

УДК – 629.73.05

**Имитационная модель оценивания коэффициента готовности
сложных технических систем с учетом характеристик процесса
диагностирования**

Привалов А.Е.*, Дорожко И.В., Захарова Е.А.***, Копейка А.Л.******

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: cerebrum203@yandex.ru*

***e-mail: Doroghko-Igor@yandex.ru*

****e-mail: mashenkokatay@mail.ru*

*****e-mail: koppya252@mail.ru*

Аннотация

В работе предложена и исследована имитационная модель оценивания комплексного показателя надежности (коэффициента готовности) с учетом показателей и программ диагностирования. Имитационная модель позволяет учитывать расширенный состав технических состояний и ошибки проверок.

Ключевые слова: коэффициент готовности, диагностирование, ошибки проверок, достоверность диагностирования, марковская модель.

Введение

Правильное оценивание показателей надежности является одним из основных факторов повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем

(СТС). Основным показателем, используемым для исследования надежности является коэффициент готовности, под которым в соответствии с ГОСТ 27.002-15 [1] понимается вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. В настоящее время для расчета коэффициента готовности используются показатели, характеризующие безотказность СТС (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы) и показатели, характеризующие систему восстановления работоспособности СТС (интенсивность и среднее время восстановления).

Среднее время восстановления включает в себя время диагностирования и время выполнения работ по восстановлению работоспособности СТС (например, время замены неисправного блока, время переключения на резервный комплект). При вычислении коэффициента готовности не учитываются ошибки диагностирования, которые могут существенно повлиять на коэффициент готовности системы. Например, при неправильном определении неисправного блока выполняется комплекс работ по замене исправного блока на исправный, при этом СТС так и останется неисправной.

В работах [2,3] рассмотрено влияние ошибок контроля на коэффициент готовности с применением марковской модели. В развитие данного подхода в настоящей статье предлагается новая имитационная модель, позволяющая оценить влияние на коэффициент готовности СТС следующих факторов:

- программы диагностирования;

- интервалов времени между циклами выполнения программы диагностирования;
- характеристик проверок, входящих в программу диагностирования (длительности проверок, ошибок первого и второго рода).

Постановка задачи

Современные СТС, как правило, являются системами управления и включают в себя три основных компонента: объект управления (ОУ), управляющий орган (УО) и систему обратной связи (СОС).

Объект управления представляет собой техническую систему, которая может находиться в работоспособном или в одном из неработоспособных состояний. В рамках исследования не рассматриваются самоустраняющиеся отказы, следовательно, ОУ может перейти из работоспособного в одно из неработоспособных состояний с заданной интенсивностью.

Управляющий орган предназначен для формирования и выдачи управляющих воздействий на ОУ в соответствии с целевым назначением СТС. В задачу УО также входит восстановление работоспособности ОУ в случае возникновения отказов.

Система обратной связи в части, касающейся обеспечения надежности СТС, выполняет функции контроля и диагностирования ОУ. В ее задачу входит определение факта отказа ОУ (контроль) и места отказа (диагностирование). Процесс диагностирования характеризуется последовательностью проверок

(программой диагностирования) и параметрами проверок: длительностью, ошибками первого и второго рода. Проблеме построения оптимальных по различным показателям (достоверности, продолжительности, информативности) программ диагностирования посвящено множество научных трудов [4-11], поэтому в рамках данной статьи программа диагностирования полагается построенной по одному из известных алгоритмов.

Следует отметить, что математические модели всех компонентов СТС в озвученной постановке достаточно хорошо изучены. В рамках исследования поставлена задача оценивания коэффициента готовности СТС при наличии системы контроля и диагностирования, функционирующей по заданной программе [12]. Таким образом, можно осуществить математическую постановку задачи.

Дано:

1. Модель объекта диагностирования:

$$M_0 = \langle S, \Pi, \hat{\Pi}, T, A, B, P^0, \Lambda, M, T_d, \chi \rangle$$

где:

$S = \{S_i \mid i = \overline{0, n}\}$ – множество технических состояний системы (S_0 – работоспособное состояние, S_1, \dots, S_n – неработоспособные состояния, обусловленные одиночными отказами функционирования элементов, с глубиной до которых осуществляется диагностирование;

$\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, m}\}$ – множество проверок диагностических параметров;

$\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_{ij} \mid i = \overline{0, n}; j = \overline{1, m}\}; \hat{\pi}_{ij} = \{0, 1\}$ – множество модельных исходов проверок

диагностических параметров («0» – «не норма», «1» – «норма»);

$T_{\pi} = \{\tau_j \mid j = \overline{1, m}\}$ – множество длительностей проверок;

$A = \{\alpha_j \mid j = \overline{1, m}\}$ – множество вероятностей ошибок первого рода;

$B = \{\beta_j \mid j = \overline{1, m}\}$ – множество вероятностей ошибок второго рода;

$P^0 = \{p_i^0 \mid i = \overline{0, n}\}$ – множество априорных вероятностей работоспособных

видов технических состояний в начальный момент времени ($t = 0$);

$\Lambda = \{\lambda_i \mid i = \overline{1, n}\}$ – множество интенсивностей переходов из состояния S_0 в

состояния S_i (интенсивности отказов);

$M = \{\mu_i \mid i = \overline{1, n}\}$ – множество интенсивностей переходов из состояний S_i в

состояние S_0 (интенсивности восстановления);

T_D – интервал времени между циклами диагностирования (периодичность диагностирования);

$\chi: S \times \Pi \rightarrow \hat{\Pi}$ – отображение, ставящее в соответствие проверке π_j ее исход, если система находится в состоянии S_i .

