

УДК 519.21

ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКАЗА БЛОКА КОНТРОЛЯ ОБОГРЕВА ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

© 2021 А.А. Бутов, Т.С. Леушкина, И.Р. Сулейманов

Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 12.07.2021

В статье приводятся результаты прогнозирования вероятности отказа блока контроля обогрева во время полета на основе математического моделирования многостадийных процессов выполнения операций в стохастических продуктивных системах. Постановка задачи формируется следующим образом: определить вероятность отказа блока контроля обогрева во время полета и ее возможные последствия. В качестве исходного объекта для определения вероятности отказа рассматривалась структурно-функциональная схема блока контроля обогрева с применением строгого формально-математического описания на основе уравнений, описывающего процесс Орнштейна-Уленбека. Ключевые слова: стохастические системы, математическое моделирование, блок контроля обогрева, математическое описание, вероятность отказа.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-103-110

ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения данной работы является поддержка принятия решений, направленных на снижение вероятности отказа блока контроля обогрева во время полета летательного аппарата.

Надежность и безотказность разрабатываемых изделий всегда были и остаются важными характеристиками в авиастроительном предприятии (поскольку от них зависит человеческая жизнь) [1].

В начале нашего столетия разработчики, проектировавшие летательные аппараты, как правило, сами «облетывали» свои конструкции. Ценою своей жизни и огромного вклада в эту индустрию изобретателям удалось преодолеть барьер надежности и достичь требуемой безотказности.

Наряду с развивающимися технологиями в авиастроительном предприятии растут и требования по эффективности и безотказности боевых и пассажирских самолетов. Если у пассажирских самолетов критерий безотказности удается увеличить благодаря резервированию важных систем, то в боевых машинах не всегда имеется возможность резервирования систем (наряду с ограничениями по взлетной массе объекта) [2, 6, 7].

Решением данной проблемы является модернизация и усовершенствование систем,

Бутов Александр Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики. E-mail: butov.a.a@gmail.com

Леушкина Татьяна Сергеевна, аспирант.

E-mail: chi-tanechka@yandex.ru

Сулейманов Илмаз Ринатович, аспирант.

E-mail: ilmazsuleimanov@yandex.ru

применяемых на летательных аппаратах, боевого назначения. Усложнения основных компонентов и систем напрямую влияют на безотказность объекта. Все чаще в процессе серийного производства выявляются сложные проблемы, связанные с низким уровнем безотказности, надежности и «живучести» изготавливаемых изделий.

Одним из изделий, применяемый в системе измерения высотно-скоростных параметров на летательном аппарате, является блок контроля обогрева, позволяющий контролировать исправность цепей обогрева приемников воздушных давлений и выдавать признаки исправности электрических цепей обогрева. Если контролируемый ток находится в требуемом диапазоне, блок формирует и выдает разовую команду об исправности контролируемых цепей. Блок состоит из множества функциональных узлов, выполняющих назначенные функции.

Отказ каждого из узлов может привести к непредсказуемым последствиям. По этой причине разработка и совершенствование расчетных методов оценки вероятности отказа блока является важной и значимой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Это описание – математическая модель – представляет собой набор математических определений и соотношений, позволяющих проводить математическое, алгоритмическое и имитационное компьютерное моделирование [3].

Описанная математическая модель оценки вероятности отказов блока контроля обогрева представляет собой строгую последовательность выполнения операций. Считается, что отказы элементов блока являются событиями не-

зависимыми и случайными. Работоспособность блока не зависит от последовательности возникновения во времени отказов его элементов.

Упрощенно структурно-функциональная схема с описанием блока контроля обогрева представлена на рисунке 1. Разработанная модель была составлена на основе схемы, рассматриваемой в монографии Клюева Г.И. «Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов» Ульяновск, 2005 [4]. К каждому из 12 функциональных узлов блока в настоящей работе представлено свое математическое описание в зависимости от входящих параметров и выдаваемой информации внешнему потребителю. На вход процессов поступает информация в виде питания от внешних источников, а также входные разовые команды (РК). В ходе процесса контролируется исправность цепей обогрева приемников воздушных давлений и производится выдача информации во внешние цепи в виде РК.

