

В. И. Горшков, Д. С. Мирошниченко, А. А. Святкина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ДЕГРАДАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЕЙ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Интерес к оценке безотказности вентиляционных систем на стадии их разработки связан с перспективой прогнозирования отсутствия отказов в работе указанных систем в процессе эксплуатации. Рассматриваются стохастические ветвящиеся процессы, на основе которых разработана методика расчета показателей безотказности вентиляционных систем. Целью данной работы является сравнение результатов расчета, полученных по существующей и предлагаемой методикам, а также подтверждение адекватности предложенной методики. *Материалы и методы.* Сравнение существующей методики с предложенной показало, что первая не учитывает деградацию технических параметров сборочных единиц в течение времени эксплуатации, что является основным ее недостатком. Для доказательства адекватности разработанной методики была составлена структура вероятностных переходов Марковского стохастического ветвящегося процесса прогнозирования независимых отказов вентиляционной системы. *Результаты.* Сравнительный анализ среднего времени безотказной работы вентиляционной системы по указанным методикам показал, что существующая методика дает завышенные значения среднего времени безотказной работы на 13–24 %, а предлагаемая 4–5 %. *Выводы.* Предложенная методика расчета характеристик безотказности вентиляционных систем является более адекватной, позволяет учитывать деградацию элементов системы во времени и планировать сроки проведения технического обслуживания ее модулей.

Ключевые слова: вентиляционная система, независимые отказы, ветвящиеся процессы, дифференциальные уравнения, производящая функция, математическое ожидание, безотказность работы.

V. I. Gorshkov, D. S. Miroshnichenko, A. A. Svyatkina

MATHEMATICAL MODELING OF THE INDICATORS OF RELIABILITY OF VENTILATION SYSTEMS WITH REGARD TO THE DEGRADATION OF THE MODULE PARAMETERS

Abstract. *Background.* Interest in the assessment of reliability of ventilation systems at the stage of development thereof is connected with the prospect of predicting failure absence in these systems during operation. The article considers stochastic branching processes, which serve as a base for a method of calculation of reliability of ventilation systems. The aim of this work is to compare the calculation results obtained by the existing and the proposed procedures, as well as confirmation of the adequacy of the proposed method. *Materials and methods.* Comparison of the existing methods with the proposed ones showed that the first do not consider the degradation of the technical parameters of assembly units during the period of operation, which is a major drawback. To prove the adequacy of the developed methods the authors compiled a structure of probabilistic transitions of Markovski stochastic branching process of failure prediction for independent ventilation system. *Results.* Comparative analysis of the average time of failure-free operation of the ventilation system following the said techniques showed that the existing method gives overes-

timated values of the average time of failure-free operation of 13–24 %, whereas the suggested method's value is 4–5 %. *Conclusions.* The proposed method of calculating the reliability characteristics of ventilation systems is more appropriate, making it possible to take into account the degradation of system elements in time and plan the timing of maintenance of its modules.

Key words: ventilation system, independent failures, branching processes, differential equations, generating function, expectation, trouble-free operation

Расчет показателей безотказности вентиляционных систем на стадии разработки осуществляется на основе методов, учитывающих как внезапные так и постепенные отказы, предполагающие, что они подчиняются экспоненциальному закону распределения [1]. В общем случае вентиляционная система состоит из m модулей, которые состоят из сборочных единиц. Отказ системы происходит при отказе любой сборочной единицы и модуля в целом. В этом случае схема расчета показателей безотказности вентиляционной системы представляет собой m последовательно соединенных модулей. При экспоненциальном законе изменения вероятности безотказной работы вентиляционной системы $P(t) = \exp(-\lambda t)$, где t – время, интенсивность отказов вентиляционной системы λ и среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) T соответственно определяются [1] выражениями:

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{\varepsilon i}, \quad T = \left(\sum_{i=1}^m \lambda_{\varepsilon i} \right)^{-1},$$

где $\lambda_{\varepsilon i}$ – интенсивность отказов i -й сборочной единицы модуля. Основным недостатком существующей методики [1] заключается в том, что она не учитывает деградацию технических параметров сборочных единиц в течение времени эксплуатации. Неадекватность существующей методики особо проявляется при резком отличии значений интенсивностей отказов сборочных единиц, входящих в состав модулей вентиляционной системы. В реальных системах интенсивности отказов по своим значениям могут отличаться в 10 раз.