2. Модель программы диагностирования

$M_{\Pi} = \langle M_0, \Omega, G, \Psi \rangle$.

Здесь Ω – множество информационных состояний программы диагностирования (информационное состояние представляет собой подмножество

«подозреваемых» технических состояний, в одном из которых может находиться объект в текущей фазе процесса диагностирования)

$$\Omega = \{\omega_l \mid \omega_l \subseteq S\}; \quad l = \overline{1, W}, \quad W = \sum_{k=1}^{m+1} C_{n+1}^k = 2^{n+1} - 1;$$

G – матрица переходов между информационными состояниями

$$G = \{(\omega_l, \omega_k) \mid \varphi(\omega_l, \omega_k)\};$$

$(\varphi(\omega_l, \omega_k)) = 1$, если процесс диагностирования может перейти из ω_l в ω_k ,

$\varphi(\omega_l, \omega_k) = 0$ в противном случае);

$$\Psi: G \rightarrow \Pi \times \hat{\Pi}.$$

Требуется: оценить влияние программы диагностирования на коэффициент готовности СТС:

$$K_{\Gamma} = P(S_0).$$

2. Разработка модели оценивания коэффициента готовности.

Модель процесса отказов и восстановления системы, как правило, представляется в форме марковского процесса, граф состояний которого представлен на рис. 1а. Данная модель позволяет определить коэффициент готовности, однако не учитывает характеристики процесса диагностирования. Для их учета в процессе восстановления введем дополнительное состояние $S_{\text{д}}$, обозначающее режим диагностирования (рис. 1б.) Интенсивность перехода в состояние $S_{\text{д}}$ обратно пропорциональна интервалу между циклами диагностирования $T_{\text{д}}$ (т.е. периодичности диагностирования). Из состояния $S_{\text{д}}$ процесс диагностирования может перейти в состояние S_0 при верном результате

диагностирования и обратно в текущее техническое состояние S_i ($i = \overline{1, n}$) в случае ошибки диагностирования. Очевидно, что рассматриваемый процесс не является марковским, поскольку переход из состояния S_D в состояние S_i зависит от предыдущего состояния.

Для того, чтобы процесс диагностирования был марковским введем вместо состояния S_D множество из $(n+1)$ состояний $\{S_D/S_i |, i = \overline{0, n}\}$ (рис. 1в). Переход из состояния S_i в состояние $\{S_D/S_i |, i = \overline{0, n}\}$ осуществляется с интенсивностью $1/T_D$. Интенсивности переходов определяются следующим образом: в состояние $S_0 - d \cdot \mu_i$, где d – достоверность программы диагностирования; в состояние $S_i - (1-d) \cdot \mu_{cp}$, где μ_{cp} – средняя интенсивность восстановления при ошибочном результате диагностирования.

