

Научная статья

УДК 681.5

DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, СВЯЗЫВАЮЩАЯ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТЕСТОВОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Игорь Владимирович Дорожко^{1✉}, Анатолий Сергеевич Мусиенко²,
Денис Сергеевич Сундиев³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

¹yka@mil.ru✉

Аннотация. В статье предложена модель в виде марковского процесса, связывающая показатели надежности с показателями и характеристиками контроля технических систем. В отличие от известных моделей учтены два вида контроля – тестовый и функциональный. Разработанная модель с помощью графического языка Stateflow программного пакета Matlab преобразована в имитационную модель, отличающуюся от известных возможностью учета режимов хранения и работы технической системы, которым соответствуют различные интенсивности отказов. Предложенная модель позволяет определять функцию и коэффициент готовности технической системы при заданных показателях надежности и контроля, а также обосновывать требования к показателям контроля.

Ключевые слова: марковский процесс, функция готовности, коэффициент готовности, тестовый контроль, функциональный контроль

Для цитирования: Дорожко И.В., Мусиенко А.С., Сундиев Д.С. Имитационная модель, связывающая показатели надежности с показателями тестового и функционального контроля технических систем // Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)

Original article

SIMULATION MODEL LINKING RELIABILITY INDICATORS WITH INDICATORS OF TEST AND FUNCTIONAL CONTROL OF TECHNICAL SYSTEMS

Igor V. Dorozhko^{1✉}, Anatoly S. Musienko², Denis S. Sundiev³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹yka@mil.ru✉

Abstract. At present, various built-in and external control tools are widely used to ensure reliability and maintain technical availability of space-rocket technology. Models and interrelations allowing associating reliability and control indicators are necessary for the requirements substantiation to the control system characteristics in the technical design assignment with account for the given value of the object availability factor.

The article proposes a simulation model allowing evaluate a complex reliability indicator of an object, namely the availability factor, with account for the control system

indicators and characteristics. Unlike the well-known models, differentiated control application, i.e. functional and test ones with different parameters, is being accounted for. Test control is characterized by high reliability, but, as a rule, it leads herewith to the downtime due to the fact that during the test control the object is not in use or is used limitedly extent and some time is required to transfer it from the control mode to the operating one. Functional control is less reliable, but is being performed in the “background” mode, and downtime can be associated only with erroneous control results. The developed model accounts for these types of control specifics. The admission on the parameters stationarity is eliminated as well. The developed model allows processing time-varying values of mean time between failures to account for various intensity of the technical system use for its intended purpose, as well as storage modes.

As the result of the simulation modeling, the availability factor values and the graphs of the availability function were obtained and analyzed. The inference was drawn that, if necessary, the availability function may be used to establish a boundary, below which the value of technical availability should not degrade throughout the entire time.

The practical significance lies in the possibility of employing the proposed model to adjust the frequency of the existing technical objects control, as well as to justify the requirements for control systems in the technical specifications formation for the development (modernization) of automated control systems and technological equipment for the space-rocket technology.

Keywords: Markov process, availability function, availability factor, test control, functional control

For citation: Dorozhko I.V., Musienko A.S., Sundiev D.S. Simulation model linking reliability indicators with indicators of test and functional control of technical systems. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)

Введение

В настоящее время для обеспечения надежности [1] и мониторинга технического состояния при эксплуатации сложных технических систем (ТС) широко применяются различные средства контроля [2, 3], которые условно можно рассматривать как встроенные и внешние [4, 5].

Например, каждый модуль и блок стоек, входящих в состав автоматизированных систем управления технологическим оборудованием стартового комплекса (АСУ ТО СК) «Союз-2» и автоматизированных систем подготовки ракет-носителей (разгонных блоков) (АСУП РН (РБ)) «Ангара», имеет встроенные средства контроля (рис. 1).



Рис. 1. Источник питания и блок аналого-цифрового преобразователя

К внешним средствам контроля по отношению к стойкам можно отнести различные испытательные стенды, а также автоматизированное рабочее место инженера (рис. 2), предназначенное для сбора информации и диагностики технологического оборудования для формирования сигнала готовности АСУ.

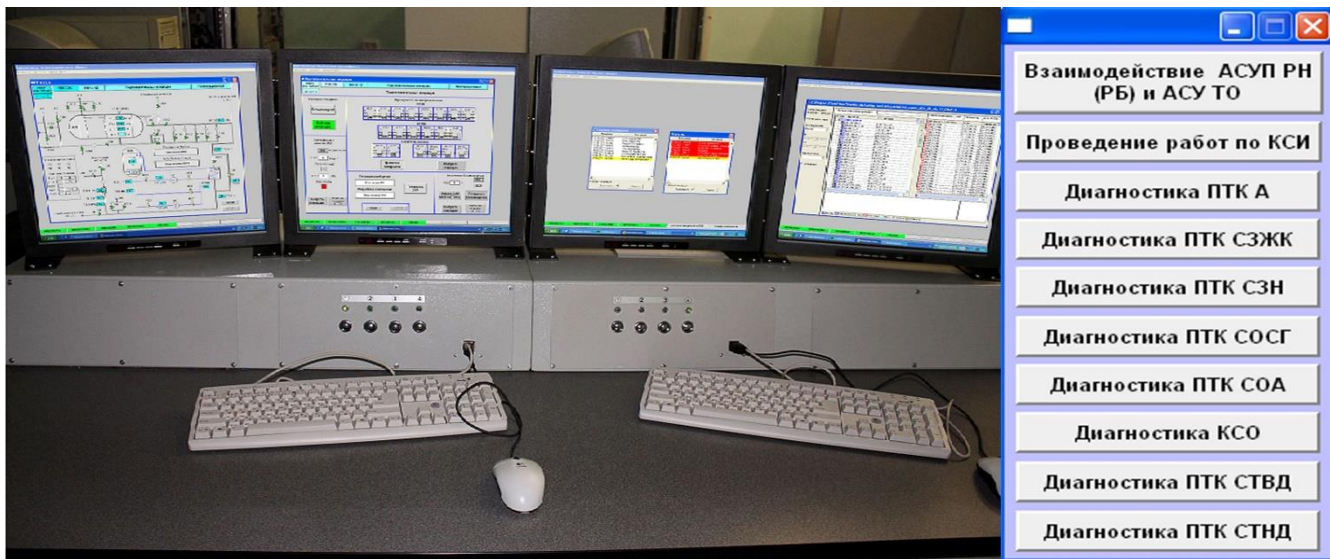


Рис. 2. Автоматизированное рабочее место инженера

При этом сам контроль также можно разделить на тестовый, при котором на ТС подаются специально формируемые тестовые воздействия, и функциональный, при котором применяются рабочие воздействия, предусмотренные самим ходом её функционирования [4]. Следовательно, встроенные средства контроля в большей части можно отнести для решения задач функционального контроля, а внешние – для решения задач тестового контроля. Функциональный контроль зачастую не требует задействования дополнительных ресурсов и может проводится постоянно (в «фоновом режиме») или с достаточно малой периодичностью, в то время как тестовый контроль проводится с периодичностью, как правило, значительно превышающей периодичность функционального контроля, а также может требовать

вывод ТС из рабочего режима на время контроля и приводить к простою. Преимуществом тестового контроля при этом может являться высокая достоверность по сравнению с функциональным.