Отказ модулей вентиляционных систем происходит в результате изменения параметров сборочных единиц. В свою очередь безотказность вентиляционной системы зависит от технического состояния ее модулей, определяемого пятью категориями. Составим расчетную схему определения безотказности вентиляционной системы.

Для этого из m сборочных единиц системы сформируем 5 категорий, которые характеризуются определенным состоянием значений параметров элементов (рис. 1). С повышением категории увеличивается степень деградации элементов и их параметров. Количество элементов в категориях является случайной величиной $\mu_i(t) = m_i$ ($i = 1, 2, \dots, 4$).

Постепенный отказ элементов в расчетной схеме (рис. 1) моделируется следующим образом. За время Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) с вероятностью $p_{i,i+1}(\Delta t) = m_i \alpha_{i,i+1} \Delta t$ ($i = 1, 2, 3, 4$), где $\alpha_{i,i+1}$ – интенсивность переходов деградации, элемент i -й категории переходит в $(i+1)$ -ю категорию за счет деградации его параметров. При этом в i -й категории количество элементов уменьшается на единицу, а $(i+1)$ -й категории увеличивается на единицу.

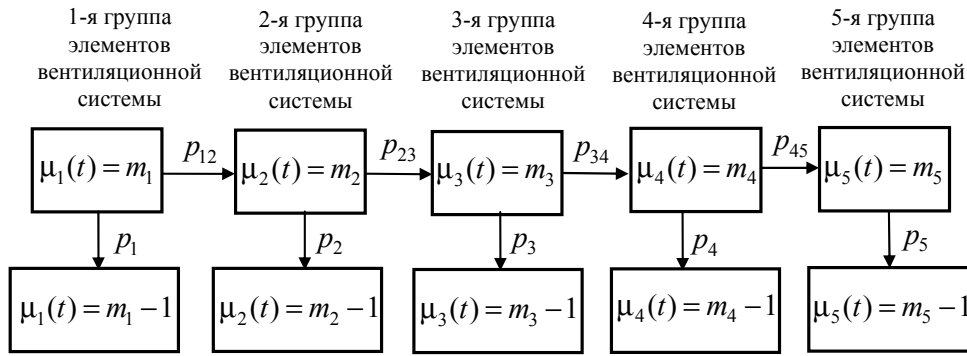


Рис. 1. Расчетная схема прогнозирования независимых отказов вентиляционной системы

Внезапный отказ элементов в расчетной схеме (рис. 1) моделируется следующим образом. За время Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) с вероятностью $p_i(\Delta t) = m_i \beta_i \Delta t$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), где β_i – интенсивность отказов, параметры элемента i -й категории скачкообразно изменяются. При этом количество элементов, не имеющих отказа в i -й категории, уменьшается на единицу.

На основе расчетной схемы (рис. 1) составлена структура вероятностных переходов Марковского стохастического ветвящегося процесса прогнозирования независимых отказов вентиляционной системы (рис. 2). Состояние вентиляционной системы будем описывать случайным 5-мерным вектором с координатами [2] $\mu = (\mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5)$ (рис. 2). Незвестной величиной является вероятность

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_4}(t) = P(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5)$$

(в момент времени t в 1-й категории находится m_1 элементов, во 2-й – m_2 , ..., и в 5-й категории – m_5).