Процесс $X^{(1)} = (X_t^{(1)})_{t>0}$ для первого блока схемы, представленной на рисунке 1, рассматривается на основе уравнения, описывающего процесс Орнштейна-Уленбека [5] со среднем уровнем \bar{x} :

$$X_t^{(1)} = \bar{x} + \lambda \int_0^t (\bar{x} - X_s^{(1)}) ds + \sigma W_t,$$

где λ ($\lambda > 0$) – интенсивность, σ ($\sigma > 0$) – среднеквадратическое отклонение, W_t – винеровский процесс. При этом

$$\lambda = \frac{1}{\tau},$$

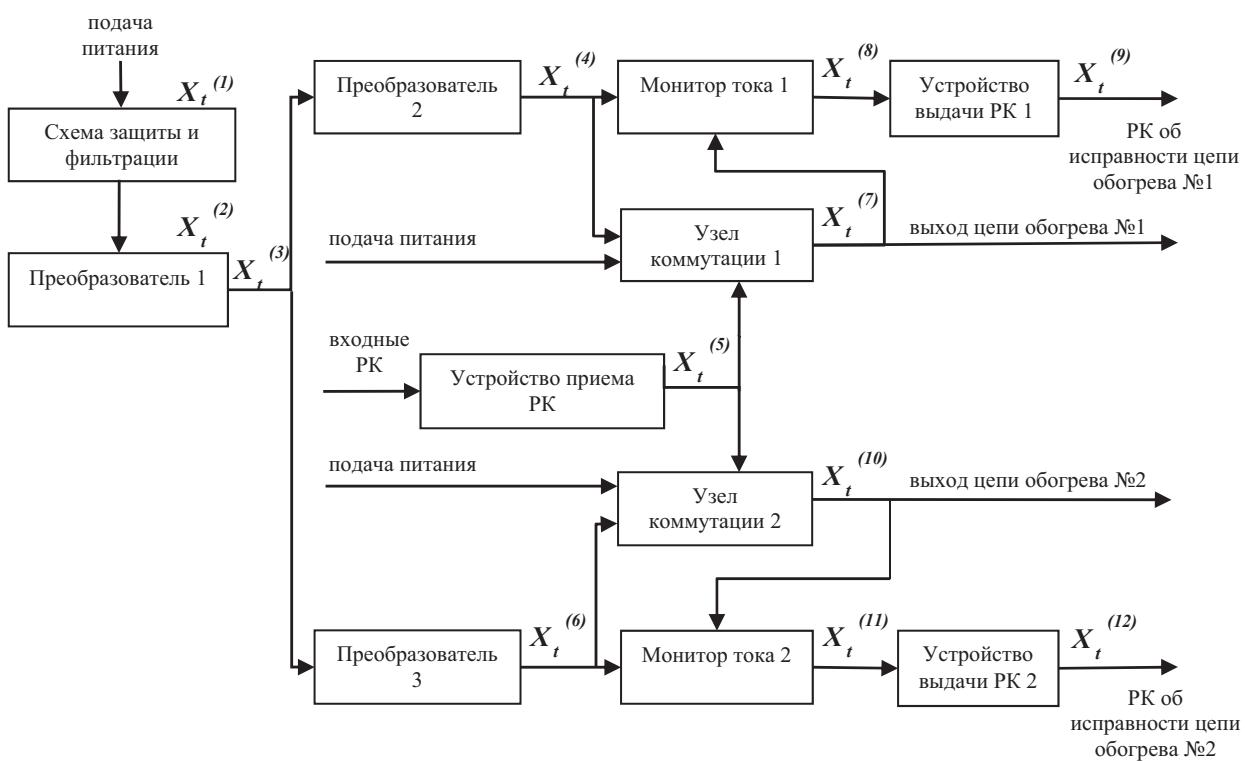


Рис. 1. Упрощенная структурно-функциональная схема блока контроля обогрева

где τ – среднее время стабилизации.

Для определения среднеквадратического отклонения использовали формулу

$$\sigma^2 = 2L^2\lambda,$$

где $2L$ – ширина диапазона напряжения.