Модель в виде графа состояний, связывающего показатели надежности и характеристики тестового и функционального контроля

В работах [6-15] описаны модели, связывающие показатели надежности и контроля ТС. При этом в работе [7] представленная модель не учитывает ошибок контроля, т.е. построена с допущением о полностью достоверном контроле, а в работах [6, 8-15] отсутствует выделение тестового и функционального контроля.

На рис. 3 представлена известная модель, которая описывает процесс перехода ТС (далее объекта) из работоспособного состояния в состояние отказа, а также процесс обратного перехода (восстановления) [14, 15].

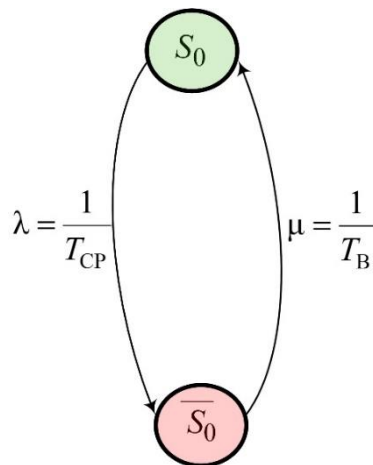


Рис. 3. Простейшая модель процесса отказа и восстановления объекта

На рис. 1 введены следующие обозначения:

– S_0, \bar{S}_0 – работоспособное состояние и состояние отказа объекта;

– λ – интенсивность отказов объекта, связанная обратной зависимостью

со средней продолжительностью безотказной работы объекта T_{CP} ;

– μ – интенсивность восстановления объекта, связанная обратной зависимостью со средним временем восстановления объекта T_B .

С помощью данной модели можно получить систему дифференциальных уравнений и рассчитать вероятность нахождения объекта в каждый момент времени в работоспособном состоянии (функцию готовности) и финальную вероятность работоспособного состояния (коэффициент готовности) [14, 15]. Однако данная модель не учитывает показатели и характеристики системы контроля.

На рис. 4 представлена модель процесса эксплуатации объекта, в которой учитываются показатели и характеристики контроля, решение о восстановлении объекта принимается по результатам контроля.

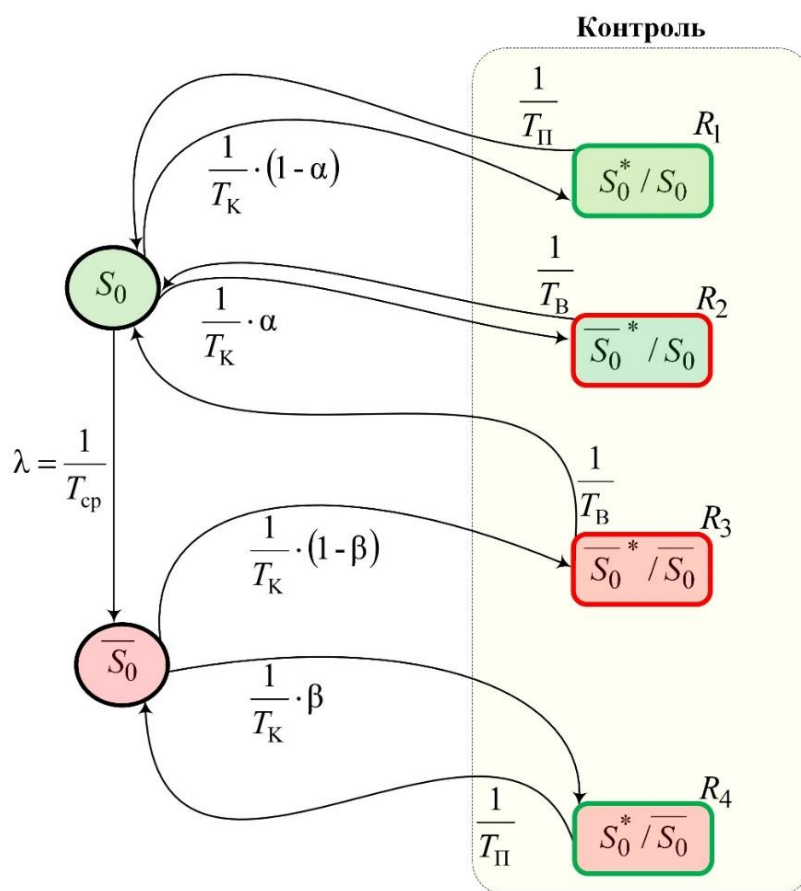


Рис. 4. Модель состояний объекта с учетом контроля

На рис. 4 дополнительно введены следующие обозначения:

– R_1, R_2, R_3, R_4 – состояния, при которых проводится контроль с достоверным результатом (R_1 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , при этом объект действительно работоспособен S_0 , R_3 – система контроля обнаруживает отказ $\overline{S_0^*}$, при этом объект действительно неработоспособен $\overline{S_0}$) и с ошибочным результатом (R_2 – система контроля сигнализирует отказ $\overline{S_0^*}$, а при этом объект работоспособен S_0 , R_4 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , а при этом объект отказал);

– T_K – периодичность контроля;

– α и β – вероятности ошибок контроля (ошибок 1-го и 2-го рода соответственно);

– T_B – среднее время восстановления после контроля;

– T_{Π} – средняя продолжительность перевода объекта из режима контроля в рабочий режим.

В статье предлагается учитывать дифференцированный контроль (тестовый и функциональный), тогда модель будет иметь вид, представленный на рис. 5.