Из структуры вероятностных переходов Марковского стохастического ветвящегося процесса (рис. 2), используя методику [3], получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{m_1, m_2, \dots, m_4}(t)}{dt} &= \frac{dP(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5)}{dt} = \\ &= \sum_{i=1}^5 (m_i + 1) \beta_i P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \dots, \mu_5(t) = m_5) + \\ &+ (m_i + 1) \alpha_{i, i+1} P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \mu_{i+1}(t) = m_{i+1} - 1, \dots, \mu_5(t) = m_5) - \\ &- m_i (\alpha_{i, j} + \beta_i) P(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5), \\ m_1 &= 0, 1, 2, \dots, m, \quad m_2 = 0, 1, 2, \dots, m, \quad m_3 = 0, 1, 2, \dots, m, \quad m_4 = 0, 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (1)$$

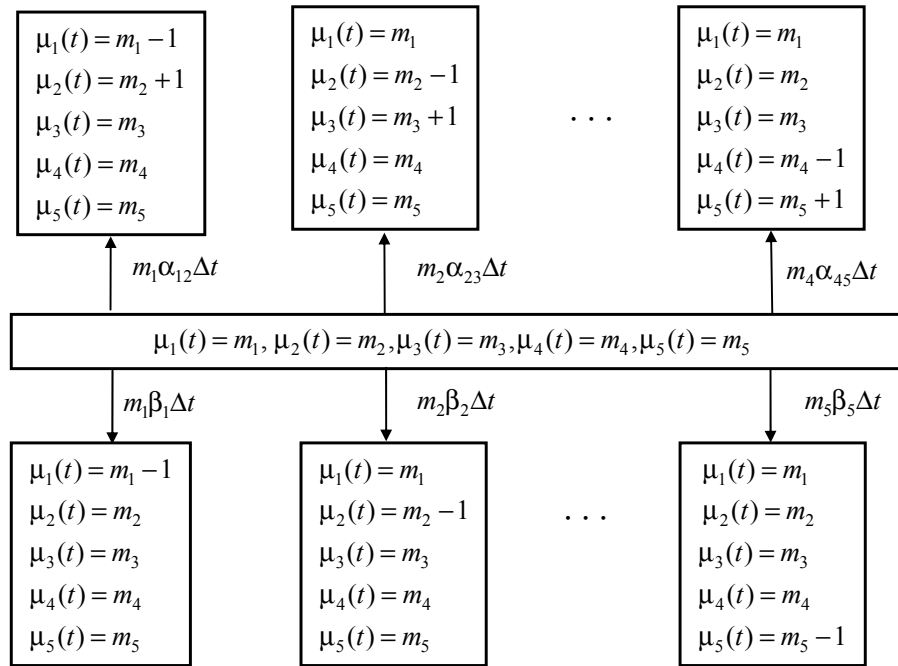


Рис. 2. Структура вероятностных переходов Марковского стохастического ветвящегося процесса прогнозирования независимых отказов вентиляционной системы

Начальные условия решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) определим из начального состояния стохастической системы

$$\mu_0 = (\mu_1(0) = m_1^0, \mu_2(0) = m_2^0, \dots, \mu_5(0) = m_5^0).$$

В момент времени $t=0$ в 1-й категории находятся m_1^0 элементов, во 2-й – m_2^0 , ..., в 5-й категории – m_5^0 . Начальные условия для системы обыкновенных уравнений (1) в этом случае определяются следующим образом:

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(0) = \begin{cases} 1, & \text{если } m_1 = m_1^0, m_2 = m_2^0, \dots, m_5 = m_5^0, \\ 0, & \text{если } m_1 \neq m_1^0, m_2 \neq m_2^0, \dots, m_5 \neq m_5^0. \end{cases} \quad (2)$$

Сведем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1) к дифференциальному уравнению в частных производных относительно производящей функции, которую будем искать в виде [2]:

$$F(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_5=0}^{\infty} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_5^{m_5} P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \quad (3)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_5$ – переменные величины.