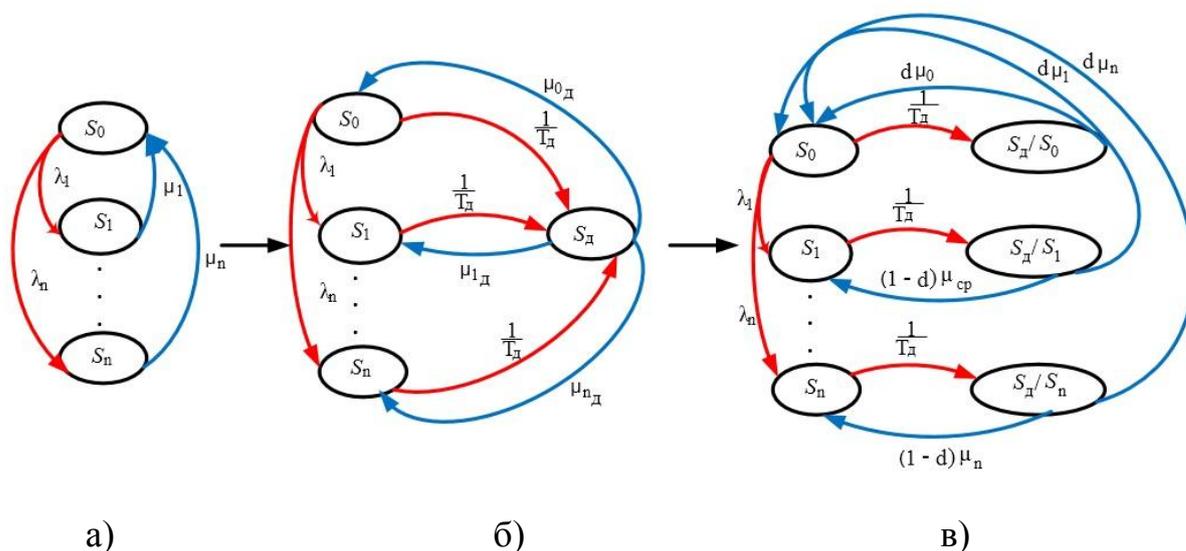


Рис. 1 Модель процесса отказов и восстановления системы

Данная модель позволяет учитывать общую достоверность диагностирования, однако с ее помощью невозможно оценить влияние характеристик отдельной

проверки на коэффициент готовности. Для этого заменим каждое состояние S_d/S_i графом, задающим программу диагностирования (рис. 2), в котором определим вероятности ошибок диагностирования по следующему правилу:

$$\gamma_{lk}/S_i = \begin{cases} 1 - \alpha_j, & \text{если } (\Psi(\langle \omega_1, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 1 \rangle) \wedge (\chi(S_i, \pi_j) = 1); \\ \alpha_j, & \text{если } (\Psi(\langle \omega_1, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 0 \rangle) \wedge (\chi(S_i, \pi_j) = 1); \\ 1 - \beta_j, & \text{если } (\Psi(\langle \omega_1, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 0 \rangle) \wedge (\chi(S_i, \pi_j) = 0); \\ \beta_j, & \text{если } (\Psi(\langle \omega_1, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 1 \rangle) \wedge (\chi(S_i, \pi_j) = 0). \end{cases}$$

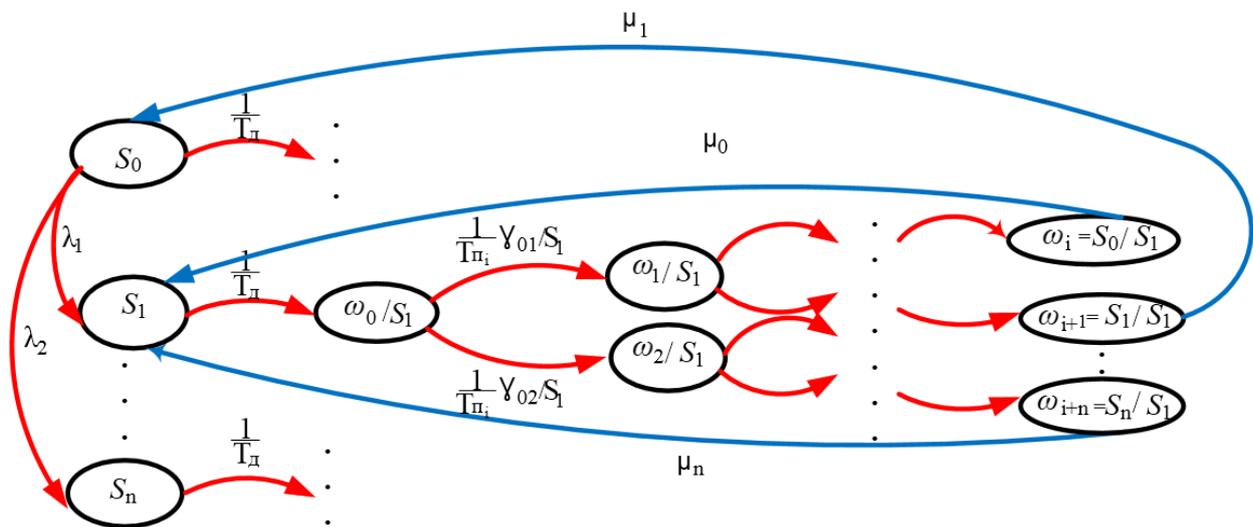


Рис.

2 Фрагмент графа, задающий программу диагностирования

3. Имитационная модель определения коэффициента готовности.

Пусть объект диагностирования состоит из двух блоков (рис. 3).

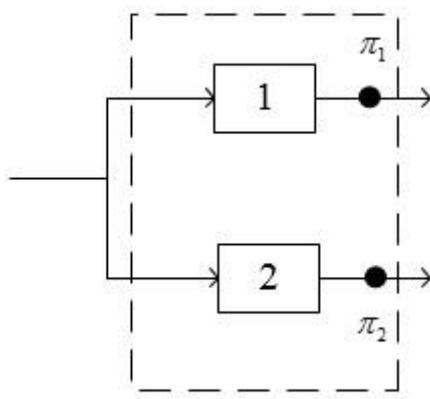


Рис. 3 Объект диагностирования

Диагностическую модель объекта можно представить в форме таблицы 1.

