

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 629.192 (035)

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.В. Сахаров, В.М. Атаманюк  
(Военная академия РВСН имени Петра Великого)  
А.В. Романов  
(Военный авиационный инженерный университет)

*Показана взаимосвязь между показателями надёжности сложных технических систем, периодичностью проводимого технического обслуживания и показателем его эффективности, учитывающим критичность элементов системы по надёжности и эффективность их технического обслуживания. Даны рекомендации по обоснованию требуемой эффективности технического обслуживания с учётом критичности элементов структурной схемы для подтверждения требований к надёжности системы. Сформулирована задача оптимизации программы технического обслуживания, позволяющей с наилучшей эффективностью обеспечивать предъявленные к её надёжности требования в течение всего гарантийного срока службы при ограничении на затраты, необходимые для её реализации.*

**Ключевые слова:** надёжность, сложная техническая система, структурная схема надёжности, оптимальное техническое обслуживание, критичность по надёжности.

### Введение

Современная ракетно-космическая техника характеризуется высокими требованиями, предъявляемыми к её эксплуатационной надёжности, основными путями обеспечения которой являются использование высоконадёжных составных частей и оптимизация их включения в структурную схему надёжности. Поскольку проблема обеспечения и контроля эксплуатационной надёжности дорогостоящей высоконадёжной техники характерна и для ряда других отраслей промышленности, в дальнейшем, с целью придания большей общности решаемой задаче, объект ракетно-космической техники будем именовать сложной технической системой (СТС), а её составные части – элементами СТС.

Учитывая существенный вклад надёжности СТС в эффективность её функционирования на этапе эксплуатации, большое внимание уделяется периодическому контролю надёжности, по результатам которого принимается решение о возможности дальнейшего использования СТС по целевому назначению, либо, в случае появления отказов – о ремонте (замене) СТС или отдельных её элементов.

Для высоконадёжных СТС с периодическим контролем характерно задание требований к надёжности по одному или двум контрольным уровням [1, 2].

Требование к надёжности СТС по одному контрольному уровню может задаваться в виде:

$$\underline{P}_{\text{СТС}} \geq P_{\text{тр}} \text{ при } \beta \leq \beta_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $\underline{P}_{\text{СТС}}$  – нижняя доверительная граница (НДГ) вероятности безотказной работы (ВБР) СТС;  $P_{\text{тр}}$  – требуемое значение ВБР;  $\beta = 1 - \gamma$  – риск заказчика, связанный с доверительной вероятностью  $\gamma$  принятия решения о соответствии СТС предъявленному требованию по надёжности;  $\beta_{\text{доп}}$  – допустимое значение риска заказчика.

Необходимо заметить, что, как правило, требование вида (1) должно выполняться на протяжении всего гарантированного срока службы (ГСС) СТС (обычно несколько лет). С учётом неизбежного старения как СТС в целом, так и отдельных её элементов, возможного появления отказов, к концу ГСС уровень показателя надёжности СТС принимает минимальное значение. Изменение во времени показателя надёжности при старении неконтролируемых в процессе эксплуатации СТС и её элементов описывают обычно экспоненциальным законом [1, 2]:

$$\underline{P}(t) = \underline{P}_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $\underline{P}_0$  – НДГ вероятности безотказной работы в начале эксплуатации;  $\lambda$  – интенсивность отказов.

В связи с этим на момент ввода СТС в эксплуатацию должно быть подтверждено значение НДГ ВБР, обеспечивающее к концу ГСС выполнение требования (1). Однако в отсутствие периодического контроля это не всегда возможно, в то время как его проведение позволяет:

– выявить возможные отказы элементов СТС с последующим их устранением путём проведения ремонта или замены;

– получить дополнительную информацию о надёжности СТС и её элементов, которую можно учесть при уточнении подтверждённой с заданной достоверностью НДГ ВБР.

С целью автоматизации процесса проведения технического обслуживания (ТО) СТС, в первую очередь, для проверки допусков параметров её функционирования может применяться контрольно-проверочная аппаратура, для которой разрабатываются программы проверки состояния СТС. Программы проверки могут включать элементы моделирования условий штатного функционирования СТС с контролем нормального срабатывания отдельных её элементов. Однако, как показывает практика, не все элементы СТС могут быть проконтролированы в процессе проведения ТО, что не позволяет с достаточной уверенностью судить об их работоспособности.

Для оценки степени охвата элементов СТС контролем рядом авторов используется понятие «глубина контроля», которая характеризуется показателем  $\delta = m/n$ , определяемым как отношение числа подвергнутых контролю элементов СТС  $m$  к их общему числу  $n$ . При этом данный показатель используется одинаково для различных структурных схем надёжности СТС и участвует при оценке подтверждённой НДГ ВБР после проведённого ТО. Так в работе [3] показатель глубины контроля предложено оценить по формуле

$$\delta = \frac{1}{\lambda_{\text{СТС}}} \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{СТС}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  – интенсивность отказов СТС, состоящей из  $n$  элементов при контролируемом их количестве  $m$ .

При этом вводится понятие «идеальный контроль» ( $\delta = 1$ ), после проведения которого показатель надёжности СТС достигает значения, имевшего место на начало эксплуатации. При неидеальном и (или) неполном контроле ( $\delta < 1$ ) показатель надёжности до и после его проведения при межрегламентном периоде  $T_{\text{п}}$  предлагается оценивать по формулам, соответственно,

$$\begin{aligned} P_{\text{СТС}} &= P_{\text{СТС0}} - \lambda_{\text{СТС}} T_{\text{п}}; \\ P_{\text{СТС}}^* &= P_{\text{СТС0}} - (1 - \delta) \lambda_{\text{СТС}} T_{\text{п}} \end{aligned} \quad (4)$$

в условиях линейного приближения закона снижения надёжности для случая высоконадёжных СТС.

Однако из анализа (3) и (4) следует, что при экспоненциальном законе изменения показателя надёжности формула (3) может применяться только для случая последовательной СТС, а в формуле (4)  $\delta$  не столько характеризует глубину контроля, сколько эффективность проведённого ТО.

Действительно, вернуть значение подтверждённой НДГ ВБР системы на уровень начала эксплуатации возможно лишь при полной замене всех её элементов на новые аналогичные (что равносильно замене всей СТС), либо путём привлечения дополнительной информации, компенсирующей снижение показателя надёжности вследствие неполного контроля на величину  $(1 - \delta)$  относительно его исходного значения на начало эксплуатации.