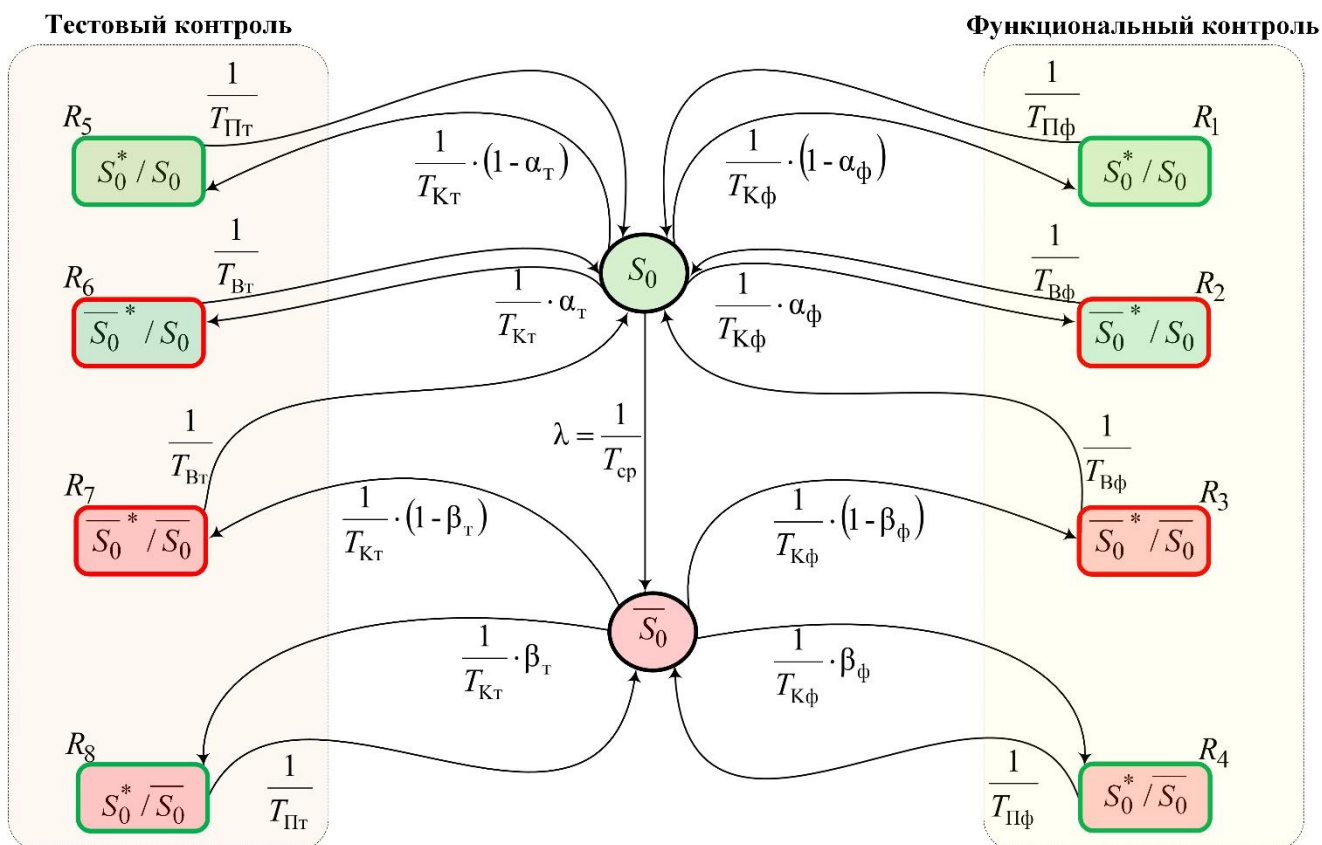


Рис. 5. Модель эксплуатации ТС с использованием тестового и функционального контроля в виде марковского процесса

На рис. 5 введены следующие обозначения:

- S_0, \bar{S}_0 – работоспособное состояние и состояние отказа объекта;
- T_{cp} – средняя продолжительность безотказной работы объекта;
- R_1, R_2, R_3, R_4 – состояния, при которых проводится функциональный

контроль с достоверным результатом (R_1 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , при этом объект действительно работоспособен S_0 ,

R_3 – система контроля обнаруживает отказ \bar{S}_0^* , при этом объект действительно неработоспособен \bar{S}_0) и с ошибочным результатом (R_2 – система контроля

сигнализирует отказ $\overline{S_0^*}$, а при этом объект работоспособен S_0 , R_4 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , а при этом объект отказал);

– R_5, R_6, R_7, R_8 – состояния, при которых проводится тестовый контроль с достоверным результатом (R_5, R_7) и с ошибочным результатом (R_6, R_8);

– $T_{Кт}, T_{Кф}$ – периодичности тестового и функционального контроля соответственно;

– $\alpha_t, \alpha_f, \beta_t$ и β_f – вероятности ошибок тестового и функционального контроля (ошибок 1-го и 2-го рода соответственно);

– $T_{Вт}, T_{Вф}$ – среднее время восстановления после тестового и функционального контроля;

– $T_{Пт}, T_{Пф}$ – средняя продолжительность перевода объекта из режима контроля в рабочий режим (функциональный контроль, как правило, происходит параллельно с работой объекта, т.е. $T_{Пф} \rightarrow 0$, тестовый контроль, при котором объект последовательно переводится из режима контроля в рабочий режим и обратно, характеризуется зачастую $T_{Пт} \gg T_{Пф}$).

Анализ графа (рис. 5) позволяет составить систему дифференциальных (1) и алгебраических (2) уравнений для нахождения вероятностей технических состояний в текущий момент времени и финальных вероятностей состояний соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d(P_{S_0}(t))}{dt} = -\left(\frac{1}{T_{K\Gamma}} + \frac{1}{T_{K\Phi}} + \frac{1}{T_{CP}}\right) \cdot P_{S_0}(t) + \frac{1}{T_{\Pi\Phi}} \cdot P_{R_1}(t) + \frac{1}{T_{B\Phi}} \cdot (P_{R_2}(t) + P_{R_3}(t)) + \frac{1}{T_{\Pi r}} \cdot P_{R_5}(t) + \frac{1}{T_{Br}} \cdot (P_{R_6}(t) + P_{R_7}(t)); \\
\frac{d(P_{S_0^-}(t))}{dt} = \frac{1}{T_{CP}} \cdot P_{S_0}(t) - \left(\frac{1}{T_{K\Gamma}} + \frac{1}{T_{K\Phi}}\right) \cdot P_{S_0^-}(t) + \frac{1}{T_{\Pi\Phi}} \cdot P_{R_4}(t) + \frac{1}{T_{\Pi r}} \cdot P_{R_8}(t); \\
\frac{d(P_{R_1}(t))}{dt} = \frac{1 - \alpha_\Phi}{T_{K\Phi}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\Pi\Phi}} \cdot P_{R_1}(t); \\
\frac{d(P_{R_2}(t))}{dt} = \frac{\alpha_\Phi}{T_{K\Phi}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{B\Phi}} \cdot P_{R_2}(t); \\
\frac{d(P_{R_3}(t))}{dt} = \frac{1 - \beta_\Phi}{T_{K\Phi}} \cdot P_{S_0^-}(t) - \frac{1}{T_{B\Phi}} \cdot P_{R_3}(t); \\
\frac{d(P_{R_4}(t))}{dt} = \frac{\beta_\Phi}{T_{K\Phi}} \cdot P_{S_0^-}(t) - \frac{1}{T_{\Pi\Phi}} \cdot P_{R_4}(t); \\
\frac{d(P_{R_5}(t))}{dt} = \frac{1 - \alpha_\tau}{T_{K\Gamma}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\Pi r}} \cdot P_{R_5}(t); \\
\frac{d(P_{R_6}(t))}{dt} = \frac{\alpha_\tau}{T_{K\Gamma}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{Br}} \cdot P_{R_6}(t); \\
\frac{d(P_{R_7}(t))}{dt} = \frac{1 - \beta_\tau}{T_{K\Gamma}} \cdot P_{S_0^-}(t) - \frac{1}{T_{Br}} \cdot P_{R_7}(t); \\
\frac{d(P_{R_8}(t))}{dt} = \frac{\beta_\tau}{T_{K\Gamma}} \cdot P_{S_0^-}(t) - \frac{1}{T_{\Pi r}} \cdot P_{R_8}(t).
\end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
-\left(\frac{1}{T_{\text{КТ}}} + \frac{1}{T_{\text{КФ}}} + \frac{1}{T_{\text{СР}}} \right) \cdot P_{S_0} + \frac{1}{T_{\text{ПФ}}} \cdot P_{R_1} + \frac{1}{T_{\text{ВФ}}} \cdot (P_{R_2} + P_{R_3}) + \frac{1}{T_{\text{ПГ}}} \cdot P_{R_5} + \frac{1}{T_{\text{ВГ}}} \cdot (P_{R_6} + P_{R_7}) = 0; \\
\frac{1}{T_{\text{СР}}} \cdot P_{S_0} - \left(\frac{1}{T_{\text{КТ}}} + \frac{1}{T_{\text{КФ}}} \right) \cdot P_{S_0} + \frac{1}{T_{\text{ПФ}}} \cdot P_{R_4} + \frac{1}{T_{\text{ПГ}}} \cdot P_{R_8} = 0; \\
\frac{1 - \alpha_{\text{Ф}}}{T_{\text{КФ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ПФ}}} \cdot P_{R_1} = 0; \\
\frac{\alpha_{\text{Ф}}}{T_{\text{КФ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ВФ}}} \cdot P_{R_2} = 0; \\
\frac{1 - \beta_{\text{Ф}}}{T_{\text{КФ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ВФ}}} \cdot P_{R_3} = 0; \\
\frac{\beta_{\text{Ф}}}{T_{\text{КФ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ПФ}}} \cdot P_{R_4} = 0; \\
\frac{1 - \alpha_{\text{Т}}}{T_{\text{КТ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ПГ}}} \cdot P_{R_5} = 0; \\
\frac{\alpha_{\text{Т}}}{T_{\text{КТ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ВГ}}} \cdot P_{R_6} = 0; \\
\frac{1 - \beta_{\text{Т}}}{T_{\text{КТ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ВГ}}} \cdot P_{R_7} = 0; \\
\frac{\beta_{\text{Т}}}{T_{\text{КТ}}} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{\text{ПГ}}} \cdot P_{R_8} = 0.
\end{array} \right. \quad (2)$$