Дифференцируя производящую функцию $F(t; x_1, x_2, \dots, x_5)$ по переменным $t, x_1, x_2, \dots, x_5$, получаем

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_5=0}^{\infty} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_5^{m_5} \frac{dP_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)}{dt}, \\ x_i \frac{\partial F}{\partial x_i} &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_5=0}^{\infty} m_i x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_5^{m_5} P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \\ x_{i+1} \frac{\partial F}{\partial x_i} &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_5=0}^{\infty} (m_i + 1) x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_5^{m_5} P_{m_1, \dots, m_i+1, m_{i+1}-1, \dots, m_5}(t), \\ \frac{\partial F}{\partial x_i} &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_5=0}^{\infty} (m_i + 1) x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_5^{m_5} P_{m_1, \dots, m_i+1, \dots, m_5}(t), \quad i=1, 2, 3, 4, 5. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Решая совместно (1) и (4), получаем линейное дифференциальное уравнение в частных производных относительно производящей функции

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{i=1}^5 (\beta_i + \alpha_{i,i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i,i+1} + \beta_i) x_i) \frac{\partial F}{\partial x_i}. \quad (5)$$

Задача интегрирования линейного однородного уравнения (5) равносильна задаче интегрирования так называемой характеристической системы [4]

$$\frac{dx_1}{X_1} = \frac{dx_2}{X_2} = \frac{dx_3}{X_3} = \frac{dx_4}{X_4} = \frac{dx_5}{X_5} = \frac{dt}{-1}, \quad (6)$$

где $X_i = \beta_i + \alpha_{i,i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i,i+1} + \beta_i) x_i$, $i=1, 2, 3, 4, 5$.

Решая характеристическую систему (6), определяем первые линейно независимые интегралы:

$$\begin{aligned} \Phi_i(t; x_1, x_2, x_3, x_4) &= \\ &= t - \frac{1}{\alpha_{i,i+1} + \beta_i} \ln(\beta_i + \alpha_{i,i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i,i+1} + \beta_i) x_i), \quad i=1, 2, \dots, 5. \end{aligned} \quad (7)$$

Общее решение линейного однородного уравнения в частных производных (5) имеет вид [4]

$$F(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \phi(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_5), \quad (8)$$

где ϕ – произвольная функция.

Функция $\phi(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_5)$ определяется из начального условия (2) (вероятность $P_{m_1^0, m_2^0, \dots, m_5^0}(0) = 1$, все остальные вероятности равны нулю):

$$\phi(\Phi_1(0), \Phi_2(0), \dots, \Phi_5(0)) = x_1^{m_1^0} x_2^{m_2^0} \dots x_5^{m_5^0}, \quad (9)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_5$ находятся из решения следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\beta_i + \alpha_{i,i+1}x_{i+1} - (\alpha_{i,i+1} + \beta_i)x_i = \exp(-(\alpha_{i,i+1} + \beta_i)\varphi_i(0)), i = 1, 2, \dots, 5. \quad (10)$$

Решаем систему линейных алгебраических уравнений (10), определяем $x_1, x_2, \dots, x_5$. Подставляем эти значения в (9) и определяем вид функции $\phi = \phi(\varphi_1(0), \varphi_2(0), \dots, \varphi_5(0))$. Подставляя в функцию ϕ аргументы из (7), получаем выражение для производящей функции:

$$F(t, x_1, x_2, \dots, x_4) = \prod_{i=1}^5 \left(N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij}x_j \right)^{m_i^0}, \quad (11)$$

где N_i, M_{ij} – соответственно компоненты вектора $\mathbf{N}$ и матрицы $\mathbf{M}$, которые определяются следующим образом:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{-1} \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}, \quad (12)$$

