



Оптимизация профиля функционирования сложной технической системы

А. Д. Синюк^а, доктор. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-0608-4359

О. М. Лепешкин^а, доктор. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0362-0446

В. А. Филимонов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0006-2297-9338

О. А. Остроумов^а, канд. техн. наук, oleg-26stav@mail.ru

^аВоенная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064, РФ

Введение: в условиях ограниченности ресурсов системы возникает необходимость максимально эффективно их использовать. При проектировании и построении системы используется ее структурная оптимизация, при которой она может быть избыточна по выполняемым функциям и задачам. Это неэффективно и требует больших затрат ресурсов. **Цель:** разработать алгоритм оптимизации использования ресурсов и выполнения профиля функционирования сложной технической системы, характеризующего ее целевое предназначение. **Результаты:** разработан новый алгоритм оптимизации использования ресурсов и выполнения профиля функционирования сложной технической системы, основанный на потребности в выполнении системой функций и задач. Он позволит в любой момент времени получить оптимальные сценарии выполнения функции и задачи системы независимо от влияния дестабилизирующих факторов и меняющейся обстановки и своевременно обеспечивать функциональную устойчивость системы. Предлагается осуществлять поиск множества вариантов задействования ресурсов для выполнения каждой задачи системы с последующим выбором из этого множества оптимального сценария для нее. Выбор производится на основании оценки суммарной эффективности использования ресурсов для выполнения каждой задачи. Представлены результаты использования алгоритма для выбора оптимального сценария выполнения ограниченного набора задач системы, основанные на формировании множества матриц оптимального выполнения задач и матриц выполнения целевого предназначения системы. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании и построении систем управления, контроля, поддержки принятия решений для расчета и выбора наиболее эффективного варианта выполнения задач, функций, целевого предназначения системы.

Ключевые слова – оптимизация, функциональная устойчивость, надежность, критичность элементов системы, критичность системы, система связи, система управления, сложная техническая система, профиль функционирования системы, регламент функционирования системы, эффективность функционирования, состояние системы, сценарий выполнения задачи.

Для цитирования: Синюк А. Д., Лепешкин О. М., Филимонов В. А., Остроумов О. А. Оптимизация профиля функционирования сложной технической системы. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 12–25. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

For citation: Sinuk A. D., Lepeshkin O. M., Filimonov V. A., Ostroumov O. A. Optimization of the functioning profile of a complex technical system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 12–25 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

Введение

Процесс функционирования сложной технической системы (СТС) в режиме реального времени и в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов сопряжен с наступлением событий нарушения этого процесса [1, 2]. Современные системы функционируют в постоянно меняющихся условиях, которые, как и состояние системы, носят случайный характер. Динамика изменения условий очень высокая, при этом критичность отдельных систем, объектов и элементов определяет необходимость системы быстро обнаруживать возникающие в ней конфликты, реагировать на них и устранять. Конфликты, как правило, обусловлены противоречием между наступлением событий, нарушающих функционирование системы и ее

элементами, и потребностями в их устойчивом функционировании [3, 4]. Возникает задача обеспечения устойчивого функционирования системы, решение которой возможно за счет реализации адекватных управленческих решений. В процессе реализации таких решений осуществляется управление ресурсами системы для выполнения требуемого целевого предназначения. При этом время, необходимое для выявления и реакции системы на возникающие конфликты, должно стремиться к нулю, что требует построения качественно новых интегрированных систем контроля и мониторинга, позволяющих не только выявлять конфликт в системе, но и предвидеть его наступление [5, 6]. Для контроля и мониторинга состояния системы и определения ее способности выполнить свое целевое предназначение предлагается использовать профиль

функционирования системы (ПФС) [7]. Профиль представляет собой набор характеристик и правил, описывающих процесс функционирования СТС. Использование профиля позволит своевременно выявить конфликты, отреагировать на них и обеспечить функциональную устойчивость системы.

Анализ работ по оценке устойчивости систем

Устойчивость выступает как одно из требований, предъявляемых к любой технической системе. Традиционно она оценивается через надежность [8–11], живучесть [12–13], помехоустойчивость [14–16] и киберустойчивость [17–22]. Показатели, характеризующие устойчивость, как правило, не учитывают динамику процессов, происходящих в системе, и изменение обстановки.

В работе [8] представлен подход к оценке надежности интеллектуальных транспортных систем, учитывающий их особенности. Показаны результаты тестирования систем, способствующие обнаружению и исключению ошибок в системе контроля, что позволяет обеспечить требуемую надежность.