Таблица 1

Общий вид диагностической модели

По	S_i	π_1	π_2	P^0	Λ	M
Система исправна	S_0	1	1	P_0^0		
Неисправен блок №1	S_1	0	0	P_1^0	λ_1	μ_1
Неисправен блок №2	S_2	0	1	P_2^0	λ_2	μ_2
Ошибки 1-го рода	A	α_1	α_2			
Ошибки 2-го рода	B	β_1	β_2			

исходным данным диагностической модели построим программу диагностирования:

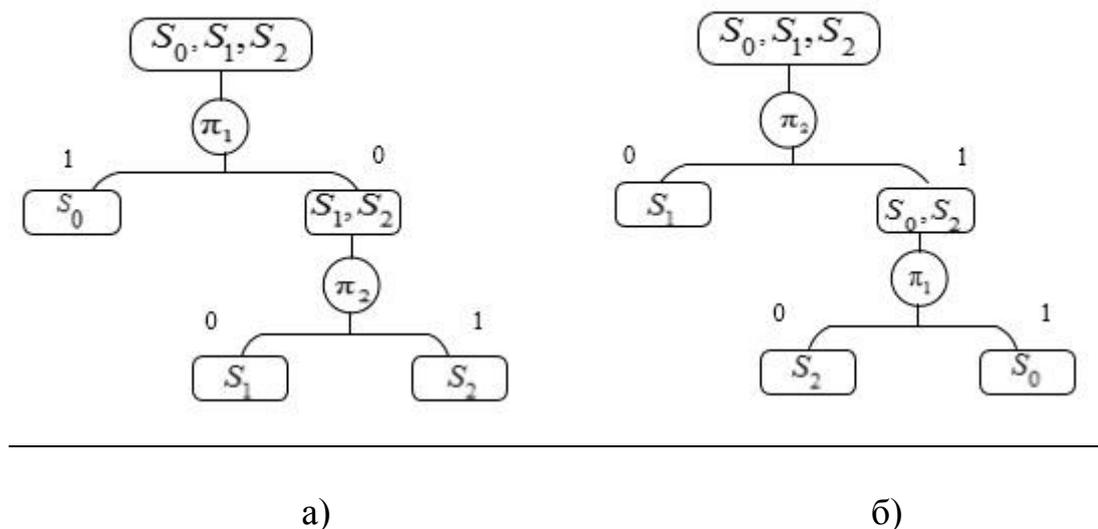


Рис. 4 Программы диагностирования с разной последовательностью проверок

Для вывода аналитической зависимости коэффициента готовности от показателей диагностирования, реализуем программу диагностирования (рис. 4а) в виде марковской модели, представленной на рисунке 5.

На рисунке 5 введены следующие обозначения [13-15]: S_0 – работоспособное состояние, S_1 и S_2 – неработоспособные технические состояния; $S_0S_1S_2/S_0$ – режим диагностирования для состояния S_0 ; $S_0S_1S_2/S_1$ – режим диагностирования для состояния S_1 , $S_0S_1S_2/S_2$ – режим диагностирования для состояния S_2 ; S_0/S_0 – фиксация работоспособного состояния S_0 , при этом объект действительно работоспособен; S_1S_2/S_0 – фиксация неработоспособного состояния S_1S_2 , при этом объект находится в работоспособном состоянии; S_1/S_0 – фиксация неработоспособного состояния S_1 , при этом объект работоспособен; S_2/S_0 – фиксация неработоспособного состояния S_2 , при этом объект работоспособен; T_{B0} – среднее время восстановления (для тех состояний, в которых зафиксировано

состояние S_0); T_{B1} – среднее время восстановления для технического состояния S_1 ; T_{B2} – среднее время восстановления для технического состояния S_2 ; τ_1 – длительность проверки π_1 ; τ_2 – длительность проверки π_2 ; T_d – интервал времени между циклами диагностирования; α_1, α_2 – вероятности ошибок 1-го рода для проверок π_1 и π_2 ; β_1, β_2 – вероятности ошибок 2-го рода для проверок π_1 и π_2 соответственно.