здесь $\mathbf{I}$ – единичная матрица;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -(\beta_1 + \alpha_{12}) & \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\beta_2 + \alpha_{23}) & \alpha_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\beta_3 + \alpha_{34}) & \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\beta_4 + \alpha_{45}) & \alpha_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_5 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \exp(-(\beta_1 + \alpha_{12})t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-(\beta_2 + \alpha_{23})t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-(\beta_3 + \alpha_{34})t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-(\beta_4 + \alpha_{45})t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\beta_5 t) \end{pmatrix}.$$

Вероятность $P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)$ определяется через производящую функцию следующим образом [2]:

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) = \frac{1}{m_1! m_2! \dots m_5!} \frac{\partial^{m_1+m_2+\dots+m_5} F(t; 0, 0, \dots, 0)}{\partial x_1^{m_1} \partial x_2^{m_2} \dots \partial x_5^{m_5}}. \quad (13)$$

Математическое ожидание количества элементов, находящихся в категориях деградации в момент времени t , определяется через производящую функцию следующим образом [3]:

$$M_k(t) = \frac{\partial F(t; 1, 1, \dots, 1)}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (14)$$

Вычисляя производные от производящей функции $F(t, x_1, x_2, \dots, x_5)$ (14), получаем выражение математического ожидания количества элементов, находящихся в различных категориях деградации (рис. 1):

$$M_k(t) = \prod_{i=1}^5 \left(N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij} \right)^{m_i^0} \sum_{i=1}^5 m_i^0 \frac{M_{ik}}{N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij}}, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (15)$$

Неизвестными величинами в Марковском процессе являются интенсивности переходов $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$. Их можно определить из решения системы уравнений, полученных на основе выражений для математических ожиданий (15):

$$M_k(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = M_k, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (16)$$

Математические ожидания M_k ($k = 1, 2, \dots, 5$) в момент времени $t = \tau$ должны быть известны и могут быть определены из эксперимента или априорно из анализа интенсивностей отказов сборочных единиц.

Пусть $m_0^1 \neq 0, m_0^2 = 0, \dots, m_0^5 = 0$, тогда вероятность $P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)$ согласно (13) определяется следующим образом:

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) = \frac{m_1^0!}{m_1! m_2! \dots m_5! (m_1^0 - m_1 - m_2 - \dots - m_5)} \times \\ \times N_1^{m_1^0 - m_1 - m_2 - \dots - m_5} M_{11}^{m_1} M_{12}^{m_2} \dots M_{15}^{m_5}. \quad (17)$$

Получить $P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)$ при $m_0^1 \neq 0, m_0^2 \neq 0, \dots, m_0^5 \neq 0$ весьма проблематично.

Условием того, что отказа элементов в вентиляционной системе не будет, является $m_1 + m_2 + \dots + m_5 = m_1^0$. Тогда вероятность безотказной работы [1] системы противоаварийной защиты в течение времени t определяется следующим образом:

$$P(t) = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_1^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_1^0} P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \quad (18)$$

где $m_1 + m_2 + \dots + m_5 = m_1^0$.

Среднее время безотказной работы вентиляционной системы определяется следующим образом [1]:

$$T = \int_0^\infty P(t) dt = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_1^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_1^0} \int_0^\infty P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) dt, \quad (19)$$

где $m_1 + m_2 + \dots + m_5 = m_1^0$.

На рис. 3 показана зависимость математических ожиданий элементов вентиляционной системы по категориям деградации от времени (сплошные кривые) при внезапных отказах. Интенсивности переходов Марковского процесса $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ получены из решения системы уравнений (16) при $\tau = 9000$ ч, $M_1 = 1, M_2 = 7, M_3 = 5, M_4 = 3, M_5 = 1$ (M_1, M_2, M_3, M_4 получены априорно из анализа интенсивностей отказов сборочных единиц – $m = 18$). Для сравнения на рис. 3 приведены зависимости математических ожиданий для случая, когда внезапные отказы отсутствуют ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$) – штриховые кривые. Чем больше расхождение между сплошной и штриховой кривыми, тем выше вероятность внезапного отказа. Наибольшее расхождение между сплошными и штриховыми кривыми наблюдается для 4,5-категорий деградации. Вероятность внезапных отказов сборочных единиц для этих категорий наибольшая.