Добавим условие нормировки для однозначного решения систем уравнений (1)

и (2) – $P_{S_0}(t) + P_{S_0}^-(t) + \sum_{i=1}^8 P_{R_i}(t) = 1$ и $P_{S_0} + P_{S_0}^- + \sum_{i=1}^8 P_{R_i} = 1$ соответственно, что справедливо,

так как все состояния образуют полную группу событий.

Решая системы уравнений (1) и (2) в символьном виде, можно получить аналитические выражение для функции и коэффициента готовности. При этом получаемые аналитические зависимости очень громоздки, что обосновывает применение численного решения данных систем уравнений для конкретных значений

показателей надежности и контроля. Ниже приведен расчет (рис. 6) коэффициента готовности ТС с помощью пакета Mathcad при следующих показателях надежности и характеристиках системы контроля: $T_{CP}=10000$ ч, $T_{K\phi}=0,5$ ч, $T_{II\phi}=0,01$ ч, $\alpha_{\phi}=0,01$, $\beta_{\phi}=0,02$, $T_{B\phi}=4$ ч, $T_{KT}=100$ ч, $T_{IT}=0,5$, $\alpha_t=0,001$, $\beta_t=0,002$, $T_{Bt}=0,5$ ч.

Mathcad - [Kr]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Tsr := 1000

Tkf := 0.5 Tpf := 0.01 alf := 0.01 bet := 0.02 Tvf := 6

Tkt := 24 Tpt := 0.5 at := 0.001 bt := 0.002 Tvt := 0.5

Given

$$\frac{1}{Tpf} \cdot R1 + \frac{1}{Tvf} \cdot (R2 + R3) + \frac{1}{Tpt} \cdot R5 + \frac{1}{Tvt} \cdot (R6 + R7) - S0 \cdot \left(\frac{1}{Tkt} + \frac{1}{Tkf} + \frac{1}{Tsr} \right) = 0$$

$$\frac{1}{Tsr} \cdot S0 - S1 \cdot \left(\frac{1}{Tkt} + \frac{1}{Tkf} \right) + \frac{1}{Tpf} \cdot R4 + \frac{1}{Tpt} \cdot R8 = 0$$

$$\frac{1 - \alpha f}{Tkf} \cdot S0 - \frac{1}{Tpf} \cdot R1 = 0$$

$$\frac{\alpha f}{Tkf} \cdot S0 - \frac{1}{Tvf} \cdot R2 = 0$$

$$\frac{1 - \beta f}{Tkf} \cdot S1 - \frac{1}{Tvf} \cdot R3 = 0$$

$$\frac{\beta f}{Tkf} \cdot S1 - \frac{1}{Tpf} \cdot R4 = 0$$

$$\frac{1 - \alpha t}{Tkt} \cdot S0 - \frac{1}{Tpt} \cdot R5 = 0$$

$$\frac{\alpha t}{Tkt} \cdot S0 - \frac{1}{Tvt} \cdot R6 = 0$$

$$\frac{1 - \beta t}{Tkt} \cdot S1 - \frac{1}{Tvt} \cdot R7 = 0$$

$$S0 + S1 + R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7 + R8 = 1$$

Find(S0, S1, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8) →

Kg := S0 + R1

Kg = 0.874

.85688415542092675625
.42810316270665395802e-3
.16966306277334349774e-1
.10282609865051121075
.50344931934302505463e-2
.17124126508266158321e-6
.17833901484698038114e-1
.17851753237935974089e-4
.89009782579425135440e-5
.17837631779458203170e-7

Рис. 6. Вид окна расчета коэффициента готовности в пакете Mathcad

Так как функциональный контроль проходит в «фоновом режиме», т.е. простоя при переводе из рабочего режима в режим функционального контроля нет ($T_{Пф}=0,01$ ч), то вероятность нахождения в состоянии R_1 можно учитывать при расчетах коэффициента готовности: $K_{Г} = P_{S_0} + P_{R_1}$.

Имитационная модель, связывающая показатели надежности

с показателями и характеристиками тестового и функционального контроля

Расчеты по рассмотренной модели (рис. 5 и б) имеют допущение о том, что $T_{СР}=\text{const}$, но при реальной эксплуатации $T_{СР}\neq\text{const}$, так как большинство ТС работают не постоянно, а, например, периодически или по графику (циклограмме). Следовательно, режимы работы чередуются режимами выключенного состояния (хранения) ТС, при которых средние наработки на отказ могут существенно различаться. Для учета данного аспекта была построена имитационная модель с помощью графического языка Stateflow [16-20] программного продукта Matlab (рис. 7 и 8). Адекватность имитационной модели была подтверждена на тех же исходных данных, которые использовались при решении системы уравнений в пакете Mathcad (рис. 6). Расчеты показывают сходимость результатов численных вычислений в пакете Mathcad и с помощью имитационной модели в программной среде Matlab. Незначительные отклонения можно объяснить случайным характером работы имитационной модели, при проведении нескольких имитаций достигается полное совпадение значений коэффициентов готовности.