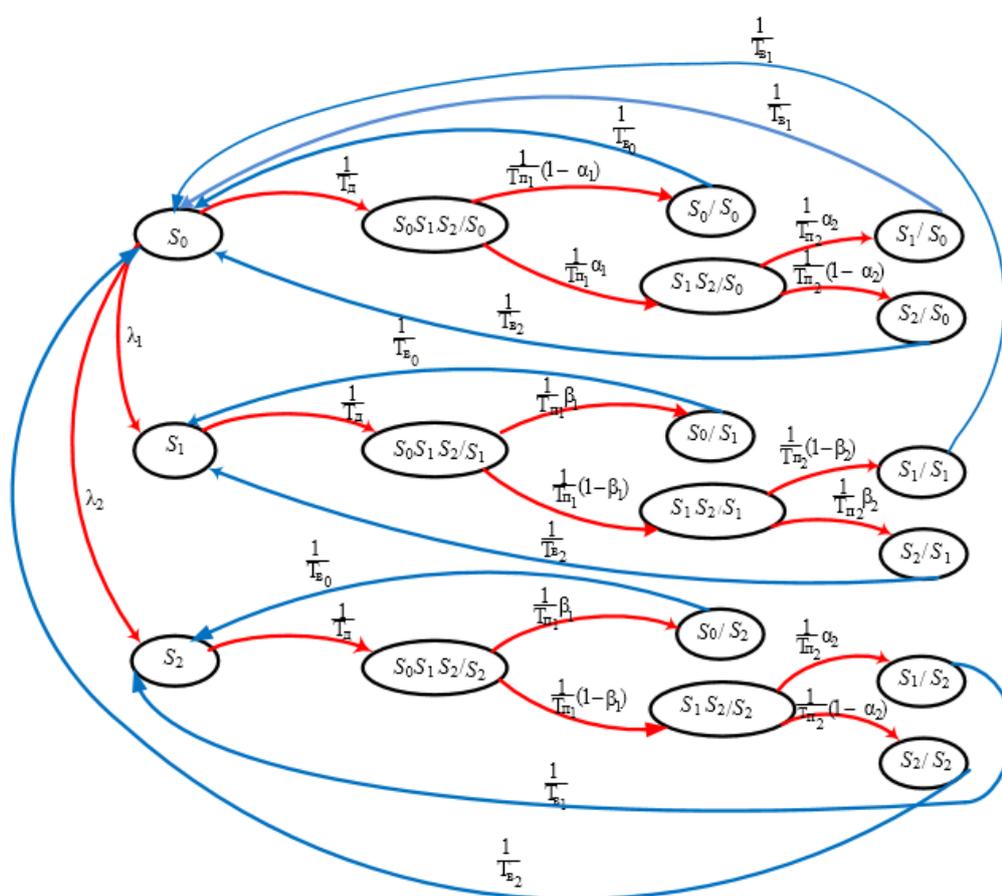


Рис. 5 Модель марковского процесса для программы диагностирования, изображенной на рисунке 4 а)

Модель, представленная на рисунке 5, по сравнению с ранее известными имеет следующие преимущества:

- возможность рассмотрения расширенного состава технических состояний;

- возможность учета ошибок α и β для всех проверок.

Вывод аналитического выражения для коэффициента готовности K_r - довольно трудоемкая операция. Трудоемкость возрастает с усложнением графа, т. е. при стремлении учесть большее количество технических состояний, факторов, влияющих на процесс диагностирования [16-19]. В связи с этим решение задачи такого плана целесообразно проводить с помощью имитационной модели.

Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложной технической системы для программы диагностирования с учетом показателей диагностирования

С помощью инструмента моделирования Stateflow программного пакета Matlab разработана модель, которая позволяет моделировать дискретно-событийные модели [20]. Модель СТС в среде Stateflow для оценивания коэффициента готовности при проведении диагностирования по программе №1 (рис. 4а) представлена на рисунке 6, а ее подробное описание – на рисунке 7.