В [9] рассматривается надежность программных приложений, используемых в технических системах. На основе анализа надежности программных компонентов приложения оценивается надежность всего приложения. Полученные результаты оценки позволяют прогнозировать изменения надежности приложений под действием различных факторов.

Проблема обеспечения устойчивости и надежности систем в условиях ограниченности ресурсов рассмотрена в [10, 11]. Предлагаются алгоритмы использования и распределения ограниченных ресурсов в различных условиях при соблюдении требований к надежности сети, системы и к эффективности их функционирования.

В [12] оценка емкостной устойчивости осуществляется через надежность и живучесть телекоммуникационных сетей, она учитывает их пропускную способность. Анализируется влияние неоднородностей в сети на интегрированный показатель емкостной устойчивости.

В работе [13] оценка живучести критической инфраструктуры городской среды производится с точки зрения влияния на устойчивость уровня компетентности персонала. Предложены профили теоретической подготовки специалистов.

Критичность систем, необходимость противодействия компьютерным атакам на них способствовали развитию направления, связанного с исследованием киберустойчивости систем. В [19] представлена методология управления

энергетической системой, позволяющая противодействовать компьютерным атакам на ее инфраструктуру. В [20–22] рассматривается устойчивость объектов критической информационной инфраструктуры. В [20] исследуется общесистемная проблема обеспечения устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры. В [21] на основе математического аппарата теории игр и теории принятия решений разработана модель оценки безопасности и устойчивости интеллектуальной сети.

Одним из методов противодействия атакам и обеспечения устойчивости сетей и систем связи является использование систем обнаружения атак. Предложенная модель [23] такой системы на основе нейронной сети позволяет обнаруживать вторжения путем разделения пакетов на обычные и вредоносные. В процессе функционирования системы происходит ее самообучение.

Прогнозирование изменения состояния системы исследуется в работе [24]. Для повышения устойчивости систем управления предлагается переход от иерархической структуры ее построения к сетевой. Работа носит общесистемный характер и направлена на формирование практических рекомендаций, которые позволяют повысить устойчивость системы управления.

Методологические подходы к обеспечению устойчивости систем и объектов исследуются в работах [25–27]. В [25] методология основана на оценке устойчивости элементов системы. Представленный подход включает формирование и выбор оптимальных сценариев выполнения процессов из множества удовлетворяющих требованиям. Кроме этого, осуществляется поиск параметров, изменение значений которых оказывает существенное влияние на устойчивость с последующим обеспечением соответствия их требованиям.

Функциональная устойчивость системы

Изучение работ привело к выводу, что количественная оценка выполнения системой функций и задач, определяющая ее функциональную устойчивость, а также анализ использования оптимального и эффективного вариантов задействования ресурсов системы не проводятся, и требуется исследование данного вопроса.

Функционально устойчивое состояние СТС — это такое состояние системы, в котором она способна выполнить заданный профилем перечень целей, функций, задач, требования, предъявляемые к системе и ее элементам, при этом в ней имеется необходимый для этого ресурс.

В качестве ресурса могут рассматриваться элементы системы, технические средства, пер-

сонал, а также производные их деятельности, например пропускная способность [28], память, частотный, энергетический, каналный и т. д. ресурсы.

В процессе функционирования СТС переходит из состояния в состояние. Такой переход может происходить под воздействием на нее различных дестабилизирующих факторов, что может снижать ее функциональную устойчивость. Концептуально процесс обеспечения функциональной устойчивости СТС можно представить в виде совокупности взаимосвязанных множеств: множества целей СТС $A = \{A_1, A_2, \dots, A_a\}$, где a – количество выполняемых системой целей; множества требований, предъявляемых к СТС и ее элементам, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, где n – количество требований, предъявляемых к системе и ее элементам (целям, функциям, задачам, ресурсам); множества функций $F = \{F_1, F_2, \dots, F_c\}$, где c – количество выполняемых системой функций; множества задач $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_q\}$, где q – количество выполняемых системой задач; множества ресурсов системы $E = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, где m – количество ресурсов системы, обеспечивающих ее функционирование [7, 29, 30].

В процессе формирования профиля каждый элемент системы может быть разбит на подцели, подфункции, подзадачи, а также дополнительно иметь главную цель, характеризующую ее целевое предназначение. Профиль представляет собой набор матриц, каждая из которых бинарная, при этом $b_{ij} \in \{0, 1\}$:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент имеется;} \\ 0, & \text{если элемент отсутствует.} \end{cases}$$

При формировании профиля функционирования системы для каждой матрицы возможен случай, когда один и тот же ресурс может быть использован для выполнения разных задач, одна и та же задача участвует в выполнении различных функций, одна и та же функция участвует в выполнении разных целей. Частично уйти от такого состояния можно формированием матриц согласованности использования ресурса, выполнения задач, функций и целей по времени, т. е. формированием регламентов в системе.

