation engine maintenance programs]. *Aviatsionno-kosmicheskaia tehnika i tehnologii – Aerospace Engineering and Technology*, 7 (104), 190–194 [in Ukrainian].
3. Dmitriev, S. O., Burlakov, V. I., Popov, O. V. & Popov, D. V. (2013). Formalizatsiia procedur ta vyznachennia optymalnykh program tehničnogo obsluhovuvannia povitrianykh suden ta aviatsiinykh dvyhunyiv [Formalization of procedures and definition of optimal maintenance programs for aircraft and aviation engines]. *Aviatsionno-kosmicheskaia tehnika i tehnologii – Aerospace Engineering and Technology*, 9 (116), 177–181 [in Ukrainian].
4. Derevianko, I. G. (2011). *Konstrukttsiia i eksploatatsiia vertoleta Mi-8MTV-1 [The design and operation of the Mi-8MTV-1 helicopter]*. Kremenčug: KLK NAU [in Russian].
5. Ostreikovskii, V. A. (2012). *Teoriia nadezhnosti [Theory of reliability]*. Moscow: Arbis [in Russian].
6. Timonin, V. I. & Ermolaeva, M. A. (2012). Tochnye raspredeleniia statistik tipa Kolmogorova-Smirnova, primeniaemykh dlia analiza ostatochnoi nadezhnosti rezervirovannykh sistem [Exact distributions of Kolmogorov-Smirnov statistics used to analyze the residual reliability of redundant systems]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy – Electromagnetic waves and electronic systems*, 10, 67–72 [in Russian].
7. Kalinkin, A. V. (2013). *Uravneniia markovskogo protsessa gibeli v matematicheskoi teorii nadezhnosti [Equations of the Markov process of decay in the mathematical theory of reliability]*. Retrieved from <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1150.html>.
8. Denisov, Y. O., Stepenko, S. A., Gorodny, A. N. & Kravchenko, V. A. (2014). *Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost*, International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE [in English].
9. Denisov, Y., Gorodny, A., Gordienko, V., Yershov, R., Stepenko, S., Kostyrieva, O., Prokhorova, A. (2016). *Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit*, International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE [in English].
10. Gorodny, O., Gordienko, V., Stepenko, S., Boyko, S. & Sereda, O. (2017). *Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies, Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* [in English].

UDC 629.735

*Serhii Vladov, Serhii Boiko, Oleksiy Gorodny, Iana Klimova, Leonid Vershniak*

## APPLICATION OF THE MARKOV PROCESS EQUATIONS WITH DIAGNOSTIC OF THE STATE OF THE MI-8MTV HELICOPTER AIRCRAFT AT ITS OPERATION IN REAL OPERATION MODES

**Urgency of the research.** Operation of the Mi-8MTV helicopter continues not only in Ukraine, but also in other countries of the world. Thus, the actual scientific and practical task is to diagnose and predict the changes in the operating state of the Mi-8MTV helicopter engine.

**Target setting.** Proceeding from the fact that during the last decades the number of accidents of the Mi-8MTV helicopter amounted to several tens, an actual scientific and practical task is diagnostics and prediction of changes in the state of engine operation.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The problems of aircraft engineering diagnostics in Ukraine are dealt with by scientists from the National Aviation University, whose work consists in optimizing the processes of its maintenance with the help of information and control systems, but in their works the issues of studying the processes of aircraft engines are treated superficially.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The investigation of the main modes of operation of the Mi-8MTV helicopter engine during its operation in real operating modes, that is, the determination of the time of transitions from one mode of operation of the engine to another, which will enable the development of information management system for diagnosing and forecasting the state of the engine of the Mi-8MTV helicopter.

**The research objective.** Development of a mathematical model for studying the main modes of operation of the Mi-8MTV helicopter engine during its operation in real operating modes.

**The statement of basic materials.** The analysis of operation peculiarities and possible operating modes of the aircraft engine of the Mi-8MTV helicopter is carried out. The necessity of application of the Markov process for monitoring the state of aircraft engines is substantiated. A mathematical model for the definition and description of the state of aircraft engines has been developed and proposed for further implementation.

**Conclusions.** The resulting equations describing the failure of one of the engines show that the value of  $\varphi_i$  depends on the occurrence rate of the event, despite the type of process, which will allow us to apply standard methods for constructing an algorithm for determining the continuous Markov process when simulating the operation of the Mi-8MTV helicopter engine.