При этом интуитивно ясно, что при последовательном соединении элементов в структурной схеме надёжности СТС наибольшее влияние на надёжность СТС в целом оказывает наименее надёжный её элемент («слабое звено»), и отсутствие контроля его работоспособности в процессе проведения ТО более критично, чем отсутствие такого контроля по отношению к более надёжным элементам. В параллельной структурной схеме СТС надёжность системы в наибольшей степени определяется наиболее надёжным элементом.

Таким образом, представляется актуальной задача оценки влияния эффективности проведения периодического технического обслуживания на эксплуатационную надёжность СТС с учётом критичности элементов системы по надёжности и эффективности их технического обслуживания, решению которой и посвящена настоящая статья.

### Постановка задачи

Пусть имеется СТС с произвольной структурной схемой надёжности, состоящая из  $n$  элементов. Для каждого элемента системы известны параметры закона изменения надёжности при его эксплуатации в составе СТС. Гарантийный срок службы СТС составляет  $T_{\text{ГСС}}$  лет. СТС подвергается периодическому ТО с периодом в  $T_{\text{ТО}}$  лет с использованием контрольно-измерительной аппаратуры, продолжительность ТО по сравнению с  $T_{\text{ГСС}}$  пренебрежимо мала. Эффективность ТО каждого элемента СТС задана и оценивается показателем  $\delta_i \in [0, 1]$ ,  $i = 1, \dots, n$ , определяемым по аналогии с (4) из формулы для определения показателя надёжности после проведённого ТО:

$$P_i^*(t_{\text{ТО}}) = P_i(0) - (1 - \delta_i)(P_i(0) - P_i(t_{\text{ТО}})), \quad (5)$$

где  $P_i(0)$  и  $P_i(t_{TO})$  – значения показателя надёжности  $i$ -го элемента СТС на начало эксплуатации ( $t = 0$ ) и на начало проведения очередного ТО ( $t_{TO} = kT_{TO}$ ),  $k \in [1, T_{ГСС}/T_{TO}]$  – номер ТО.

Из (5) получаем формулу для оценки показателя эффективности ТО  $i$ -го элемента СТС:

$$\delta_i = 1 - \frac{P_i(0) - P_i^*(t_{TO})}{P_i(0) - P_i(t_{TO})}, i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Частными случаями (6) являются следующие:  $\delta_i = 0$  – элемент ТО не подвергался, т. е.  $P_i^*(t_{TO}) = P_i(t_{TO})$ ;  $\delta_i = 1$  – идеальное ТО (например элемент заменён на новый, значение показателя его надёжности восстановлено до уровня, имевшегося на начало эксплуатации в составе СТС, т. е.  $P_i^*(t_{TO}) = P_i(0)$ ). Промежуточные значения  $0 < \delta_i < 1$  соответствуют случаям, когда ТО проведено, но значение показателя надёжности элемента после ТО оказалось ниже начального уровня.

Необходимо установить временную зависимость значения показателя надёжности СТС в пределах гарантийного срока её службы с учётом эффективности проводимого ТО и критичности элементов.

### Научно-методический подход к решению задачи

В работах [4, 5] в рамках теории чувствительности предложен подход к выявлению критичных по безопасности элементов СТС. Поскольку для оценки надёжности и безопасности СТС используется единый математический аппарат [6], в рамках решаемой задачи может быть применён аналогичный подход к выявлению критичных по надёжности элементов СТС, и получены коэффициенты критичности для дальнейшего их учёта при оценке надёжности СТС.

Вероятность безотказной работы (ВБР) системы является функцией ВБР входящих в её состав элементов  $P_{СТС} = f(P_1, \dots, P_n)$  и определяется в соответствии со структурной схемой надёжности. Тогда изменение ВБР СТС в зависимости от изменений ВБР её элементов  $\Delta P_i (i = 1, \dots, n)$  может быть определена через полный дифференциал:

$$dP_{СТС} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_{СТС}}{\partial P_i} \Delta P_i = \sum_{i=1}^n K_i \Delta P_i. \quad (7)$$

В (7) сомножители  $K_i = \partial P_{СТС} / \partial P_i$  имеют математический смысл коэффициентов критичности по

надёжности элементов СТС и показывают степень влияния их надёжности на надёжность СТС в целом: чем выше значение коэффициента критичности элемента, тем выше степень влияния его надёжности на надёжности СТС в целом. Учитывая наличие временных зависимостей ВБР элементов СТС  $P_i(t)$ , оценим изменение во времени надёжности СТС по формуле

$$\frac{dP_{СТС}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_{СТС}}{\partial P_i} \frac{dP_i}{dt}. \quad (8)$$

Из (8) после разделения переменных и интегрирования получаем выражение для оценки ВБР СТС в произвольный момент времени без учёта проведения периодического ТО:

$$P_{СТС}(t) = P_{СТС}(0) + \int_0^t \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_{СТС}}{\partial P_i} \frac{dP_i}{dt} \right) dt. \quad (9)$$

Проведение ТО, приводящее к изменению ВБР элементов СТС, может быть учтено внесением слагаемых  $dP_{ТОi}/dt$ , учитывающих эффективность проведённого ТО в отношении каждого элемента СТС, в производную их ВБР по времени:

$$P_{СТС}(t) = P_{СТС}(0) + \int_0^t \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_{СТС}}{\partial P_i} \left( \frac{dP_i}{dt} + \frac{dP_{ТОi}}{dt} \right) \right) dt. \quad (10)$$

Таким образом, (10) позволяет при оценке ВБР СТС учесть коэффициенты критичности по надёжности элементов СТС и показатели эффективности их ТО. Заметим, что вид закона изменения надёжности элементов значения не имеет, что позволяет судить об универсальности предложенного научно-методического подхода.

### Примеры использования научно-методического подхода

Рассмотрим использование научно-методического подхода на конкретных типовых примерах.