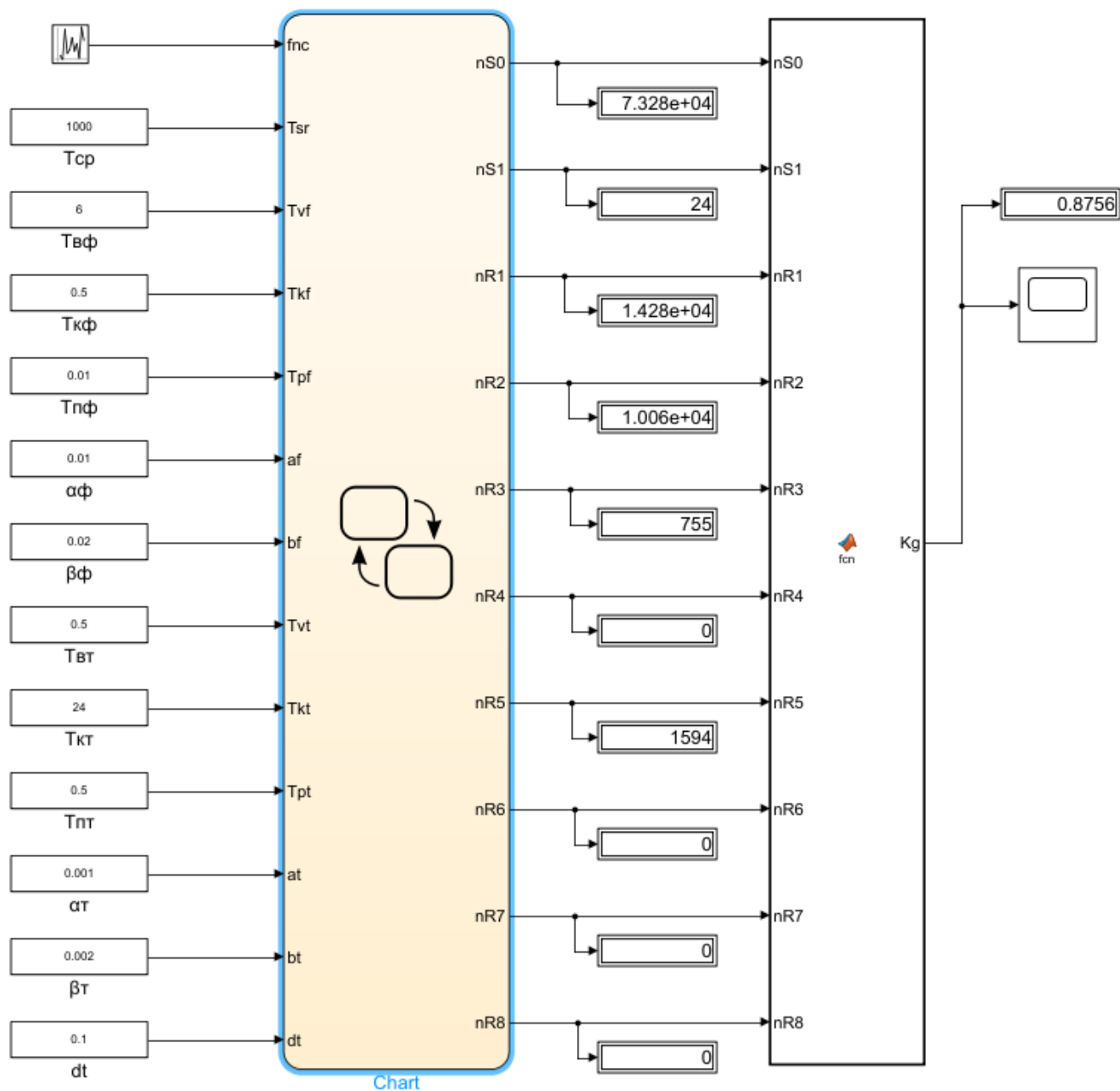


Рис. 7. Имитационная модель, разработанная в среде Stateflow программного продукта Matlab

Для вычисления коэффициента готовности определяются P_{S_0} и P_{R_1} (вероятности нахождения ТС в состояниях S_0 и R_1) путем суммирования числа попаданий в эти состояния и деления на общее число нахождения во всех состояниях.

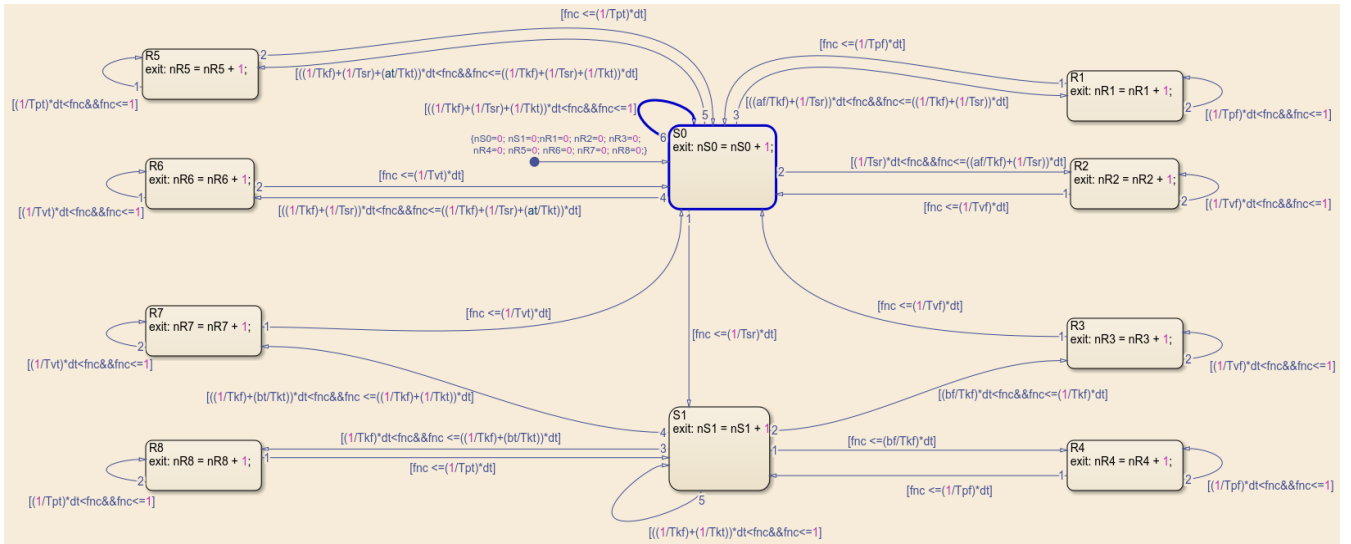


Рис. 8. Содержание блока Chart имитационной модели

Для построения имитационной модели, изображенной на рис. 8, необходимо было получить матрицу вероятностей переходов. Для этого использовалась матрица интенсивностей переходов \mathbf{A} из системы уравнений (2):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 -\left(\frac{1}{T_{K\Gamma}} + \frac{1}{T_{K\Phi}} + \frac{1}{T_{CP}}\right) & \frac{1}{T_{CP}} & \frac{1-\alpha_{\Phi}}{T_{K\Phi}} & \frac{\alpha_{\Phi}}{T_{K\Phi}} & 0 & 0 & \frac{1-\alpha_{\Gamma}}{T_{K\Gamma}} & \frac{\alpha_{\Gamma}}{T_{K\Gamma}} & 0 & 0 \\
 0 & -\left(\frac{1}{T_{K\Gamma}} + \frac{1}{T_{K\Phi}}\right) & 0 & 0 & \frac{1-\beta_{\Phi}}{T_{K\Phi}} & \frac{\beta_{\Phi}}{T_{K\Phi}} & 0 & 0 & \frac{1-\beta_{\Gamma}}{T_{K\Gamma}} & \frac{\beta_{\Gamma}}{T_{K\Gamma}} \\
 \frac{1}{T_{П\Phi}} & 0 & -\frac{1}{T_{П\Phi}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{T_{B\Phi}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B\Phi}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{T_{B\Phi}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B\Phi}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{T_{П\Phi}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{П\Phi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{T_{П\Gamma}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{П\Gamma}} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{T_{B\Gamma}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B\Gamma}} & 0 & 0 \\
 \frac{1}{T_{B\Gamma}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B\Gamma}} & 0 \\
 0 & \frac{1}{T_{П\Gamma}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{П\Gamma}}
 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Затем матрица интенсивностей переходов \mathbf{A} , указанная в (3), была преобразована с помощью соотношения (4) в матрицу вероятностей переходов \mathbf{P} (5):