Формируемый ПФС будет адекватным, если для матриц задействования ресурсов, выполнения задач, функций, требований и целей существует такая подстановка μ , для которой диагональное произведение элементов каждой из матриц окажется не нулевым:

$$\exists \mu_k : \prod_{i=1}^n b_{i, \mu_k} \neq 0, \quad i \in (1, 2, \dots, n), \quad k \in (1, 2, \dots, n!),$$

где n – количество профилей.

Формируемый для СТС ПФС будет выполнимым, если для всех матриц профиля существует хотя бы один вариант выполнения всех и каждого одиночных, групповых профилей, входящих в ПФР, при отсутствии пересечения по времени задействования ресурсов для их выполнения:

$$\exists b_{i, \mu_k} = 1, \forall i \in (1, 2, \dots, n), \forall k \in (1, 2, \dots, n!) | t \neq t_i.$$

Состояние системы, описываемое ПФС, можно рассматривать как функционально устойчивое, если для профиля существует хотя бы один вариант его выполнения.

Система называется абсолютно устойчивой, если в результате нарушения ее функционирования она способна перейти из текущего состояния в состояние $s_{i+1} \in S$. Множество устойчивых состояний S состоит из элементов, удовлетворяющих условиям

$$S = \{s_i(A)\}, \quad \lim_{t_\phi \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow \infty} \lim_{F_\phi \rightarrow \infty} f(x) = A$$

при $x = \frac{F_\phi(r, t)}{F_{\phi, \text{треб}}}$, $F_\phi(r, t)$ – количество функций,

выполняемых системой в процессе функционирования, $F_{\phi, \text{треб}}$ – требуемое количество функций, которые должна выполнить система в процессе функционирования, $\frac{t_\phi}{t_{\phi, \text{треб}}} \rightarrow 1$, t_ϕ – время

функционирования системы, $t_{\phi, \text{треб}}$ – требуемое время функционирования системы, $r \in E$, $\forall i \in (1, 2, \dots, n), \forall j \in (1, 2, \dots, m)$.

Любое состояние системы называется условно устойчивым, если в результате воздействия на нее различных дестабилизирующих факторов система способна выполнять свое целевое предназначение, однако нарушается качество выполнения одной и более задач $\exists Z_{q\phi} Q(Z_{q\phi}) \notin Q(Z_{q\phi, \text{треб}})$ или функций $\exists F_{q\phi} Q(F_{q\phi}) \notin Q(F_{q\phi, \text{треб}})$, где функция $Q(*)$ характеризует выполнение профиля, при этом система переходит из состояния $s_i \in S$ в состояние $s_{v+1} \in S_{y.u.}$. Множество условно устойчивых состояний $S_{y.u.}$ будет включать элементы, для которых выполняется следующее условие:

$$S_{y.u.} = \{s_v(A)\}, \quad \lim_{t_\phi \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow \infty} \lim_{F_\phi \rightarrow \infty} f(x) = A$$

при $x = \frac{F_\phi(r, t)}{F_{\phi, \text{треб}}}$, $\frac{t_\phi}{t_{\phi, \text{треб}}} \rightarrow 1$, $r \in E$, $\forall i \in (1, 2, \dots,$

$n), \forall j \in (1, 2, \dots, m)$.

Состояние системы называется функционально неустойчивым, если оно характеризуется невыполнением функций, задач, целей, требова-

ний, предъявляемых к системе и ее элементам, в любой момент времени либо нарушением выполнения целевого предназначения.

Постановка задачи на оптимизацию ресурса для выполнения профиля функционирования СТС

Рассмотрим систему, состоящую из определенного ограниченного набора элементов N . При этом система состоит из набора ресурсов, располагающихся на элементах системы и позволяющих функционировать, т. е. выполнять определенный и ограниченный набор задач. Матрица задач $Y_Z = \{y_{Zi,j}\}$ и матрица ресурсов $Y_E = \{y_{Ei,j}\}$ позволяют сформировать матрицу выполнимости задач $Y_{ZE} = \{y_{ZEi,j}\}$. Сумма всех ресурсов системы определяет способность системы выполнить целевое предназначение и условия ее синтеза

$$E = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m r_{ij}, 0 \leq E \leq qm, r_{ij} \in \{0, 1\},$$

где E – общее количество ресурсов системы, используемых в профиле; q – индекс, характеризующий номер задачи, решаемой системой в профиле; m – индекс, характеризующий номер ресурса r_{ij} , задействованного для выполнения q -й задачи.