**Пример 1.** Пусть СТС состоит из  $n = 3$  последовательно соединённых элементов, ВБР которых изменяется по экспоненциальному закону  $\underline{P}_i(t) = \underline{P}_{i0} e^{-\lambda_i t}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , с параметрами  $\underline{P}_{10} = 0,99$ ,  $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  год<sup>-1</sup>;  $\underline{P}_{20} = 0,98$ ,  $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  год<sup>-1</sup>;  $\underline{P}_{30} = 0,96$ ,  $\lambda_3 = 3 \cdot 10^{-3}$  год<sup>-1</sup>. К надёжности СТС предъявлено требование вида (1) при  $P_{тр} = 0,9$ ,  $\beta_{доп} = 0,1$ . ГСС системы  $T_{ГСС} = 12$  лет, периодичность ТО  $T_{ТО} = 3$  года. Необходимо устано-

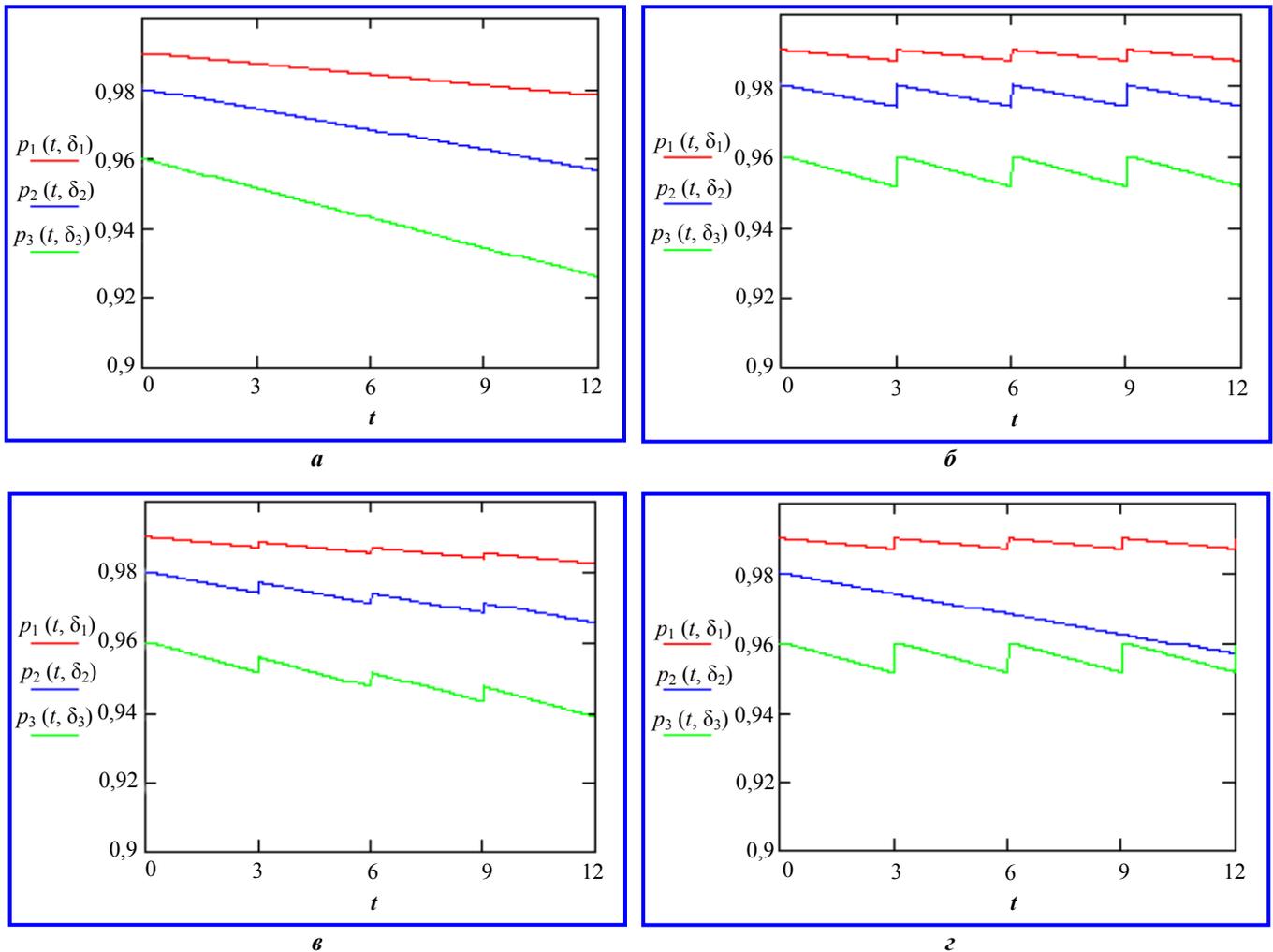


Рис. 1. График изменения ВБР элементов последовательной СТЭС: а – без ТО; б – идеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ ); в – неидеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,5$ ); г – неполное ТО, без обслуживания 2-го элемента ( $\delta_1 = \delta_3 = 1, \delta_2 = 0$ )

вить временную зависимость НДГ ВБР системы с учётом критичности по надёжности её элементов и эффективности проведения их ТО, а также определить условия проведения ТО СТЭС, обеспечивающие выполнение требования (1) в течение всего ГСС.

Для последовательной структурной схемы надёжности в условиях предположения о независимых отказах ВБР СТЭС определим по формуле  $P_{CTC}(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)$ . На рис. 1, а показан график изменения ВБР элементов СТЭС в целом без учёта ТО.

Из условия примера 1 и анализа рис. 1, а следует, что НДГ ВБР системы в наибольшей степени обусловлена наименее надёжным её элементом 3 («слабым звеном»). И действительно, вычисленные значения коэффициентов критичности элементов СТЭС подтверждают приведённое утверждение:

$$K_1 = \partial P_{CTC} / \partial P_1 = P_2 P_3 = 0,941;$$

$$K_2 = \partial P_{CTC} / \partial P_2 = P_1 P_3 = 0,95;$$

$$K_3 = \partial P_{CTC} / \partial P_3 = P_1 P_2 = 0,97.$$

Стоит заметить, что значения коэффициентов критичности элементов СТЭС здесь приведены на начало эксплуатации и, вообще говоря, являются функцией времени, что учтено в (10). Проведение идеального ТО, охватывающего все элементы СТЭС ( $\delta_i = 1 \forall i = 1, \dots, n$ ), позволяет вернуть значения их НДГ ВБР на начальный уровень (рис. 1, б). Показатели эффективности ТО по отношению к элементам СТЭС позволяют учесть его неидеальность (рис. 1, в) и неполноту (рис. 1, г), а также любые комбинации неидеальности и неполноты, при этом приращение показателей надёжности элементов СТЭС по окончании ТО составит

$$\Delta P_{Toi} = P_i(0) \left( 1 - \exp(-\lambda_i (\text{ent}(t/T_{To})) T_{To}) \right) \delta_i.$$