Оценивая параметр $\hat{\lambda}$, исходя из

$$EX_t \cdot X_{t+s} = DX_t \cdot e^{-\lambda s},$$

получаем, что

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{s} \left(-\ln \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^t X_t \cdot X_{t+\Delta i} \right) \right).$$

Преобразователь 1 (здесь и далее приведены обозначения блока схемы на рисунке 1) порождает процесс $X_t^{(2)}$, который задан уравнением

$$X_t^{(2)} = \begin{cases} X^{(1)} \cdot I\{24 \leq X^{(1)} \geq 29,4\}, \\ 0 \end{cases}$$

где I – индикаторная функция. Числовые значения определяют диапазон напряжения при нормальной или частичной работе системы электроснабжения летательного аппарата.

Процессы, происходящие в блоках Преобразователь 2 и Преобразователь 3 описываются уравнением

$$X_t^{(3)} = \begin{cases} c^{(3)} \cdot I\{X^{(2)} \geq c^{(3)}\}, \\ 0 \end{cases}$$

где $c^{(3)} = 15$ – константа.

Рассматривая узлы схемы Монитор тока 1 и Узел коммутации 1 (при этом учитывая входящие параметры для блока Узел коммутации 1), процессы представляются уравнением

$$X_t^{(4)} = \begin{cases} c^{(4)} \cdot I\{X_t^{(2)} \geq c^{(3)}\}, \\ 0 \end{cases}$$

где $c^{(4)} < c^{(3)}$ – константы ($c^{(4)} > 0, c^{(3)} > 0$).

По средством подачи питания на блок схемы Узел коммутации и Монитор тока 2 (без учета входящих параметров), уравнение процессов имеет вид

$$X_t^{(6)} = \begin{cases} c^{(6)} \cdot I\{X_t^{(2)} \geq c^{(3)}\}, \\ 0 \end{cases}$$

где $c^{(6)} < c^{(3)}$ – константы ($c^{(6)} > 0, c^{(3)} > 0$).

Блок Устройство приёма РК, получая на вход некоторые внешние разовые команды, порождает процесс $X_t^{(5)}$, описывающийся уравнением

$$X_t^{(5)} = C \cdot N_t,$$

где $N_t = (N_t)_{t \geq 0}$ – процесс телеграфного типа, т.е.

$$N_t = 1 - \int_0^t N_s dA_s + \int_0^t (1 - N_s) dB_s,$$

процессы A, B – пуассоновские с интенсивностями α ($\alpha > 0$, частота сбоев), β ($\beta > 0, 1/\beta$ среднее время продолжительности каждого сбоя), компенсаторы \tilde{A} и \tilde{B} которых имеют вид:

$$\tilde{A} = \alpha \cdot t, \tilde{B} = \beta \cdot t.$$

Процесс $X_t^{(7)}$ выхода цепи обогрева №1 описывается уравнением

$$X_t^{(7)} = c^{(7)} \cdot I\{X_t^{(5)} > 0\} \cdot I\{X_t^{(4)} > 0\},$$

где $c^{(7)} > 0$ – константа.

Устройство выдачи РК 1, преобразуя входные данные, представляется процессом $X_t^{(8)}$ и рассматривается на основе уравнения

$$X_t^{(8)} = c^{(8)} \cdot X_t^{(7)},$$

где $c^{(8)} > 0$ – константа.