Способность выполнить каждую q -ю задачу Z_q требует выделения r_{ij} -го ресурса. Каждой задаче Z_q поставим в соответствие характеристику качества ее выполнения w_{ij} , совокупность которых формирует множество W , при этом $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$, тогда матрица, характеризующая качество функционирования СТС, будет иметь вид $Y_W = \{y_{Wi,j}\}$.

Предположим, что для достижения целевого предназначения системы необходимо выполнить ограниченное и конечное число целей, функций и задач на ограниченном интервале времени. Формальное описание целей, функций, задач можно представить в виде элементарных конъюнкций:

$$A = \bigcap_F F_i, F_i \in F, i \in \{1, 2, \dots, c\};$$

$$F = \bigcap_Z Z_i, Z_i \in Z, i \in \{1, 2, \dots, q\};$$

$$A = \bigcap_E r_i, r_i \in E, i \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

Нарушение процесса функционирования может привести к деградации системы, обусловленной изменением функционально-структур-

ного состава системы. Имеющиеся механизмы синтеза системы должны способствовать выполнению системой своего целевого предназначения с требуемым качеством за счет перераспределения ресурсов, задач, функций и целей системы, а также изменения структуры СТС, т. е.

$$W_{Z_i} \geq W_{Z_i_min} \geq W_{Z_i_треб}$$

при $E \geq E_{min} \mid k_{Z_{крит}} = 1, k_{E_{крит}} = 1,$

где $k_{Z_{крит}}$ – коэффициент выполнения критически значимых задач: $k_{Z_{крит}} = \frac{Z_{крит.вып}}{Z_{крит.треб}}$; $k_{E_{крит}}$ – коэффициент наличия и использования критически значимых ресурсов для выполнения задач: $k_{E_{крит}} = \frac{E_{крит.вып}}{E_{крит.треб}}$.

При снижении количества ресурсов, необходимых для выполнения целевого предназначения системы, ниже минимального требуемого уровня, а также при снижении качества их выполнения принимается решение о невыполнении системой той или иной задачи, функции или цели.

Потребность системы, лиц, принимающих решение, в выполнении определенного целевого предназначения, количества, типа и качества ресурсов, характеризующих возможности СТС по выполнению ее целевого предназначения, определяются структурой системы на всем множестве ее состояний. Возникает потребность оптимизации структуры системы, позволяющей выбрать такой вариант построения СТС, использование которого предоставляет в распоряжение системы максимально большой объем ресурсов, необходимых для выполнения ее целевого предназначения. Это способствует эффективному распределению ресурсов для выполнения задач, функций и целей системы.

Постановка задачи на оптимизацию профиля функционирования СТС. Оптимальное распределение ресурсов в СТС

Рассмотрим СТС, состоящую из множества элементов, позволяющих выполнить ее целевое предназначение. Система описывается совокупностью частных критериев оптимальности $W_{\Sigma} = \{W_1, W_2, \dots, W_i\}$, характеризующих качество выполнения таких элементов профиля функционирования СТС. Каждый из элементов имеет различное значение для системы. Предположим, что требуется максимизация каждого такого критерия в одной и той же области допустимых значений.

Критерий оценки оптимальной структуры профиля функционирования системы будет иметь вид

$$\max \left(\sum_{k_{di}} W_{i\Sigma}(k_{di}) \right) \text{ при } \min (E), i \in (0, E), \quad (1)$$

где k_d — степень деградации СТС (профиля функционирования) в процессе ее функционирования; $W_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^J k_j W_j$ — сумма, определяющая степень качества выполнения элемента профиля функционирования СТС, J — количество элементов профиля функционирования СТС, k_j — коэффициент значимости элемента профиля, функции, цели системы, элемента профиля функционирования СТС, W_j — качество выполнения j -го элемента профиля функционирования СТС.