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot \Delta t + \mathbf{E}, \quad (4)$$

Где \mathbf{P} – матрица вероятностей переходов;

\mathbf{A} – матрица интенсивностей переходов;

\mathbf{E} – единичная матрица;

Δt – интервал времени;

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - \left(\frac{1}{T_{\text{Kr}}} + \frac{1}{T_{\text{K}\phi}} + \frac{1}{T_{\text{CP}}} \right) \cdot \Delta t & \frac{1}{T_{\text{CP}}} \cdot \Delta t & \frac{1 - \alpha_{\phi}}{T_{\text{K}\phi}} \cdot \Delta t & \frac{\alpha_{\phi}}{T_{\text{K}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & \frac{1 - \alpha_{\tau}}{T_{\text{Kr}}} \cdot \Delta t & \frac{\alpha_{\tau}}{T_{\text{Kr}}} \cdot \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \left(\frac{1}{T_{\text{Kr}}} + \frac{1}{T_{\text{K}\phi}} \right) \cdot \Delta t & 0 & 0 & \frac{1 - \beta_{\phi}}{T_{\text{K}\phi}} \cdot \Delta t & \frac{\beta_{\phi}}{T_{\text{K}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & \frac{1 - \beta_{\tau}}{T_{\text{Kr}}} \cdot \Delta t & \frac{\beta_{\tau}}{T_{\text{Kr}}} \cdot \Delta t \\ \frac{1}{T_{\text{П}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{П}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{B}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{B}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{B}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{B}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\text{П}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{П}\phi}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{П}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{П}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{B}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{B}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{B}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{B}\tau}} \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\text{П}\tau}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{\text{П}\tau}} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

Тогда марковский процесс можно преобразовать в марковскую цепь, изображенную на рис. 9.

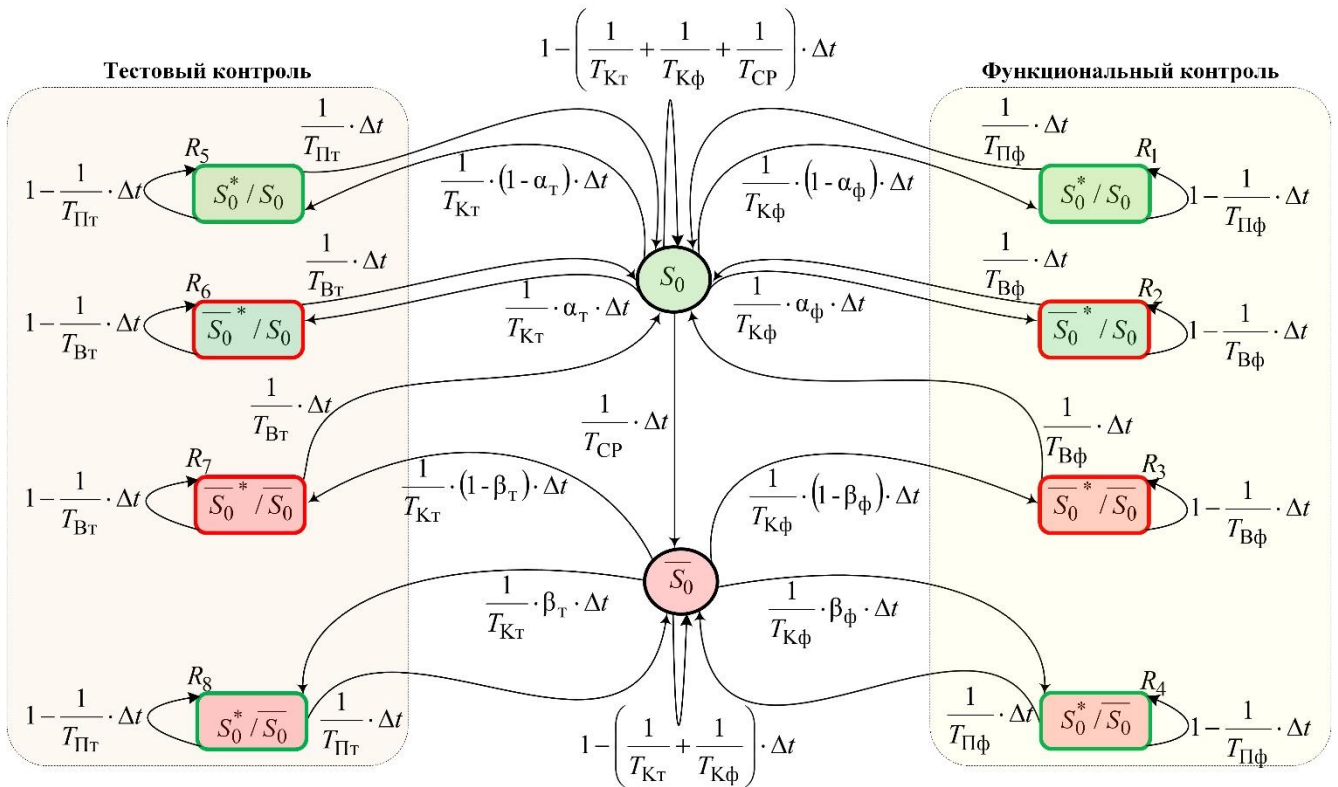


Рис. 9. Модель эксплуатации ТС с использованием тестового и функционального контроля в виде марковской цепи с дискретным временем

При моделировании с помощью датчика случайных чисел переходов из одних состояний в другие или нахождения ТС в определенном состоянии каждому событию отводится своя область, совпадающая с вероятностью данного события. Например, если ТС находится в состоянии R_8 , то в следующий момент времени необходимо смоделировать либо переход в состояние \bar{S}_0 , либо событие остаться в этом же состоянии R_8 , а размеры областей должны соответствовать этим двум вероятностям (рис. 10).

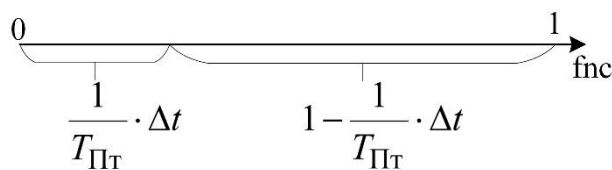


Рис. 10. Пример разбиения на области при моделирования событий

И если сгенерированное число датчика случайных чисел (fnc) попадает в интервал $\left(0; \frac{1}{T_{Пг}} \cdot \Delta t\right]$, т.е. $0 < fnc \leq \frac{1}{T_{Пг}} \cdot \Delta t$, то произойдет переход в состояние $\overline{S_0}$, в противном случае, если $fnc \in \left(\frac{1}{T_{Пг}} \cdot \Delta t; 1\right]$, т.е. $\frac{1}{T_{Пг}} \cdot \Delta t < fnc \leq 1$, ТС останется в состоянии R_8 . По такому же принципу указаны параметры в имитационной модели, изображенной на рисунке 8.