На выходе из предыдущего узла получаем процесс, заданный

$$X_t^{(9)} = I\{X_t^{(8)} > 0\}.$$

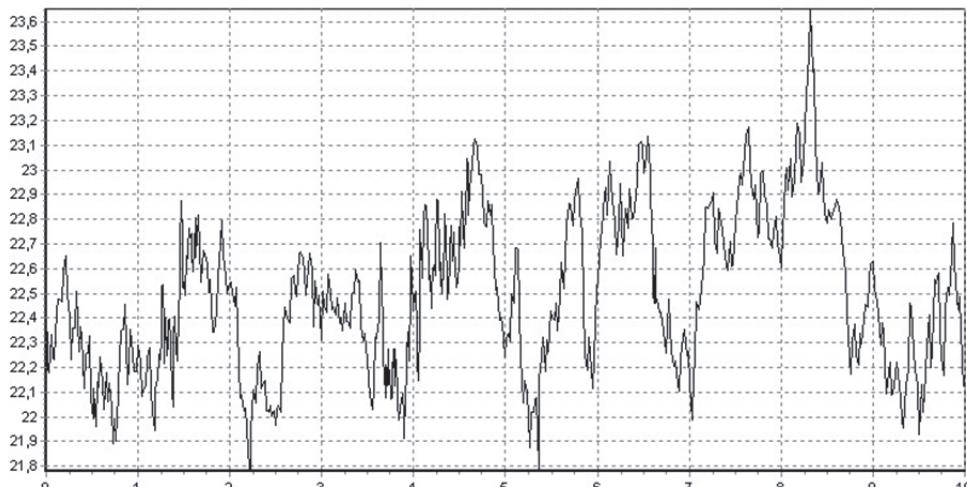


Рис. 2. Смоделированный процесс Орнштейна-Уленбека для узла защиты и фильтрации с временем моделирования $t = 10$ с

Процесс $X_t^{(10)}$ выхода цепи обогрева №2 описывается уравнением

$$X_t^{(10)} = c^{(10)} \cdot I\{X_t^{(5)} > 0\} \cdot I\{X_t^{(6)} > 0\},$$

где $c^{(10)} > 0$ – константа.

Переходя к блоку Устройство выдачи РК 2 уравнение процесса имеет вид:

$$X_t^{(11)} = c^{(11)} \cdot X_t^{(10)},$$

где $c^{(11)} > 0$ – константа.

На выходе из предыдущего блока порождается процесс $X_t^{(12)}$, который задан уравнением

$$X_t^{(12)} = I\{X_t^{(11)} > 0\}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Узлы функционирования блока рассматривались на основе уравнения, описывающего процесс Орнштейна-Уленбека со среднем уровнем \bar{x} , с учетом основных параметров и процессов таких, как интенсивность, среднеквадратическое отклонение, винеровский процесс, среднее время стабилизации, ширина диапазона напряжения и многое другое.

На рис. 2 приведен график траектории продуктивного процесса узла «Защиты и фильтрации» со временем моделирования $t = 10$ с, при параметрах (интенсивности) $\lambda=10$, и при (среднеквадратическом отклонении) $\sigma=12,07$.

Также на этом графике можно наблюдать изменения процесса в пределах значений от 21,8 до 23,6. Это и является случайным блужданием, описывающее входящие параметры для узла «Защиты и фильтрации». При этом математическая модель следующего этапа выполнения операции ограничивает возникающие случайные блуждания установлением требуемого диапазона при нормальной работе системы электроснабжения летательного аппарата.

Если рассмотреть время моделирования равным $t = 10$ с в случае интенсивности отказа равным $\lambda=10$ и со среднеквадратическим отклонением равным $\sigma = 67,1$ при времени

стабилизации $\tau = 0,1$ график траектории процесса $X_t^{(1)}$ имеет вид, представленный на рисунке 3.

При уменьшении значений параметров σ

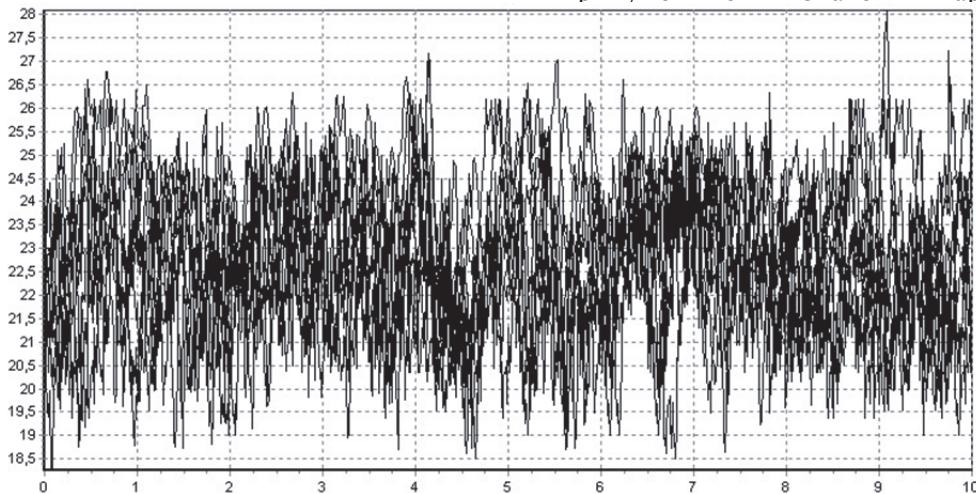


Рис. 3. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 67, \lambda = 10, \tau = 0,1$ с, $N = 10$