Для формального описания процесса функционирования СТС предлагается использовать теорию графов и теорию матриц. Рассмотрим граф $G(V, L, W)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ — множество вершин, характеризующих элементы процесса функционирования СТС; $L = \{l_1, l_2, \dots, l_j\}$ — множество дуг, соответствующих переходам между элементами графов — их вершинами; $W = \{w_1, w_1, \dots, w_i\}$ — множество весов дуг, характеризующих качество выполнения целей, функций, задач (профилей функционирования СТС). Каждой дуге присваивается соответствующий вес, характеризующий качество ее выполнения. Кроме этого, каждой вершине присваивается категория значимости. Наличие более чем одного маршрута достижения каждой вершины, независимо от уровня ее нахождения, определяет возможности системы по выполнению того или иного элемента ПФС, а также возможности синтеза системы в случае нарушения (пропажи, отказа) ресурса, используемого в наиболее предпочтительном варианте выполнения ПФС.

Нахождение наиболее эффективного варианта выполнения задачи, функции, цели можно свести к задаче о наибольшем потоке. Алгоритм поиска будет иметь следующие этапы.

1. Рассмотрим систему, достижение целевого предназначения которой определяется выполнением заданного набора задач $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}$, $Z_1 = r_1 \otimes r_2 \otimes r_3, Z_2 = r_4 \otimes r_5 \otimes r_6, Z_3 = r_8 \otimes r_9 \otimes Z_1$, где операция \otimes определяется как логическое «И».

2. Построим граф $G(V, L, W)$ и запишем матрицу инцидентий $Y = |a_{ij}|_{q \times m}$, которая его характеризует.

3. Для определения возможности выполнения представленных задач случайным образом из множества элементов системы (графа) выбира-

ется i -я вершина. Используя матрицу Y , находим дуги, которые соединены с этой вершиной и принадлежат множеству $L_{r_1}, L_{r_1} \in L$. В матрице в i -й строке, при наличии связи с другой вершиной, будут иметь значение единицы.

4. На следующем этапе для каждой вершины, которая имеет связь с i -й вершиной, находим множество дуг, которые соединяют ее с другими вершинами графа (без учета дуги в i -ю вершину). Аналогично наличие таких дуг в графе в матрице Y отображается в соответствующей ячейке в виде символа «1», при этом сами дуги принадлежат множеству $L_{r_2}, L_{r_2} \in L$.

5. Пункты 3 и 4 выполняются для всех возможных вершин и путей до достижения i -й вершины, для которой полученные дуги, например, как для первой задачи, принадлежат множеству $L_{r_3}, L_{r_3} \in L$.

6. Формируется множество маршрутов выполнения каждой задачи СТС, которые выступают в качестве множества сценариев, характеризующих способность системы выполнить эту задачу.

7. Для каждого сценария вычисляется значение W :

$$W_{Z_1} = W_{r_1}^* + W_{r_2}^* + W_{r_3}^* = k_{r_1} (W_{r_1})_i + k_{r_2} (W_{r_2})_j + k_{r_3} (W_{r_3})_q ;$$

$$W_{Z_2} = W_{r_4}^* + W_{r_5}^* + W_{r_6}^* + W_{r_7}^* = k_{r_4} (W_{r_4})_i + k_{r_5} (W_{r_5})_j + k_{r_6} (W_{r_6})_q + k_{r_7} (W_{r_7})_n ;$$

$$W_{Z_3} = W_{r_8}^* + W_{r_9}^* + W_{Z_1} = k_{r_8} (W_{r_8})_i + k_{r_9} (W_{r_9})_j + W_{Z_1},$$

где k_{r_i} — коэффициент значимости i -й вершины графа $G(V, L, W)$; i, j, q, n — индексы, характеризующие количество дуг для каждой рассматриваемой в пп. 3–5 вершины.

8. Для каждой задачи определяется максимальное значение эффективности ее выполнения путем сравнения эффективностей, характеризующих каждый сценарий.

В отечественной и зарубежной литературе [31, 32] даны различные по своей сути определения эффективности. Г. Б. Петуховым введен показатель эффективности, рассматриваемый как вероятностная мера соответствия характеристик случайных эффектов целенаправленного процесса требуемым (директивно заданным) значениям этих характеристик [33].