Для автоматизации проведения расчётов по формулам

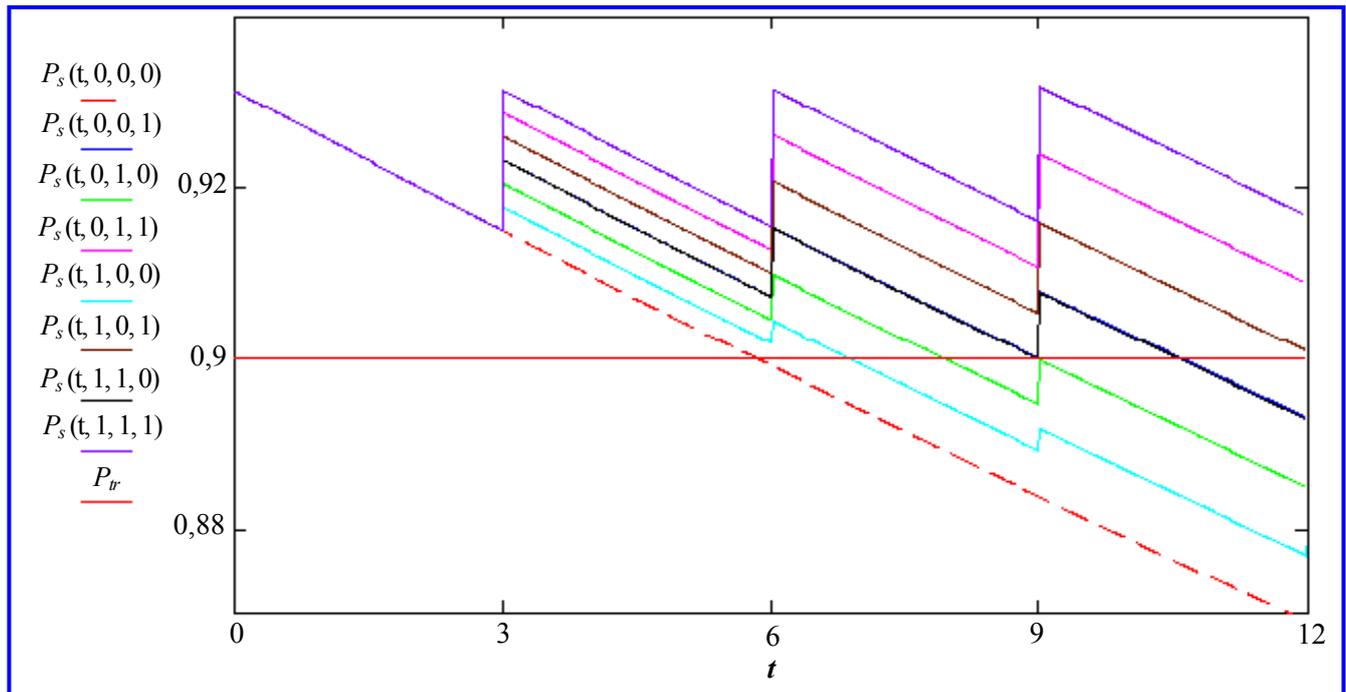


Рис. 2. График изменения ВБР последовательной СТС для некоторых вариантов программ ТО

(5) – (10) разработана программа в среде MathCad. Результаты проведённых с её помощью расчётов для некоторых вариантов программ ТО последовательной СТС показаны на рис. 2. Вариант программы ТО при определении временной зависимости НДГ ВБР системы учтён через показатели  $\delta_i \in [0, 1], i = 1, \dots, n$  эффективности ТО в отношении элементов СТС:  $P_{СТС} = f(t, \delta_1, \delta_2, \delta_3)$ . Из анализа рис. 2 следует, что из приведённых вариантов программ ТО требование (1) для условия примера 1 выполняется в течение всего ГСС в случае идеального ТО  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ , а также при программах  $\delta_2 = \delta_3 = 1; \delta_1 = 0$  и  $\delta_1 = \delta_3 = 1; \delta_2 = 0$ , перечисленных в порядке убывания значения НДГ ВБР системы на конец ГСС.

**Пример 2.** В условиях примера 1 рассматривается СТС, состоящая из  $n = 3$  параллельно соединённых элементов, ВБР которых изменяется по экспоненциальному закону с параметрами  $\underline{P}_{10} = 0,70, \lambda_1 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}; \underline{P}_{20} = 0,63, \lambda_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}; \underline{P}_{30} = 0,40, \lambda_3 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Для параллельной структурной схемы надёжности в условиях предположения о независимых отказах ВБР СТС определим по формуле

$$P_{СТС}(t) = 1 - (1 - \underline{P}_1(t))(1 - \underline{P}_2(t))(1 - \underline{P}_3(t)).$$

На рис. 3, а показан график изменения ВБР элементов СТС в целом без учёта ТО.

НДГ ВБР параллельной системы в наибольшей степени обусловлена, в отличие от последовательной, наиболее надёжным её элементом 1. Вычисленные на начало эксплуатации значения коэффициентов критичности элементов СТС подтверждают это:

$$K_1 = \partial P_{СТС} / \partial P_1 = (1 - P_2)(1 - P_3) = 0,222;$$

$$K_2 = \partial P_{СТС} / \partial P_2 = (1 - P_1)(1 - P_3) = 0,180;$$

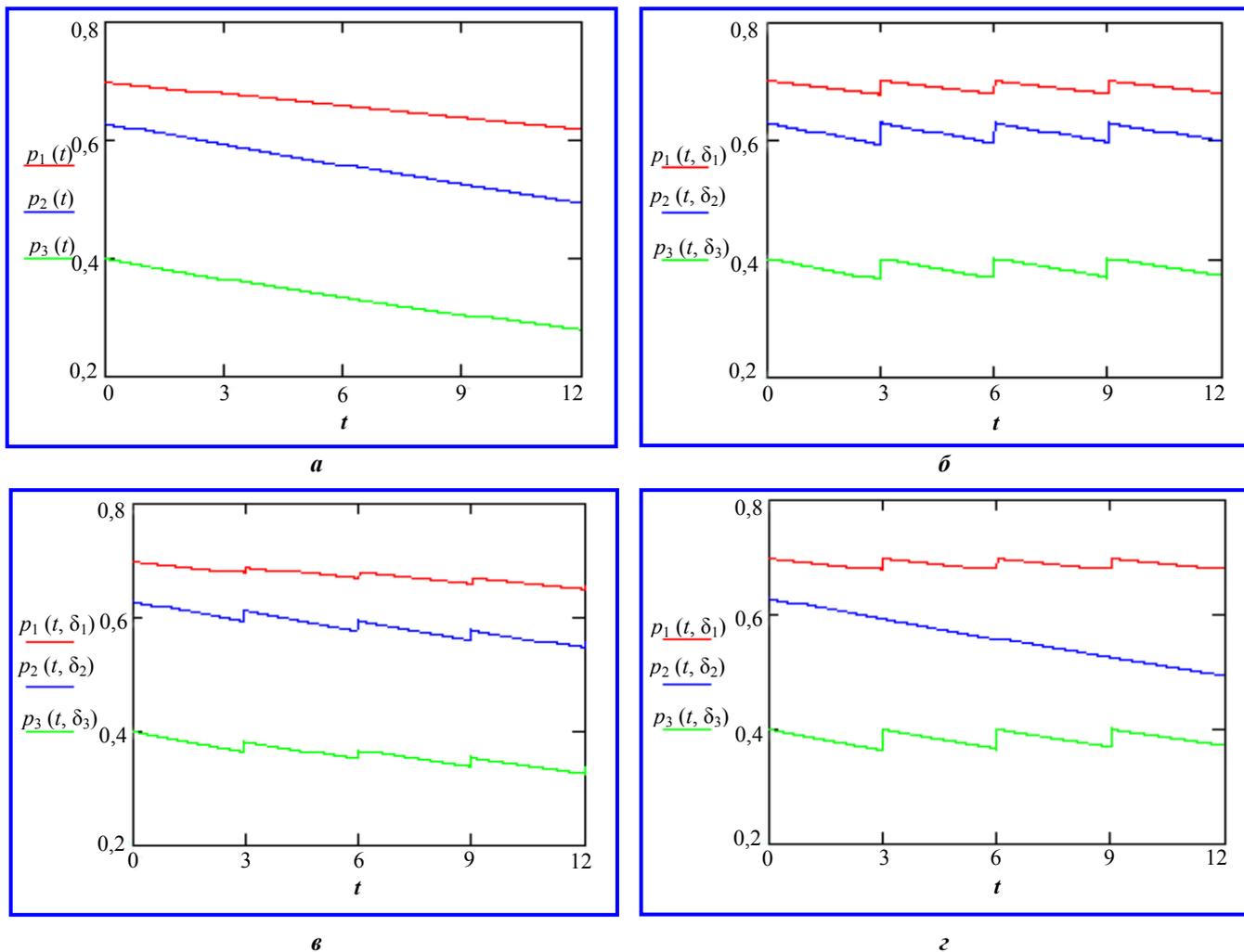
$$K_3 = \partial P_{СТС} / \partial P_3 = (1 - P_1)(1 - P_2) = 0,111.$$

Применяя описанный в примере 1 алгоритм действий, получаем зависимости НДГ ВБР элементов параллельной СТС в процессе эксплуатации для ТО с различной эффективностью (рис. 3, б – г).

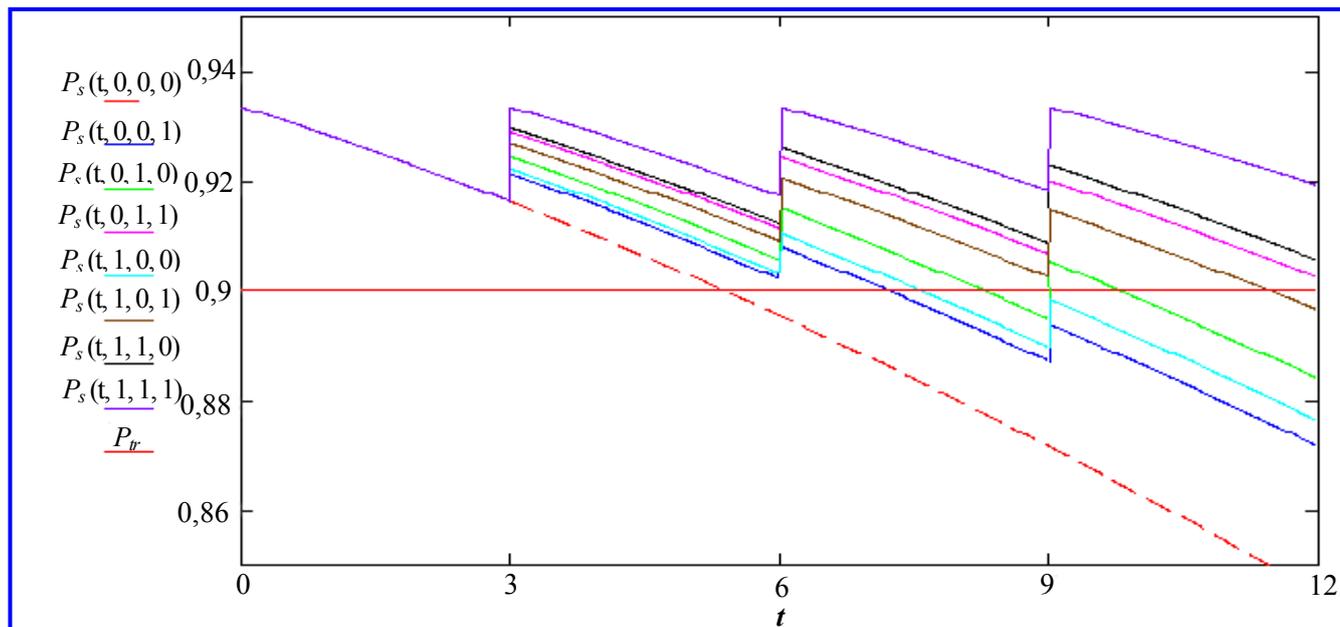
Результаты проведённых расчётов для некоторых вариантов программ ТО параллельной СТС показаны на рис. 4.