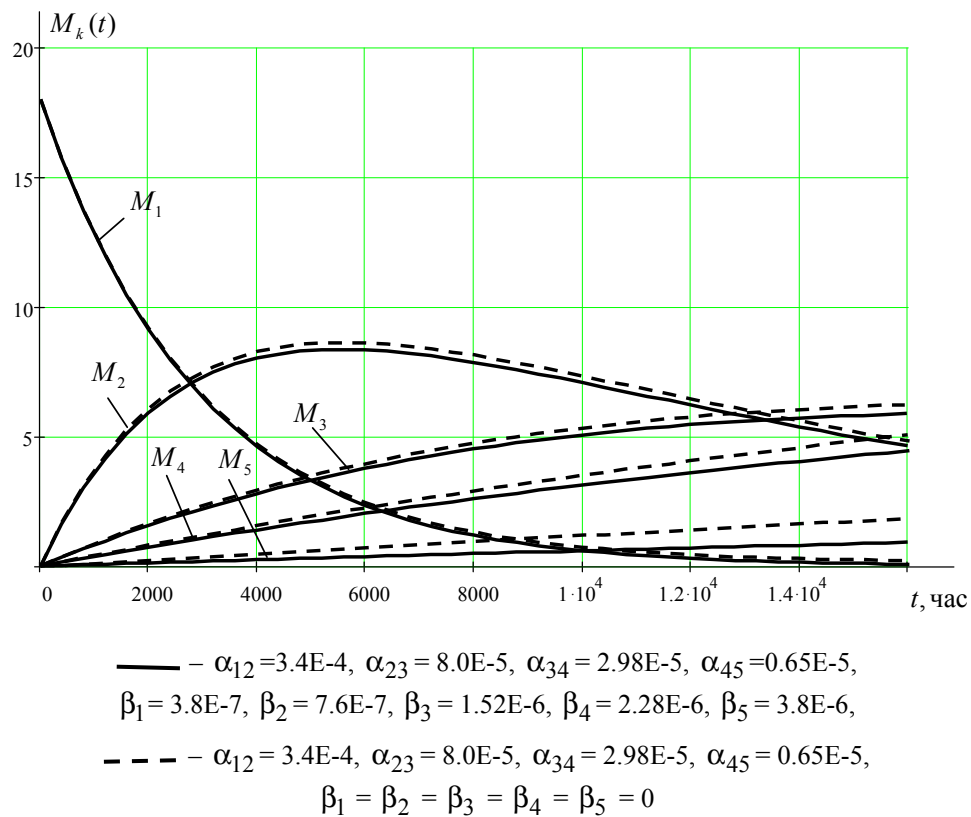


Рис. 3. Распределение математических ожиданий элементов вентиляционной системы по категориям деградации во времени:

Время $\tau = 9000$ ч соответствует среднему времени безотказной работы, рассчитанному по существующей методике [1] на основе интенсивностей отказов элементов вентиляционной системы для пятилетнего срока службы. Среднее время безотказной работы вентиляционной системы, полученное по предложенной методике, составляет $T = 7600$ ч.