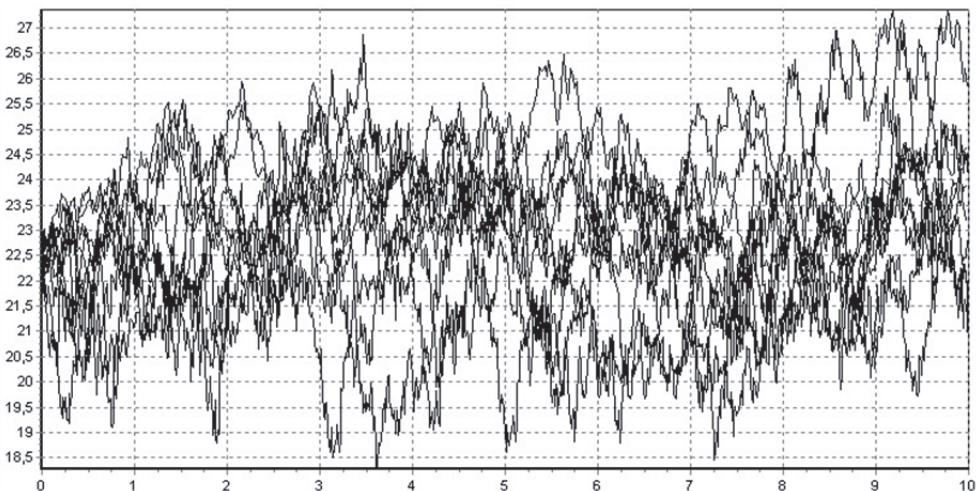


Рис. 4. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 30, \lambda = 2, \tau = 0,5$ с, $N = 10$

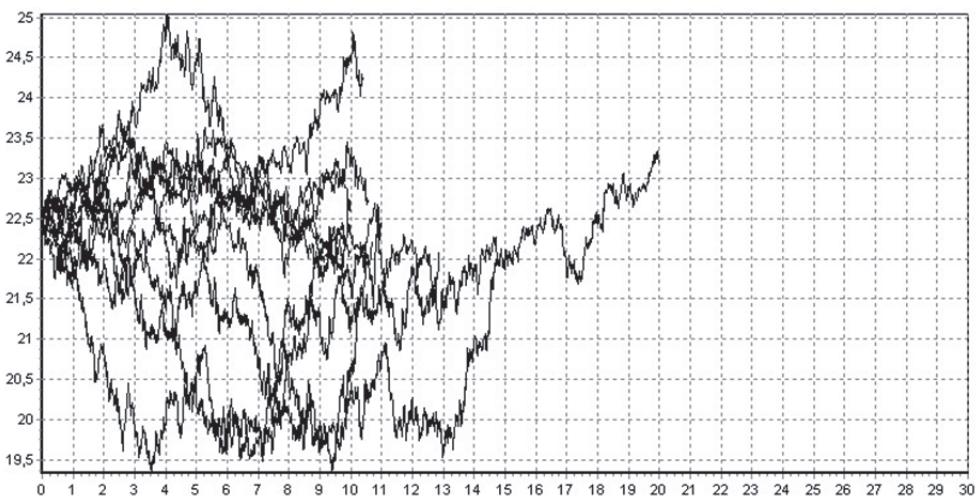


Рис. 5. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 6,7, \lambda = 0,1, \tau = 10$ с, $N = 10, T_n = 30$ с

(среднеквадратическое отклонение), влияющий на процесс $X_t^{(1)}$, процесс Орнштейна-Уленбека траектория графика принимает следующий вид (рисунок 4).