Из их анализа следует, что из приведённых вариантов программ ТО требование (1) для условия примера 2 выполняется в течение всего ГСС в случае идеального ТО  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ , а также при программах  $\delta_1 = \delta_2 = 1; \delta_3 = 0$  и  $\delta_2 = \delta_3 = 1; \delta_1 = 0$ , перечисленных в порядке убывания значения НДГ ВБР системы на конец ГСС.

**Пример 3.** В условиях примера 1 рассматривается СТС, структурная схема которой показана на рис. 5, состоящая из  $n = 3$  элементов, ВБР которых изменяется по экспоненциальному закону с параметрами  $\underline{P}_{10} = 0,97, \lambda_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \underline{P}_{20} = 0,90, \lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}; \underline{P}_{30} = 0,75, \lambda_3 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ .



**Рис. 3.** График изменения ВБР элементов параллельной СТС: *а* – без ТО; *б* – идеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ ); *в* – неидеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,5$ ); *г* – неполное ТО, без обслуживания 2-го элемента ( $\delta_1 = \delta_3 = 1, \delta_2 = 0$ )



ВБР СТС со смешанной структурной схемой надёжности определим по формуле

$$P_{СТС}(t) = P_1(t)(1 - (1 - P_2(t))(1 - P_3(t))).$$

На рис. 6, а показан график изменения ВБР элементов СТС в целом без учёта ТО.

Вычисленные на начало эксплуатации значения коэффициентов критичности элементов СТС:

$$K_1 = \partial P_{СТС} / \partial P_1 = 1 - (1 - P_2)(1 - P_3) = 0,975;$$

$$K_2 = \partial P_{СТС} / \partial P_2 = P_1(1 - P_3) = 0,242;$$

$$K_3 = \partial P_{СТС} / \partial P_3 = P_1(1 - P_2) = 0,097$$

показывают, что наибольшее влияние на надёжность СТС оказывает надёжность 1-го элемента. На рис. 6, б – г показаны графики зависимости НДГ ВБР элементов СТС со смешанной структурной

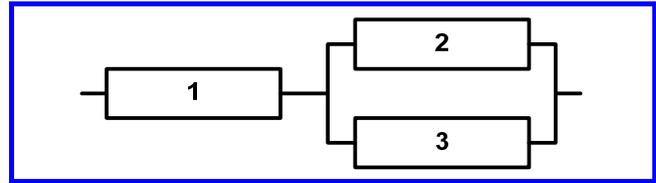


Рис. 5. Структурная схема надёжности СТС в примере 3

схемой надёжности в процессе эксплуатации для ТО с различной эффективностью.

Результаты расчётов для некоторых вариантов программ ТО СТС со смешанной структурной схемой надёжности показаны на рис. 7.

Из их анализа следует, что из приведённых вариантов программ ТО требование (1) для условия примера 3 выполняется в течение всего ГСС в случае идеального ТО  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ , а также при программе ТО  $\delta_2 = \delta_3 = 1; \delta_1 = 0$ .