Эффективность функционирования системы определим как комплексное свойство, характеризующее степень достижения системой целевого предназначения (цели, функции, задачи), определяемого требованиями, предъявляемыми к нему (к ним) [33, 34]. Поиск оптимальной струк-

туры профиля сводится к поиску множества матриц, характеризующих достижение целевого предназначения системы, соответствующего выполнению условия оптимальности (1). В условиях ограниченности ресурса и необходимости реализации целевого предназначения системы при выборе оптимальной структуры СТС можно использовать несколько стратегий:

– выполнение полного набора функций с максимальной эффективностью. Такой вариант, как правило, применим в условиях большого количества ресурсов, минимального количества задач, функций, целей, обеспечивающих выполнение целевого предназначения системы, отсутствия пагубных результатов воздействия дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению функционирования системы:

$$W_{\Sigma} = \max W;$$

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma} = \max W, W_{r_i} > W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} > W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} > W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} > W_{a_i \text{ треб}}, W_{r_i} = \max W_{r_i},$$

$$W_{z_i} = \max W_{z_i}, W_{f_i} = \max W_{f_i}, W_{a_i} = \max W_{a_i};$$

– выполнение в первую очередь ограниченного набора задач, функций, целей, критически важных для достижения целевого предназначения СТС, с максимальной эффективностью, остальных – с эффективностью, не ниже требуемой. В данном случае роль играют ограниченность ресурса системы, нарушения функционирования отдельных элементов, снижение качества выполнения задач, функций, целей:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma 1} + W_{\Sigma 2 \text{ крит}};$$

$$W_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i \text{ крит}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i \text{ крит}},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \max W, W_{r_i} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} \geq W_{a_i \text{ треб}};$$

– выполнение всех элементов профиля функционирования системы с эффективностью, не ниже требуемой:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma} \geq \max W_{\Sigma \text{ треб}}, W_{r_i} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} \geq W_{a_i \text{ треб}};$$

– выполнение критически важных элементов профиля функционирования с эффективностью, не ниже требуемой, при этом часть запланированных к выполнению функций, задач может не выполняться для перераспределения ресурсов системы:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma 1} + W_{\Sigma 2 \text{ крит}};$$

$$W_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i \text{ крит}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i \text{ крит}},$$

$$W_{\Sigma} = \max W, W_{r_i \text{ крит}} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i \text{ крит}} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i \text{ крит}} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i \text{ крит}} \geq W_{a_i \text{ треб}}, W_{r_i} \geq 0,$$

$$W_{z_i} \geq 0, W_{f_i} \geq 0, W_{a_i} \geq 0.$$

Выбор сценария построения СТС определяет условия действия лиц, принимающих решение, при нарушении функционирования системы для обеспечения непрерывного функционирования функционально устойчивой системы.

Распределение ресурсов в условиях нарушения функционирования СТС

Для оценки эффективности функционирования СТС в условиях нарушения функционирования СТС (ПФС) рассмотрим граф $G(V, L, W)$. Невыполнение того или иного i -го элемента профиля будем рассматривать как отсутствие дуги (дуг) l_i , связывающей его с другим (другими) элементом СТС.

Возникновение ситуаций пропадания дуг и вершин графа приведет к необходимости реконфигурации СТС [4, 35]. При отсутствии возможности провести реконфигурацию система деградирует в систему, описываемую новым графом $G'(V', L', W')$, при этом $G' \subset G$. Последующее нарушение функционирования системы и ее элементов, выход из строя отдельных элементов приведут к дальнейшей деградации системы, при этом полное отсутствие дуг, показывающих связи между элементами графа $G(V, L, W)$, соответствует пустому графу.

Степень деградации системы, определяемая отличием исходного графа от полученного, после пропадания дуг и вершин

$$k_d = \frac{v' + l'}{v + l},$$

где v' — количество вершин, пропавших из исходного графа, $v' \in V'$; l' — количество дуг, пропавших из исходного графа, $l' \in L'$; v — количество вершин исходного графа, $v \in V$; l — количество дуг исходного графа, $l \in L$.

Каждому графу $G'(V', L', W')$ ставится в соответствие коэффициент деградации k_d : $G \rightarrow k_d = 0, G'k'_d, \dots, G^i \rightarrow k_d^i = 1$.

Нарушение функционирования того или иного элемента СТС, множества элементов на разных уровнях иерархии системы может характеризоваться одинаковым коэффициентом деградации, при этом для каждого коэффициента может формироваться не один вариант построения СТС (построения графа), а множество. Для оценки эффективности функционирования СТС предлагается использовать математическое ожидание W :

$$W_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^N W_\Sigma^i}{N},$$

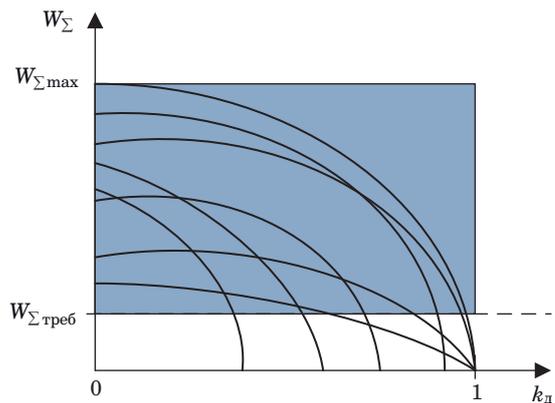
где N — возможное количество графов, описывающих СТС, с нарушенными (не выполняющимися, пропавшими) дугами и вершинами, которые можно построить для i -го коэффициента деградации k_d .