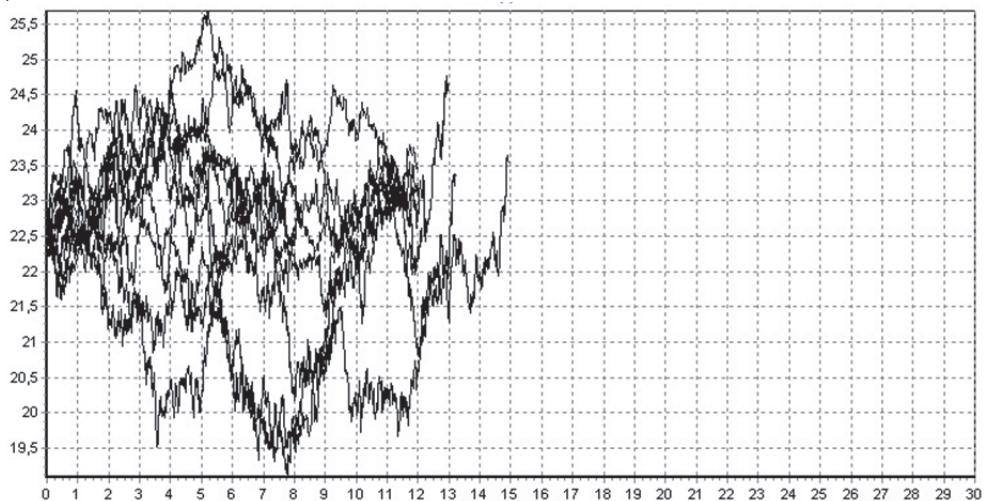


Рис. 6. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 9,5, \lambda = 0,2, \tau = 5 \text{ с}, N = 10, T_n = 30 \text{ с}$

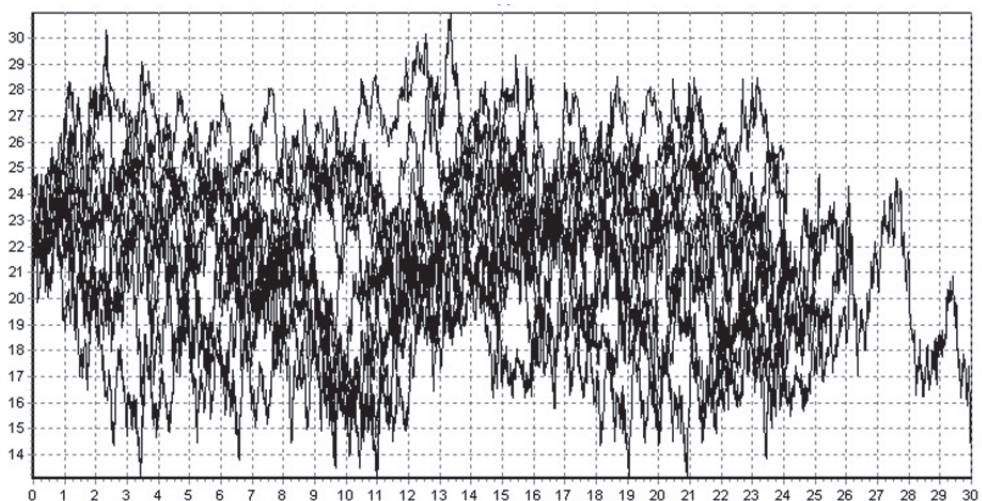


Рис. 7. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 38, \lambda = 0,8, \tau = 10 \text{ с}, N = 10, T_n = 30 \text{ с}$