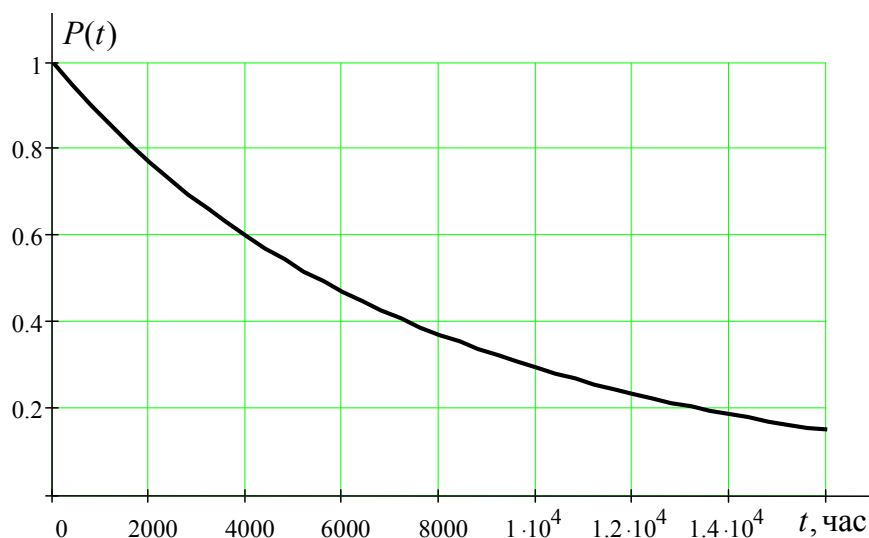


Рис. 4. Вероятность безотказной работы вентиляционной системы

Данные, полученные в результате эксплуатации существующих систем вентиляции, соответствуют 7300–8000 ч. Существующая методика дает завышенные значения среднего времени безотказной работы на 13–24 %, а предлагаемая – на 4–5 %.

График изменения вероятности безотказной работы вентиляционной системы от времени показан на рис. 4. Из графика видно, что вероятность безотказной работы на уровне $P(t)=0,8$ осуществляется при времени $t=2000$ ч, а для 8000 ч работы вероятность безотказной работы вентиляционной системы составит 0,37. Поэтому для повышения вероятности безотказной работы вентиляционной системы необходимо обеспечить проведение в определенные сроки технического обслуживания модулей.

Таким образом, предложенная методика расчета характеристик безотказности вентиляционных систем является более адекватной, позволяет учитывать деградацию элементов системы во времени и планировать сроки проведения технического обслуживания ее модулей.

Список литературы

1. **Половко, А. М.** Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. **Севостьянов, Б. А.** Ветвящиеся процессы / Б. А. Севостьянов. – М. : Наука, 1971. – 307 с.
3. **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Физматлит, 1962. – 637 с.
4. **Корн, Г.** Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука. 1974. – 701 с.

References

1. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Basic theory of reliability]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 704 p.
2. Sevost'yanov B. A. *Vetvyashchiesya protsessy* [Branching processes]. Moscow: Nauka, 1971, 307 p.

3. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Fizmatlit, 1962, 637 p.
 4. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Mathematics handbook]. Moscow: Nauka, 1974, 701 p.
-

Горшков Валентин Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра теплогазоснабжения
и вентиляции, Пензенский
государственный университет
архитектуры и строительства (Россия,
г. Пенза, ул. Титова, 28)

E-mail: eoi@pguas.ru

Gorshkov Valentin Ivanovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of heat-and-gas
supply and ventilation, Penza State
University of Architecture and Construction
(28 Titova street, Penza, Russia)

Мирошниченко Денис Сергеевич

аспирант, Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства (Россия, г. Пенза,
ул. Титова, 28)

E-mail: eoi@pguas.ru

Miroshnichenko Denis Sergeevich

Postgraduate student, Penza State
University of Architecture and Construction
(28 Titova street, Penza, Russia)

Святкина Анна Александровна

аспирант, Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства (Россия, г. Пенза,
ул. Титова, 28)

E-mail: anja.svjatkina@mail.ru

Svyatkina Anna Aleksandrovna

Postgraduate student, Penza State
University of Architecture and Construction
(28 Titova street, Penza, Russia)

УДК 535.32

Горшков, В. И.

Математическое моделирование показателей безотказности вентиляционных систем с учетом деградации параметров модулей / В. И. Горшков, Д. С. Мирошниченко, А. А. Святкина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 193–202.