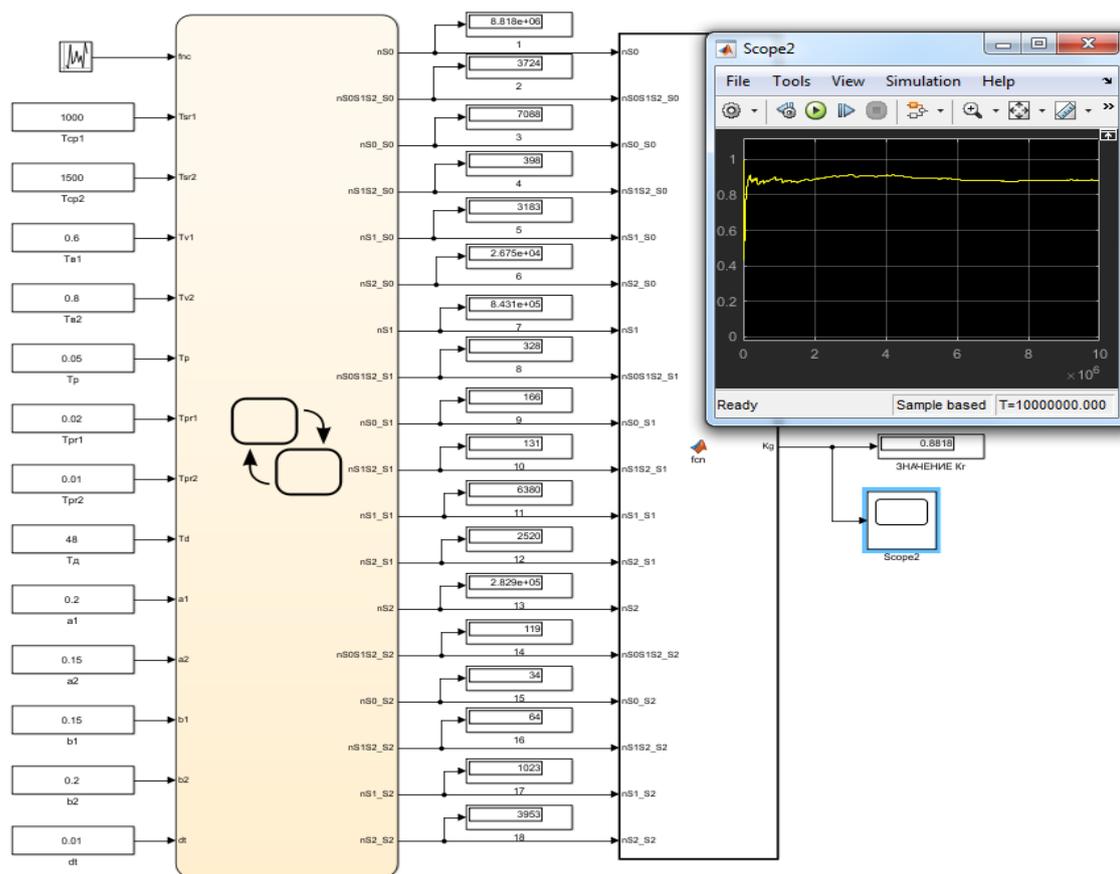


Рис. 6 Модель СТС в среде Matlab

Исходными данными для имитационного моделирования являлись:

$$T_{cp1}=1000 \text{ ч}, T_{cp2}=1500 \text{ ч}, T_{b1}=0.6 \text{ ч}, T_{b2}=0.8 \text{ ч}, T_{п}=0.05 \text{ ч}, \tau_1=0.02 \text{ ч}, \tau_2=0.01 \text{ ч}, T_{д}=48 \text{ ч}, \alpha_1=0.2, \alpha_2=0.15, \beta_1=0.15, \beta_2=0.2,$$

где:

T_{cp1}, T_{cp2} - средняя продолжительность безотказной работы 1 и 2-го элемента.

Для программы диагностирования, изображенной на рисунке 4б, модель СТС строится аналогично, отличительной особенностью будет другой набор информационных состояний, так как различен порядок проверок.