Таким образом, изменение (деградацию) состояния СТС при воздействии различных дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению функционирования СТС, можно описать тремя величинами:

$$D = \{k_d^*, G^*, W^*\}, \quad (2)$$

где k_d^* — множество, характеризующее изменение коэффициента деградации, $k_d^* = \{k_{d0}, k_{d1}, \dots, k_{di}\}$; G^* — множество, характеризующее изменение графа G , $G^* = \{G_0, G_1, \dots, G_i\}$; W^* — множество, показывающее изменение эффективности выполнения профиля функционирования СТС, $W^* = \{W_0, W_1, \dots, W_i\}$.

Изменение состояния СТС, приводящее к нарушению ее функционирования, соответствующее множеству D , определяемому по выражению (2), можно представить в виде зависимости W от k_d (рис. 1). Выбор оптимальной структуры СТС сводится к одной из четырех, представленных выше, стратегий, которая соответствует максимуму эффективности выполнения профи-



■ **Рис. 1.** Зависимость эффективности от коэффициента деградации структуры СТС
 ■ **Fig. 1.** Dependence of efficiency on the coefficient of degradation of the CTS structure

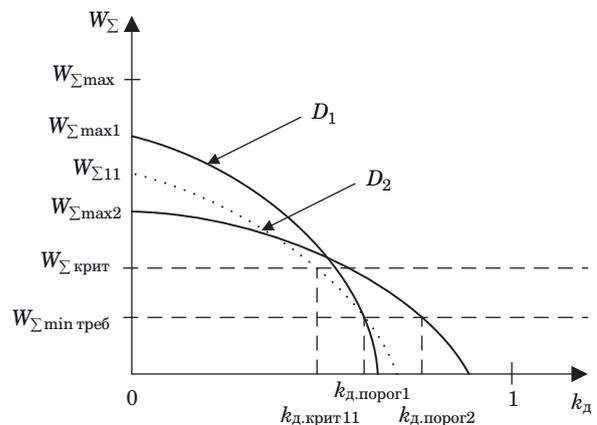
ля функционирования системы при минимальных затратах ресурса.

Пример выбора оптимальной структуры СТС

Рассмотрим два сценария D_1 и D_2 изменения состояния СТС под воздействием дестабилизирующих факторов и произведем выбор наиболее подходящего для данной СТС (рис. 2).

Предположим, что для двух сценариев $D_1(W_\Sigma, k_d) \approx D_2(W_\Sigma, k_d)$, при этом представленные на рис. 2 кривые имеют различное основание k_d . Необходимо определить оптимальную структуру СТС в условиях ее деградации.

Минимальному требуемому значению суммарной эффективности функционирования СТС для сценариев D_1 и D_2 будут соответствовать



■ **Рис. 2.** Зависимость эффективности от коэффициента деградации структуры СТС для сценариев D_1 и D_2
 ■ **Fig. 2.** Dependence of efficiency on the coefficient of degradation of the CTS structure for scenarios D_1 and D_2

коэффициенты деградации $k_{д.порог1}$ и $k_{д.порог2}$. Данные состояния системы определяют такие условия, при которых система не сможет выполнить целевое предназначение.

При рассмотрении СТС, определяемой двумя состояниями деградации, предлагается исследовать четыре предложенных в работе подхода к поиску оптимальной структуры СТС. Одним из критериев выбирается выполнение большего количества элементов профиля в условиях максимально большого количества нарушений функционирования элементов, т. е. когда $k_{д2} > k_{д1}$. Такой подход может использоваться для систем, где критичны вопросы надежности, живучести, безопасности элементов и процесса функционирования. К таким системам можно отнести системы, работающие в сфере обороны, защиты гражданского населения и т. д. Для случая, изображенного на рис. 2, по этому критерию выбираем сценарий D_2 .