На рис. 11 представлена имитационная модель, на вход которой поступает изменяющееся значение $T_{Ср}$ с учетом работы и хранения ТС. В примере задано, что средняя наработка на отказ в режиме хранения равна 10000 ч, а в режиме работы – 1000 ч. Данные режимы чередуются: режим хранения длится 90 часов, а режим работы – 10 часов. Анализ результатов имитационного моделирования показывает более высокое значение коэффициента готовности, чем ранее представленное (рис. 7), это связано с учетом того, что ТС не работает непрерывно, а может находиться на хранении в выключенном состоянии, в котором показатель интенсивности отказов существенно ниже. Следовательно, учет различных режимов работы ТС позволяет повысить адекватность модели расчета коэффициента готовности. Представленная модель позволяет оценивать коэффициент готовности ТС с учетом показателей и характеристик тестового и функционального контроля, а также с учетом интенсивности использования ТС по назначению.

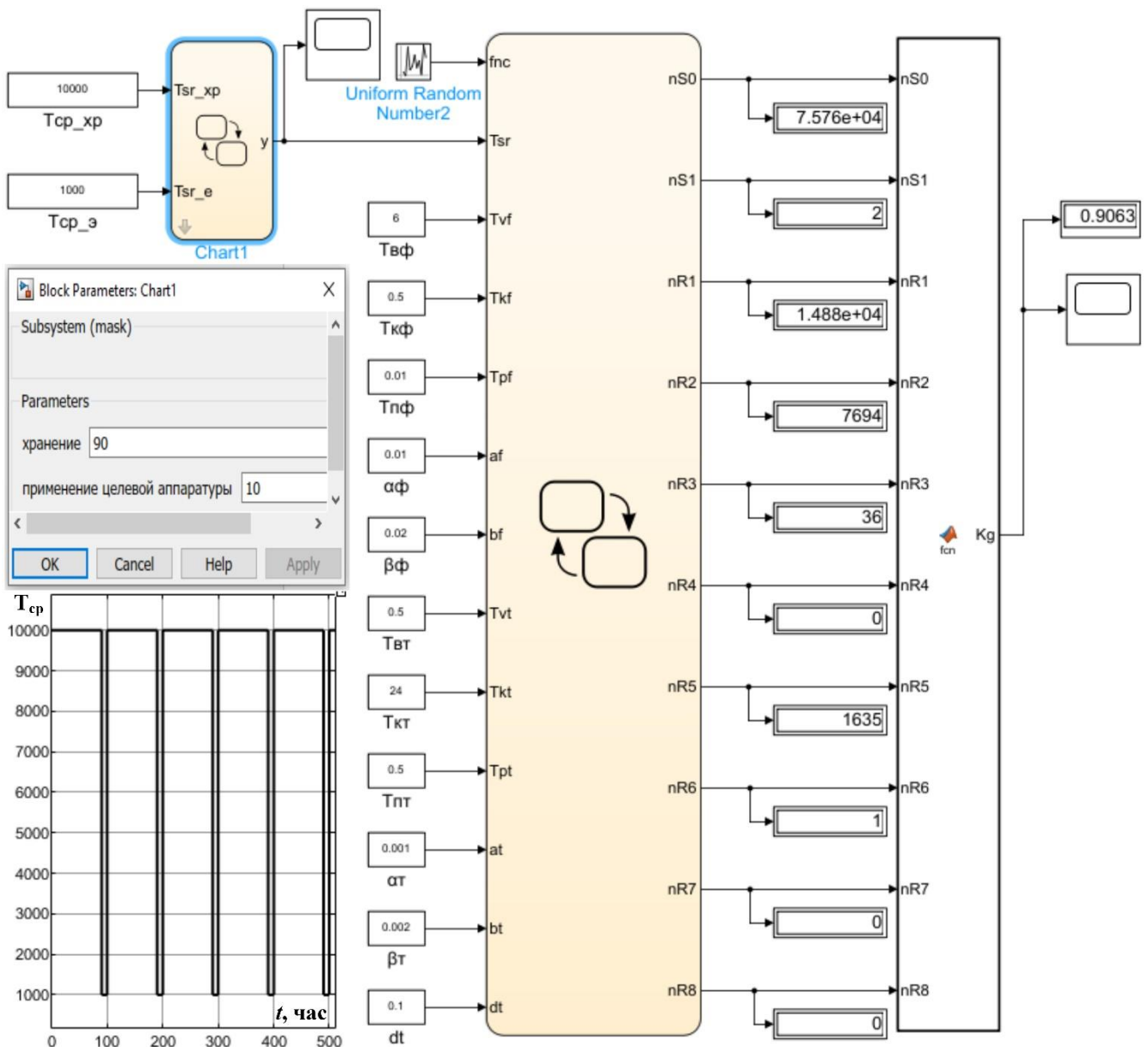


Рис. 11. Вид имитационной модели, на вход которой поступает изменяющееся значение средней наработки на отказ в зависимости от режима хранения или работы

На рис. 12 изображен график изменения коэффициента готовности во времени, т.е. функция готовности. В нижней части рис. 12 представлен отмасштабированный (увеличенный) по оси ординат фрагмент графика для более детального просмотра.