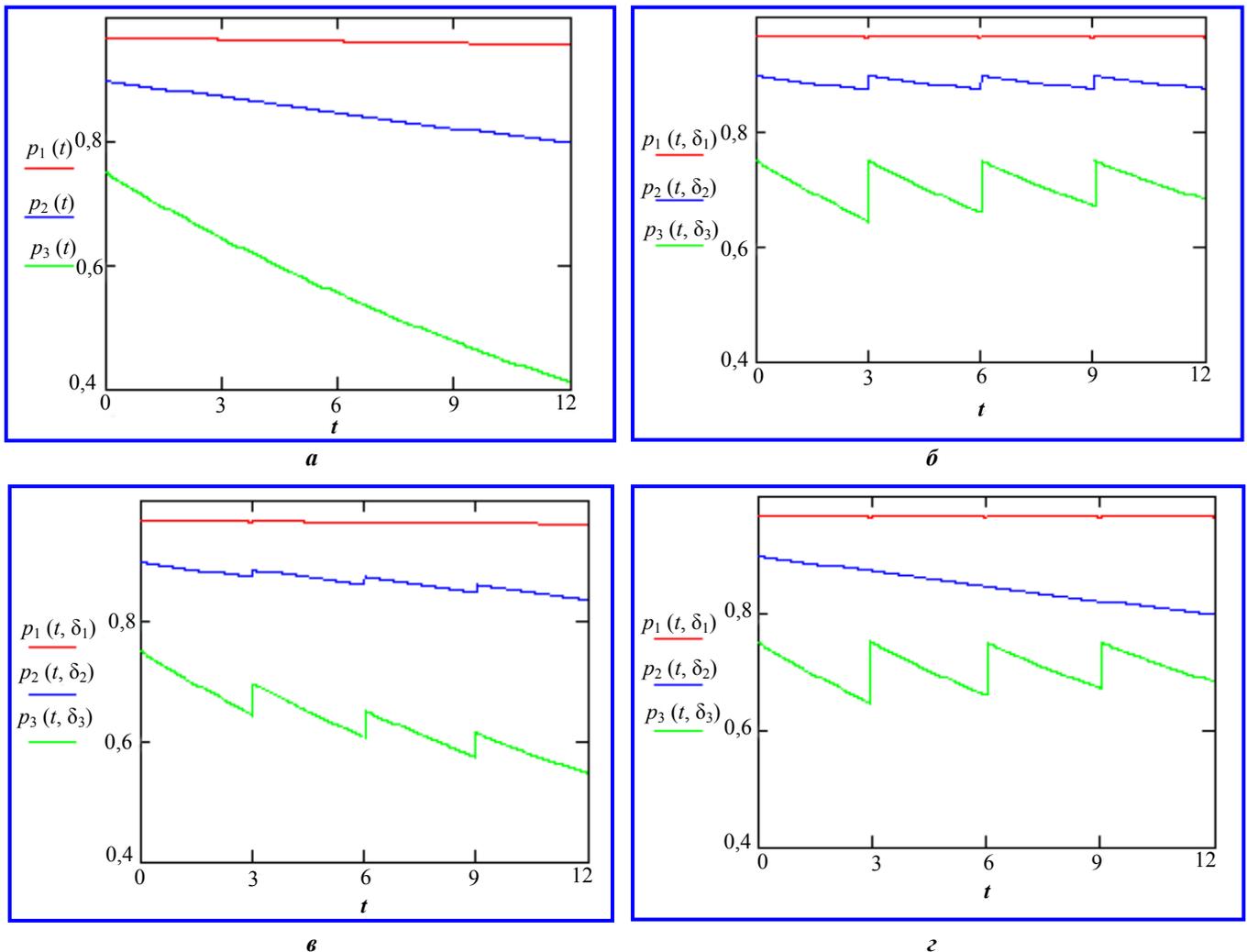


Рис. 6. График изменения ВБР элементов СТС со смешанной структурной схемой надёжности: а – без ТО; б – идеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ ); в – неидеальное ТО ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,5$ ); г – неполное ТО, без обслуживания 2-го элемента ( $\delta_1 = \delta_3 = 1, \delta_2 = 0$ )

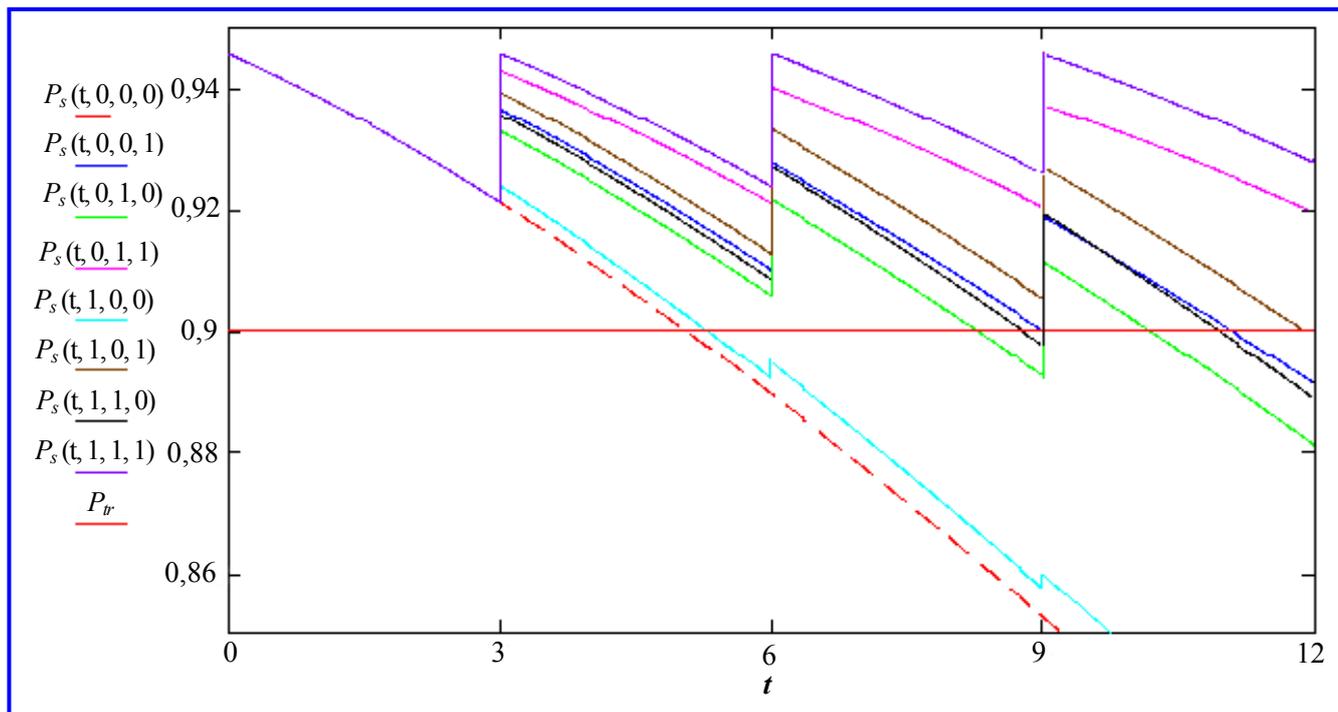


Рис. 7. График изменения ВБР СТС со смешанной структурной схемой надёжности для некоторых вариантов программ ТО

**Обсуждение результатов**

В рассмотренных примерах значения коэффициентов критичности элементов СТС приведены лишь на начало эксплуатации, в процессе эксплуатации они изменяются по мере снижения надёжности элементов (рис. 8) и проведения ТО, что оказывает влияние на вычисляемое значение ВБР системы и учтено в (10).

Следует также отметить, что требованию (1) в примерах 1 – 3 в течение ГСС, кроме перечисленных, отвечает и ряд программ неидеального ТО ( $0 < \delta_i < 1, i \in [1, n]$ ), что позволяет судить о возможности применения предложенного подхода при постановке и решении задачи оптимизации программы ТО  $\bar{\delta}^* = \langle \delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_n^* \rangle^T \in \Delta$ :

$$\bar{\delta}^* = \underset{\substack{C_{\Sigma}(P_{СТС}, \bar{\delta}, T_{ГСС}/T_{ТО}) \leq C_{\text{доп}} \\ P_{СТС}(T_{ГСС}) \geq P_p, \beta \leq \beta_{\text{доп}}}}{\text{argmax}} \delta_{СТС}(P_{СТС}(0), P_{СТС}(T_{ГСС}), \bar{\lambda}, \bar{\delta}), \quad (11)$$

где  $\bar{\delta}^*$  – оптимальная программа ТО, определённая на множестве  $\Delta$  возможных программ ТО;  $\bar{\lambda}$  – вектор параметров закона (законов) распределения, описывающего изменение надёжности элементов СТС;  $C_{\Sigma}(\cdot)$  – функция математического ожидания суммарных затрат на реализацию программы ТО;  $\delta_{СТС}$  – показатель эффективности ТО

СТС на конец её ГСС, определяемый по формуле, аналогичной (6):

$$\delta_{СТС} = 1 - \frac{P_{СТС}(0) - P_{СТС}^*(T_{ГСС})}{P_{СТС}(0) - P_{СТС}(T_{ГСС})}, \quad (12)$$

где  $P_{СТС}^*(T_{ГСС})$  – ВБР СТС на конец ГСС с учётом всех проведённых в процессе эксплуатации ТО.