**Keywords:** state monitoring system; aircraft engine of the helicopter MI-8MTV; the markov process.

Fig.: 1. References: 10.

УДК 629.735

Сергій Владов, Сергій Бойко, Олексій Городній, Яна Клімова, Леонід Вериняк

## ЗАСТОСУВАННЯ РІВНЯНЬ МАРКІВСЬКОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ДІАГНОСТИЦІ СТАНУ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ГВИНТОКРИЛА МІ-8МТВ ПРИ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ В РЕАЛЬНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Експлуатація вертольота Мі-8МТВ триває не тільки в Україні, але й в інших країнах світу. Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є діагностика та прогнозування змін стану роботи двигуна вертольота Мі-8МТВ.

**Постановка проблеми.** З огляду на те, що за останні десятиліття кількість аварій вертольота Мі-8МТВ становило не один десяток, актуальним науково-практичним завданням є діагностика і прогнозування змін стану роботи двигуна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематикою діагностики авіаційної техніки в Україні займаються вчені з Національного авіаційного університету, роботи яких складаються в оптимізації процесів її технічного обслуговування за допомогою інформаційно-керуючих систем, але в їхній роботі питання дослідження процесів авіаційних двигунів розглядаються поверхово.

**Постановка завдання.** Розробка математичної моделі дослідження основних режимів роботи двигуна вертольота Мі-8МТВ при його експлуатації в реальних режимах роботи, тобто визначення часу переходів з одного режиму роботи двигуна в інший, що дозволить розробити інформаційно-керуючу систему діагностики та прогнозування стану двигуна вертольота Мі-8МТВ.

**Виклад основного матеріалу.** Проведено аналіз особливостей експлуатації і можливих режимів роботи авіаційного двигуна вертольота Мі-8МТВ. Обґрунтовано необхідність застосування марковського процесу для контролю стану авіаційних двигунів. Розроблено та запропоновано для подальшої реалізації математичну модель визначення й опису стану авіаційних двигунів.

**Висновки відповідно до статті.** Отримані рівняння опису відмови одного з двигунів показують, що значення  $\varphi_i$  залежить від інтенсивності появи події, незважаючи на тип процесу, що дозволить застосувати стандартні методи побудови алгоритму визначення безперервного марківського процесу при імітації роботи двигуна вертольота Мі-8МТВ.

**Ключові слова:** система контролю стану; авіаційний двигун гвинтокрила МІ-8МТВ; марківський процес.

Рис.: 1. Бібл.: 10.

**Владов Сергей Игоревич** – кандидат технических наук, заведующий учебно-методической лаборатории, преподаватель кафедры энергообеспечения и систем управления, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина).

**Владов Сергій Ігорович** – кандидат технічних наук, завідувач навчально-методичної лабораторії, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління, Кременчугський льотний колледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Vladov Serhii** – PhD in Technical Sciences, Head of Educational-Methodical Laboratory, teacher of the Department of Energy Supply and Management Systems, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** nml.nv.klknau@gmail.com

**Бойко Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, преподаватель кафедры энергообеспечения и систем управления, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина).

**Бойко Сергій Миколайович** – кандидат технічних наук, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління, Кременчугський льотний колледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Boiko Serhii** – PhD in Technical Sciences, teacher of the Department of Energy Supply and Management Systems, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** bsn1987@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202>



**Городний Алексей Николаевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Городній Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Gorodny Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

**Web of Science:** H-1425-2016

**Scopus:** ID 55327980200; ID 56338229500; ID 57191829796

**Климова Яна Руслановна** – преподаватель цикловой комиссии конструкции и эксплуатации воздушных судов и авиадвигателей, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина).

**Клімова Яна Русланівна** – викладач циклової комісії конструкції та експлуатації повітряних суден і авіадвигунів, Кременчугський льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Klimova Iana** – teacher of the Department of Design and Operation of Aircraft and Aircraft Engines, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** nml.nv.klknau@gmail.com

**Вершняк Леонид Владимирович** – аспирант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Вершняк Леонід Володимирович** – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Vershniak Leonid** – Phd student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** L\_Vershnyak@mail.ru