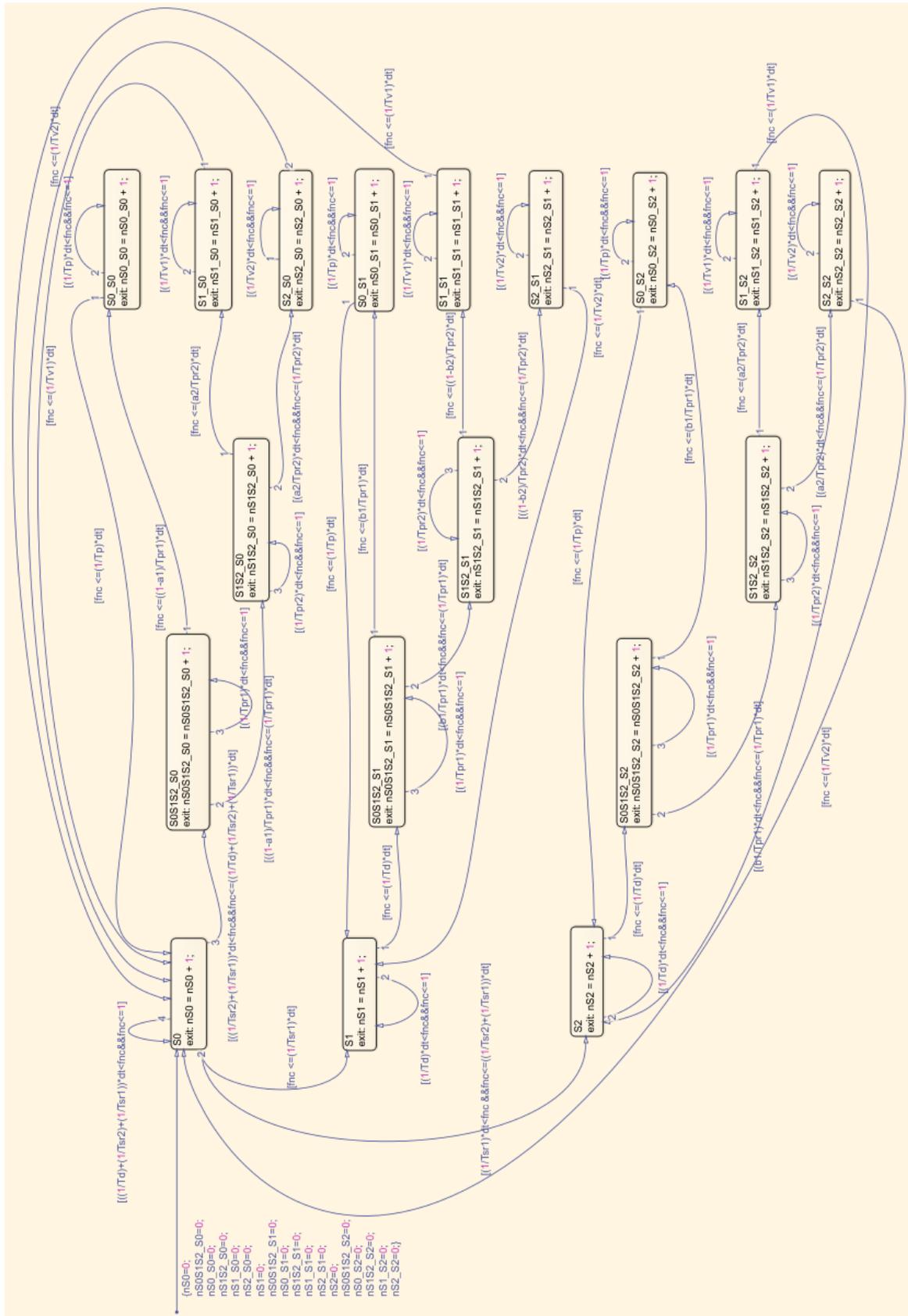


Рис. 7. Модель СТС для программы диагностирования №1, построенная в среде Stateflow программного пакета Matlab

Результатами имитационного моделирования являются значения коэффициента готовности при различных программах диагностирования – $K_{r1}=0.88$

и $K_{Г2}=0.90$, что позволяет сделать вывод о влиянии программы диагностирования на значение коэффициента готовности.

На рисунке 8 представлена зависимость коэффициента готовности от периодичности диагностирования при различных программах диагностирования.

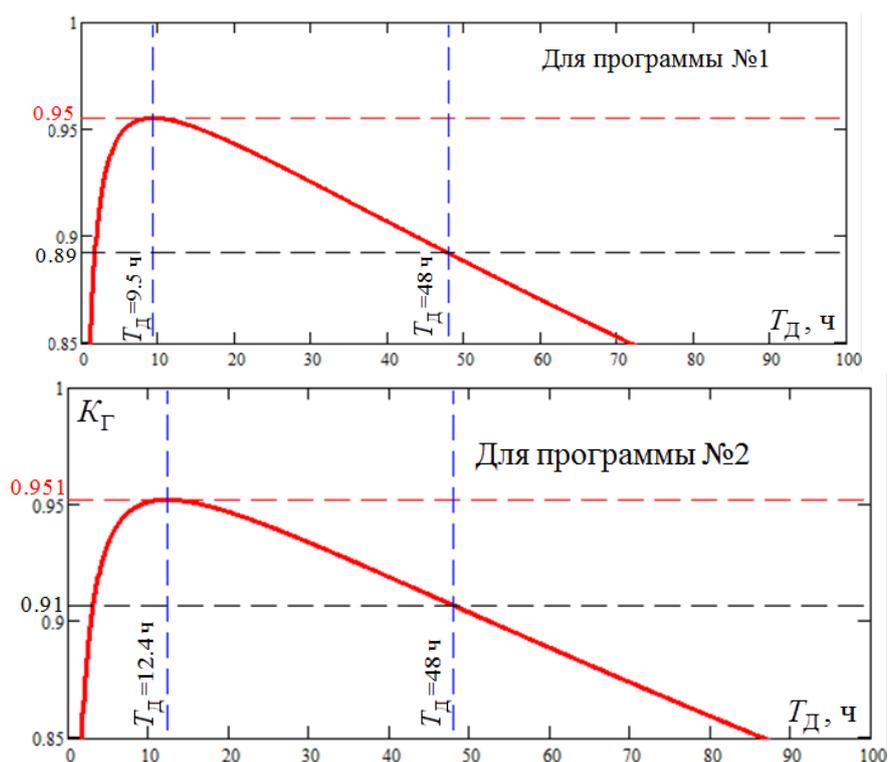


Рис. 8 Графики зависимости коэффициента готовности от периодичности диагностирования при различных программах диагностирования

На рисунке 9 представлены графики зависимости коэффициента готовности от вероятностей ошибок 1 и 2 рода. Вероятности ошибок при этом варьировались в пределах от 0 до 1 и полагались равными: $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta_1 = \beta_2$, что вполне обосновано в случаях, когда проверки отличаются лишь местом измерения диагностического признака, а средства измерения при этом одинаковы.