**Выводы**

Таким образом, в данной работе предложен подход к оценке ВБР СТС с произвольной структурной схемой надёжности в процессе эксплуатации с периодическим ТО. Данный подход отличается от известных тем, что при оценке ВБР СТС, помимо параметров надёжности элементов СТС, дополнительно учтены введённые показатели критичности по надёжности элементов и показатели эффективности проведённого ТО в отношении каждого элемента, позволяющие в свою очередь учесть различную степень его полноты. На основании решения дифференциального уравнения, позволяющего описать динамику изменения надёжности СТС в зависимости от изменения надёжности её элементов и проводимого периодического ТО, получено аналитическое выражение, устанавливающее

взаимосвязь перечисленных параметров. Приведены примеры решения типовых задач, демонстрирующие работоспособность предложенного математического аппарата. Сформулирована задача определения оптимальной по критерию «эффективность – стоимость» программы ТО, позволяющей обеспечивать предъявленные к её надёжности требования в течение всего ГСС при ограничении на затраты, необходимые для её реализации. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации системы ТО высоконадёжных СТС с произвольной структурой и законами распределения, описывающими изменение ВБР входящих в её состав элементов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках работ по гранту Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ-3851.2012.10 и по государственным контрактам в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

### Литература

1. Судаков Р. С. Испытания технических систем: выбор объёма и продолжительности / Р. С. Судаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. Павлов И. В. Статистические методы оценки надёжности сложных систем по результатам испытаний / И. В. Павлов. – М. : Радио и связь, 1982. – 168 с.
3. Алатырцев А. А. Эксплуатация сложных технических систем / А. А. Алатырцев, А. Г. Бирюков, В. С. Голубов [и др.]. – М. : МО, 1993. – 411 с.
4. Определение критичности узлов защиты потенциально-опасного объекта по устойчивости к аварийным воздействиям / М. В. Сахаров, Н. Н. Радаев, С. И. Боридько [и др.] // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 1998 г. – № 6. – С. 3 – 8.
5. Применение теории чувствительности к выявлению критичных по безопасности элементов технических систем / М. В. Сахаров, Н. Н. Радаев // Материалы VI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М. : ИПУ РАН, 1999 г.
6. Радаев Н. Н. Методы оценки соответствия технических систем предъявленным требованиям при малом объёме испытаний / Н. Н. Радаев. – М. : РВСН, 1997. – 391 с.

Поступила в редакцию 02.05.2012

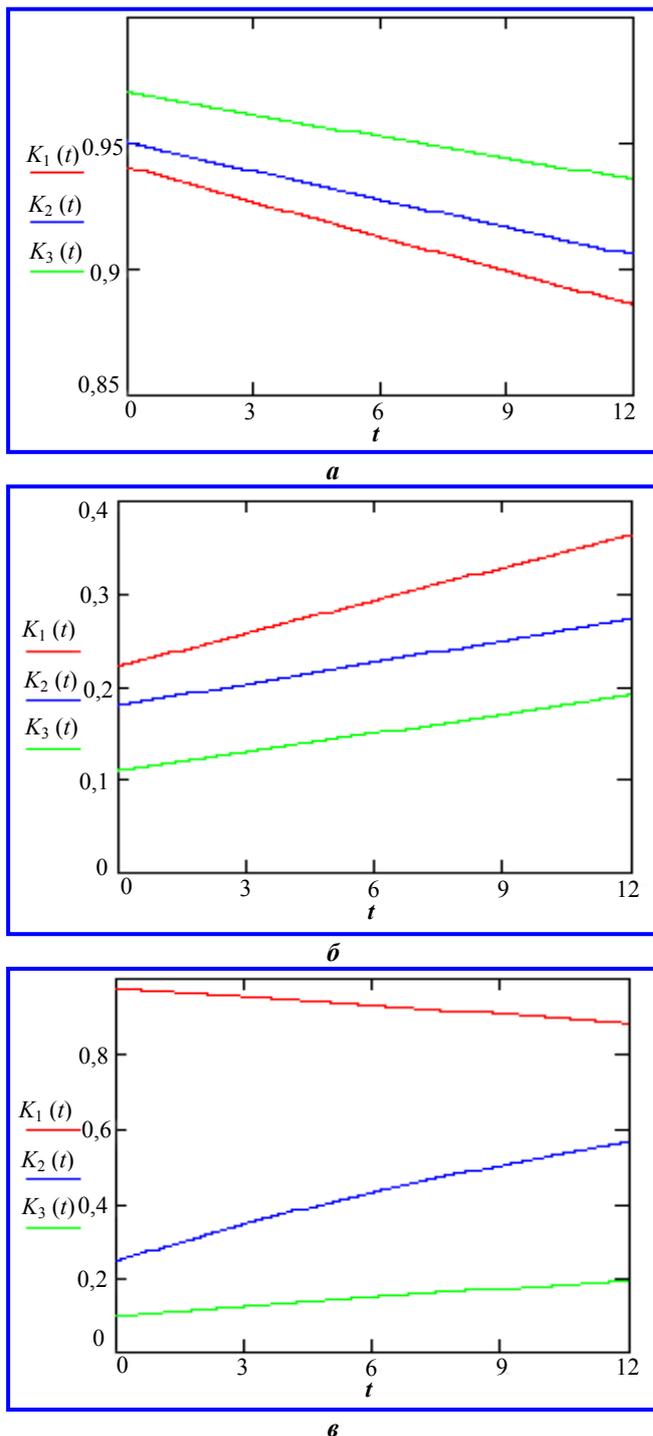


Рис. 8. График временных зависимостей коэффициентов критичности по надёжности элементов СТС без учёта проведения ТО: а – последовательной (пример 1); б – параллельной (пример 2); в – смешанной (пример 3)

Сахаров Михаил Викторович, д-р техн. наук, начальник кафедры, доцент, т. (495) 696-34-12, m\_sakharov@mail.ru.

Атаманюк Виктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент, т. (495) 696-34-12, atamanukvm@gmail.ru.

Романов Андрей Вячеславович, т. (473) 226-36-93, andrey.roman73@yandex.ru.