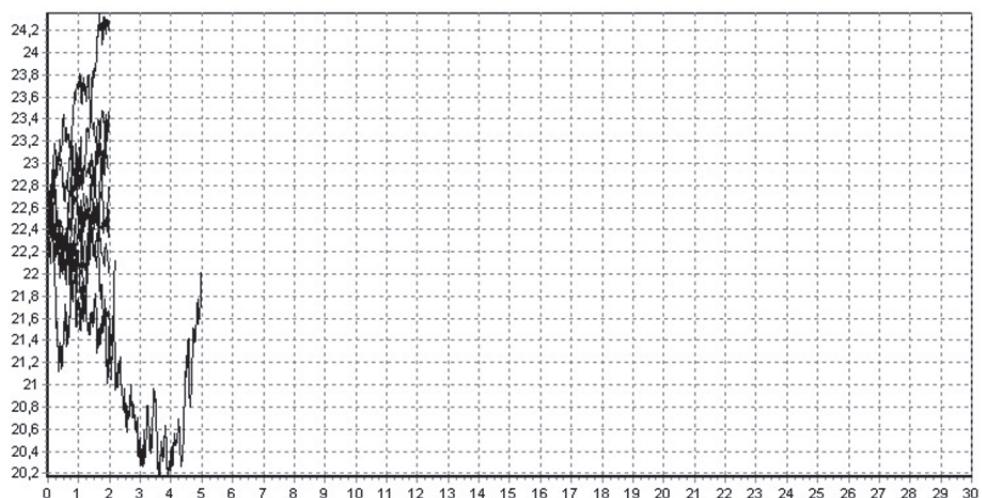


Рис. 8. График (траектория) процесса Орнштейна-Уленбека при значениях параметров $\sigma = 9,5, \lambda = 0,2, \tau = 5 \text{ с}, N = 10, T_n = 30 \text{ с}$

На данном графике приведена траектория процесса с уменьшением среднеквадратического отклонения σ до 30, но с увеличением средней времени стабилизации τ до 0,5 с.

Так же на следующих графиках (рисунок 5-8) будут представлены основные результаты, полученные в ходе данной работы при различных значениях параметров и их влияние на траекторию процесса.

Рассмотрев полученные графики, можно заметить закономерности изменений траекторий процесса $X_t^{(1)}$, при фиксированном значении ширины диапазона $L=15$:

Чем больше среднее время стабилизации τ , тем меньше интенсивность отказа λ и меньше среднеквадратическое отклонение σ , при этом на траектории процесса наблюдается «волатильность».

Так же стоит отметить, что при уменьшении параметров σ и λ , при фиксированном значении ширины диапазона $L=15$, на графиках траектории процесса, представленных на рисунках 7 и 8, наблюдается увеличение момента остановки (вероятности отказа) в рассматриваемом диапазоне времени.

По результатам компьютерного имитационного моделирования был проведен анализ видов и последствий отказов при различных коэффициентах, которые позволили определить интенсивность вида отказа за 30 мин полета и выявить последствия отказов на уровне применяемой системы. Результаты, полученные в ходе данного анализа, представлены в таблице 1.

Так же стоит отметить, что изменение ширины диапазона напряжения L , дает возможность проанализировать поведение математической модели блока при разных состояниях системы электроснабжения самолета (нормальной или частичной, аварийной и при ненормальной работе).

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе данной работы, являются актуальными и новыми. Разработан метод (на основе приведенной схемы), представляющий собой метод общего математического определения вероятности возникновения отказа блока контроля обогрева. Описана стохастическая математическая модель, а также компьютерная имитационная модель, позволяющая анализировать и исследовать результативные системы с многостадийными процессами выполнения операций в терминах точечных процессов.

С помощью компьютерного имитационного моделирования были рассмотрены варианты при различных значениях коэффициентов с отличающимися исходами событий. Анализ обработки полученных данных показал, что разработанная модель позволяет определять скорость роста вероятности отказа блока контроля обогрева, зависящую от параметров частоты сбоев α и от среднего времени продолжительности каждого сбоя $1/\beta$ узла «Устройства приема РК», что влечет за собой изменения параметров пу-

ассоновских процессов, тем самым, влияя на модель в целом.

Анализ видов и последствий отказов, проведенный по результатам компьютерного имитационного моделирования, при различных коэффициентах, позволил также выявить, что нарушение функционального узла «Устройства приема РК» блока может привести к отказу критической функции приема разовых команд, что, в свою очередь, приводит к усложнению условий полета (увеличивает психофизиологическую нагрузку на экипаж).