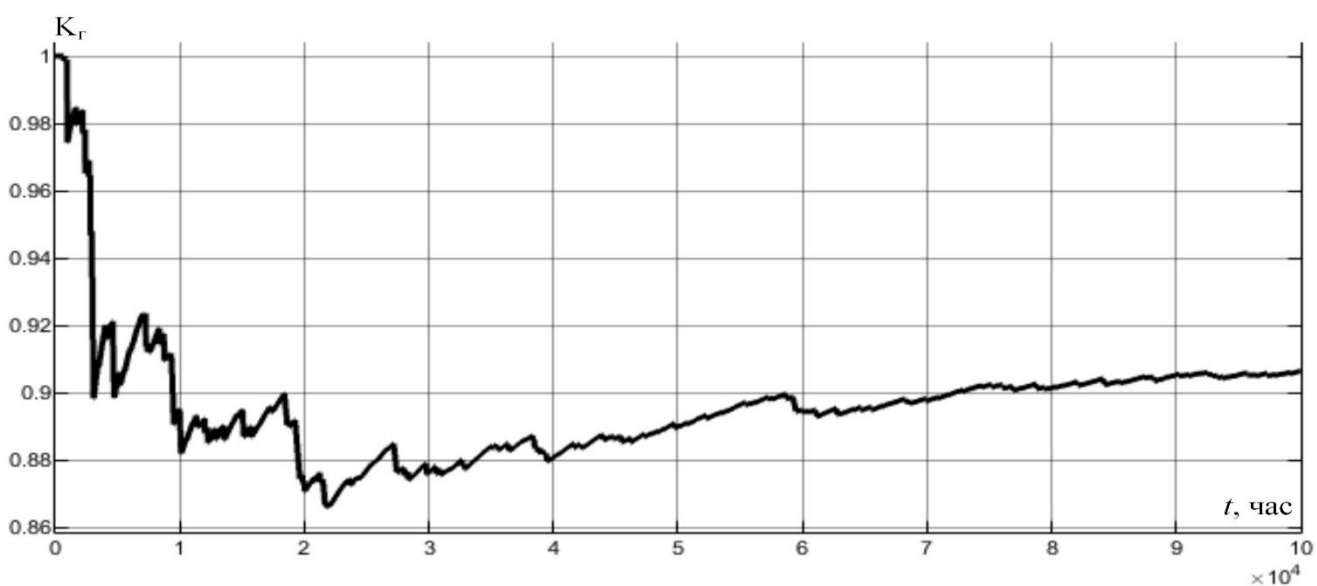
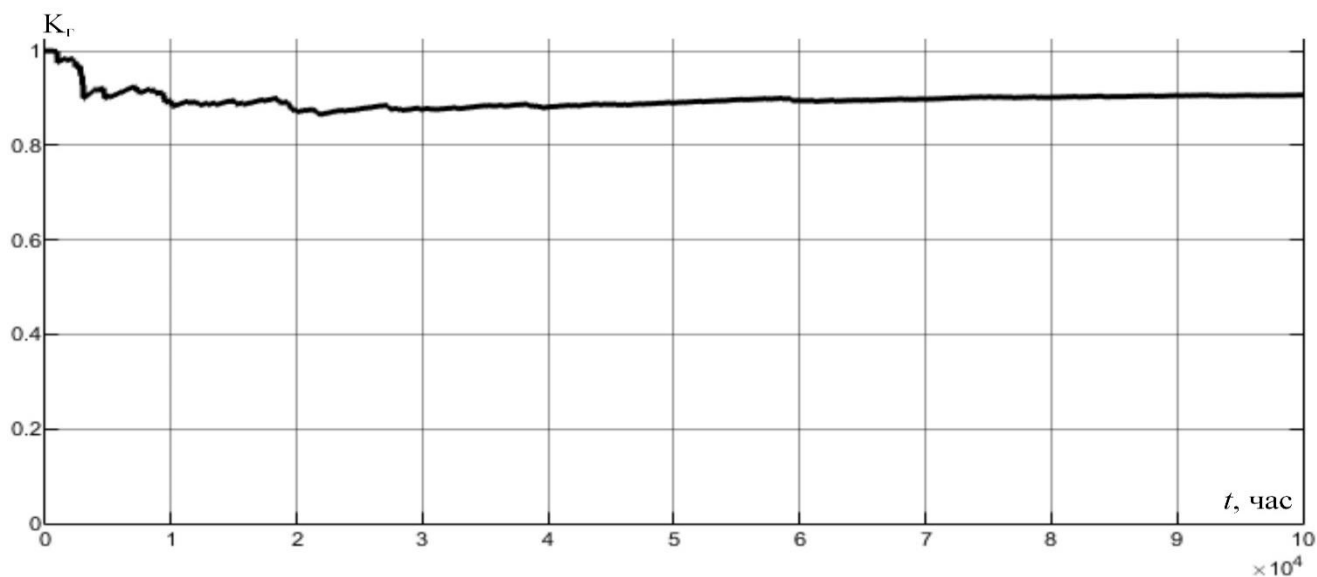


Рис. 12. Графики функции готовности ТС

Из анализа графика (рис. 12) видно, что функция готовности ТС не монотонная и может являться более информативным показателем для дальнейших исследований, например, при проверке требований и установлении границы, ниже которой не должен быть коэффициент готовности в течении всего периода времени.

Заключение

Таким образом, разработанная имитационная модель позволяет связать показатели надежности с показателями тестового и функционального контроля, а

также учитывать различные режимы работы ТС. Данная модель может быть использована при формировании технических заданий для обоснованного предъявления требований к периодичности и достоверности контроля, а также для корректировки периодичности контроля существующих ТС для достижения требуемых значений коэффициента готовности.

Список источников

1. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 45 с.
2. Воронцов В.А., Федоров Е.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>
3. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29688>
4. ГОСТ В 20.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.
5. Клюев В.В. и др. Технические средства диагностирования: справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 671 с.

6. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 485 с.
7. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток: Изд-во ДГТУ, 2010. – 218 с.
8. Гусеница Я.Н., Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б. Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90383>.
9. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Осипов Н.А. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 303-313.
10. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А., Бутырин А.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 652. С. 137–146.
11. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)

12. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
13. Привалов А.Е., Дорожко И.В., Захарова Е.А., Копейка А.Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=101526>
14. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
15. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. - СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
16. Stateflow. Разработка и симуляция машин состояний и конечных автоматов. URL: https://matlab.ru/products/stateflow/stateflow_rus_web.pdf.
17. Agrawal A., Simon G., Karsai G. Semantic translation of Simulink/Stateflow models to hybrid automata using graph transformations // Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2004, vol. 109 (1), pp. 43–56. DOI:[10.1016/j.entcs.2004.02.055](https://doi.org/10.1016/j.entcs.2004.02.055)
18. Hamon G., Rushby J. An operational semantics for Stateflow // International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2004, vol. 9 (5), pp. 447–456. DOI:[10.1007/978-3-540-24721-0_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24721-0_17)
19. MathWorks. Stateflow. URL: <https://www.mathworks.com/help/stateflow/index.html>

20. Steven T. Karris. Introduction to StateFlow with Applications, Orchard Publications, 2017, 520 p.

References

1. *Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya. GOST R 27.102-2021* (Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions. State Standard 27.102-2021), Moscow, FGBU «RST», 2021, 45 p.

2. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58817>

3. Zavedeev A.I., Kovalev A.Yu. *Trudy MAI*, 2012, no. 54. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29688>

4. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya. GOST V 20.911-89* (Technical diagnostics. Terms and definitions. State Standard V 20.911-89), Moscow, Izd-vo standartov, 1990, 12 p.

5. Klyuev V.V. et al. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: spravochnik* (Technical diagnostic tools: handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 671 p.

6. Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* (Diagnostics and reliability of automated systems), Perm', Izd-vo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 485 p.

7. Gumenyuk V.M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem* (Reliability and diagnostics of electrical systems), Vladivostok, Izd-vo DGTU, 2010, 218 p.

8. Gusenitsa Ya.N., Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Petukhov A.B. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>.
9. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Osipov N.A. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 303-313.
10. Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Osipov N.A., Butyrin A.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2016, no. 652, pp. 137–146.
11. Kopeika E.A., Verbin A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171411>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-22
12. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
13. Privalov A.E., Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Kopeika A.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>
14. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory), Saint Petersburg, BKhV-Petersburg, 2006, 702 p.
15. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of hardware and software systems), Saint Petersburg, Piter, 2005, 479 p.
16. *Stateflow. Razrabotka i simulyatsiya mashin sostoyanii i konechnykh avtomatov*. URL: https://matlab.ru/products/stateflow/stateflow_rus_web.pdf.
17. Agrawal A., Simon G., Karsai G. Semantic translation of Simulink/Stateflow models to hybrid automata using graph transformations, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2004, vol. 109 (1), pp. 43–56. DOI: 10.1016/j.entcs.2004.02.055

18. Hamon G., Rushby J. An operational semantics for Stateflow, *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 2004, vol. 9 (5), pp. 447–456. DOI:10.1007/978-3-540-24721-0_17
19. MathWorks. *Stateflow*. URL: <https://www.mathworks.com/help/stateflow/index.html>
20. Steven T. Karris. *Introduction to StateFlow with Applications*, Orchard Publications, 2017, 520 p.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023

Одобрена после рецензирования 20.05.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 12.05.2023; approved after reviewing on 20.05.2023; accepted for publication on 27.06.2023