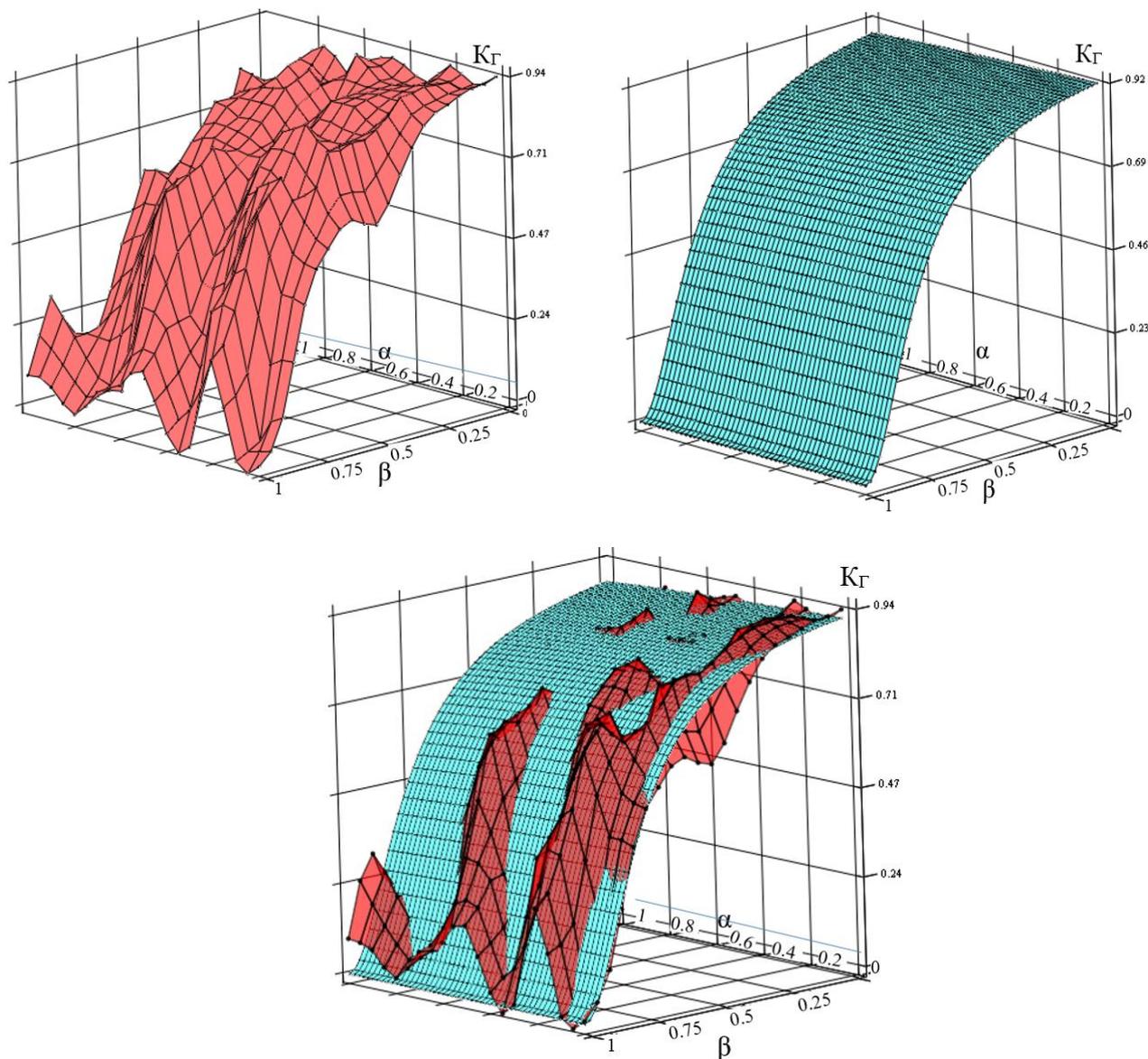


Рис. 9 Зависимости коэффициента готовности от вероятностей ошибок проверок, полученные в результате имитационного моделирования и аналитическим способом

Из рисунка 9 видно, что коэффициент готовности чувствителен к ошибке 2-го рода в данном случае. Пути дальнейших исследований видятся в исследовании других программ диагностирования, при которых коэффициент готовности чувствителен к вероятности ошибок 1-го рода.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета влияния характеристик и показателей диагностирования на коэффициент готовности СТС. Разработанные модели могут быть использованы для определения ориентировочных значений периодичности контроля и диагностирования СТС, а также для формирования последовательности и состава проверок с целью повышения коэффициента готовности.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с расширением состава технических состояний и проверок диагностических признаков.

Библиографический список

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002-15. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
2. 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.
3. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
4. Дмитриев А.К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем: учебное пособие. – СПб.: ВКУ имени А.Ф. Можайского, 1999. – 171 с.
5. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Оценивание достоверности проверок

непрерывных признаков при диагностировании технического объекта // Известия вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. № 9. С. 3 - 10.

6. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
7. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. – Л.: МО СССР, 1987. – 521 с.
8. Мышко В.В., Кравцов А.Н., Копкин Е.В., Чикуров А.В. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.
9. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
10. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В. Анализ технического состояния космических средств. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 189 с.
11. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В. Контроль и диагностика космических средств: - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 198 с.
12. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного государственного технического университета, 2010. – 218 с.
13. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ В 20.911-89. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
14. Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Изд-во «Машиностроение», 1978. – 241 с.

15. Ключев В.В. и др. Технические средства диагностирования: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 671с.
16. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29688>
17. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
18. Бочкарев С.В. Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 485 с.
19. Бородин В.В., Петраков А.М. Модель надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33035>
20. Дьяконов В.П. Simulink5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008.– 784 с.

Статья поступила в редакцию 20.12.2018