Критерии выполнения операции математической модели, полученные в ходе данной работы, позволяют оптимизировать процесс управления и выявить вероятности отказа блока на ранних этапах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко О.Г. Совершенствование методов расчета надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации и исследование процессов старения Автореф. диссертация ... доктора технических наук: 05.07.02 Красноярск 2010. 35с.
2. Надежность летательных аппаратов: Учеб. пособием/ С.К. Кириакиди. В.А. Сатин и др. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2009. 107 с.
3. Коваленко А.А. Моделирование многостадийных управляемых стохастических продуктивных систем: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 05.13.18 Ульяновск 2019. 118с.
4. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: учебное пособие для вузов/ Г.И. Клюев [и др]. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.– 509 с.
5. Гаврилова М.С. Семимартингальная модель нормального суточного профиля артериального давления // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2018, № 10, с. 38-51.
6. ОСТ 1 00132-84. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов.
7. Han Bao, Hongfu Zuo. Probability risk analysis and control of aeroengine control system failures // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 189(6):062049. DOI:10.1088/1755-1315/189/6/062049

Таблица 1. Полученные результаты

Функциональный узел	Вид отказа	Интенсивность вида отказа ($10^{-6}/30$ мин)	Последствия на уровне системы
Схема защиты и фильтрации	Потеря электропитания	0,59835	
Преобразователь 1	Потеря электропитания	0,11435	
Устройство приема РК	Не выдача сигнала	0,72344	Автоматическая реконфигурация систем. Несущественное увеличение психофизиологической нагрузки на экипаж.
	Ложная выдача сигнала	0,16586	
Преобразователь 2	Потеря электропитания	0,0982	
Монитор тока 1	Не выдача сигнала	0,2705	Системы потребители информации определяют недостоверность входной информации посредством допускового контроля
	Ложная выдача сигнала	0,0526	
Узел коммутации 1	Не выдача выхода цепи обогрева №1	0,50085	Автоматическая реконфигурация систем. Несущественное увеличение психофизиологической нагрузки на экипаж.
	Ложная выдача выхода цепи обогрева №1	0,1102	
Устройство выдачи РК 1	Не выдача РК исправности цепи обогрева №1	0,1644	Системы потребители информации определяют недостоверность входной информации посредством допускового контроля
	Ложная выдача РК исправности цепи обогрева №1	0,0261	
Преобразователь 3	Потеря электропитания	0,0982	Автоматическая реконфигурация систем. Несущественное увеличение психофизиологической нагрузки на экипаж.
Монитор тока 2	Не выдача сигнала	0,2705	Системы потребители информации определяют недостоверность входной информации посредством допускового контроля
	Ложная выдача сигнала	0,0526	
Узел коммутации 2	Не выдача выхода цепи обогрева №2	0,50085	Автоматическая реконфигурация систем. Несущественное увеличение психофизиологической нагрузки на экипаж.
	Ложная выдача выхода цепи обогрева №2	0,1102	
Устройство выдачи РК 2	Не выдача РК исправности цепи обогрева №2	0,1644	Системы потребители информации определяют недостоверность входной информации посредством допускового контроля
	Ложная выдача РК исправности цепи обогрева №2	0,0261	

**THE PROBABILITY OF FAILURE OF THE HEATING CONTROL UNIT
DURING THE FLIGHT AND ITS CONSEQUENCES**

© 2021 A.A. Butov, T.S. Leushkina, I.R. Suleymanov

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

The article presents the results of predicting the probability of failure of the heating control unit during flight on the basis of mathematical modeling of multistage processes of performing operations in stochastic productive systems. The problem statement is formed as follows: to determine the probability of failure of the heating control unit during the flight and its possible consequences. The structural and functional diagram of the heating control unit using a strict formal mathematical description based on equations describing the Ornstein-Uhlenbeck process was considered as an initial object for determining the probability of failure.

Keywords: stochastic systems, mathematical modeling, heating control unit, mathematical description, failure probability.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-103-110

Alexander Butov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Applied Mathematics.

E-mail: butov.a.a@gmail.com

Tatyana Leushkina, Post-Graduate Student.

E-mail: chi-tanechka@yandex.ru

Ilmaz Suleymanov, Post-Graduate Student.

E-mail: ilmazsuleimanov@yandex.ru