Другим критерием может служить качество выполнения профиля функционирования и его элементов. При этом выбор сценария действия может осуществляться:

- по максимальному значению качества выполнения профиля. Для данного рассматриваемого случая по такому критерию оптимальным будет вариант D_2 ;

- при обеспечении качества выполнения профиля не ниже требуемого при условии максимума качества выполнения критически значимых элементов профиля;

- при обеспечении качества выполнения критически значимых элементов профиля независимо от качества выполнения профиля функционирования.

Выбор того или иного критерия происходит в зависимости от условий функционирования системы, специфики решаемых задач, целевого предназначения самой системы и профиля ее функционирования [7, 35].

Пример оптимизации использования ресурсов для выполнения задач

Рассмотрим систему, которая выполняет четыре задачи Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 , и для каждой задачи определим условия ее выполнения. Для выполнения задач в системе имеется ресурс $E = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7\}$, при этом $r_6 = r_1 + r_2$ и $r_7 = r_5 + r_4$. Эффективность и качество функционирования каждого ресурса описываются множеством состояний w_{ij} из W , изменение которых показывает нарушение и деградацию каждого ресурса системы. Предположим, что каждая задача выполняется с использованием следующих ресурсов: $Z_1 = r_6 \otimes r_3 \oplus r_7 \otimes r_1 \oplus r_6 \otimes r_5 \oplus r_4 \otimes r_2 \otimes r_3$, $Z_2 =$

$= r_1 \otimes r_3 \otimes r_4 \oplus r_5 \otimes r_1 \oplus r_7 \otimes r_2$, $Z_3 = r_2 \otimes r_7 \oplus r_5 \otimes r_2 \otimes r_3 \oplus r_3 \otimes r_1$, $Z_4 = r_6 \otimes r_7 \oplus r_1 \otimes r_3 \oplus r_2 \otimes r_3 \otimes r_4$, где операция \oplus определяется как логическое «ИЛИ».

Эффективность выполнения каждой задачи равна сумме эффективностей функционирования всех ресурсов, использующихся для выполнения данной задачи, при этом эффективность функционирования каждого ресурса определяется выражением $W_i = k_i w_i$:

$$\begin{aligned} W_{Z_1} &= (k_{r_6} W_{r_6} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_1} W_{r_1}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_6} W_{r_6} + k_{r_5} W_{r_5}) \oplus (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_3} W_{r_3}); \\ W_{Z_2} &= (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_1} W_{r_1} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_5} W_{r_5} + k_{r_1} W_{r_1}) \oplus (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_2} W_{r_2}); \\ W_{Z_3} &= (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_2} W_{r_2}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_5} W_{r_5} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus (k_{r_3} W_{r_3} + k_{r_1} W_{r_1}); \\ W_{Z_4} &= (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_6} W_{r_6}) \oplus (k_{r_1} W_{r_1} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_3} W_{r_3}). \end{aligned}$$

Выбор варианта выполнения задачи за счет имеющегося ресурса будет характеризоваться максимальной эффективностью одного из вариантов задействования ресурсов для выполнения этой задачи.

Для формирования матрицы выполнения задач проверяется условие: если ресурс необходим для выполнения задачи или может использоваться в каком-либо сценарии ее выполнения, то в ячейку матрицы записывается значение «1», иначе значение «0». Кроме этого, для каждой задачи матрицу выполнимости можно показать, используя только те строки и столбцы, на пересечении которых в матрице присутствует значение «1», т. е. используя только те элементы, которые влияют на выполнение рассматриваемой задачи.

Для описания качества функционирования ресурсов системы предлагается сформировать матрицу эффективности. Значения в ячейках данной матрицы могут изменяться от 1 до 0, где значению «1» соответствует 100%-я эффективность функционирования ресурса, а значению «0» – прекращение функционирования ресурса.

Формирование матрицы состояния системы в каждый момент времени сводится к выполнению логической операции «ИЛИ» над соответствующими элементами матриц выполнения задач и нарушения выполнения задач: $|Y| = |Y_{ZE}| \oplus |Y_{ZE}^*|$, для данного выражения определены операции исключающего «ИЛИ» $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 1 = 1$, $1 \oplus 1 = 0$.

Таким образом, при переходе из одного состояния системы в другое, обусловленное нарушением функционирования СТС, происходит деградация системы, при этом вариант (сценарий) задействования ресурсов для выполнения каждой задачи пересчитывается в соответствии с матрицей эффективности (качества функционирования) системы. Для выполнения каждой задачи в любой момент времени в системе выбирается вариант, обладающий наибольшей эффективностью функционирования, для которого требуется минимальное количество ресурсов. Данному варианту ставится в соответствие оптимальная матрица выполнения задач.

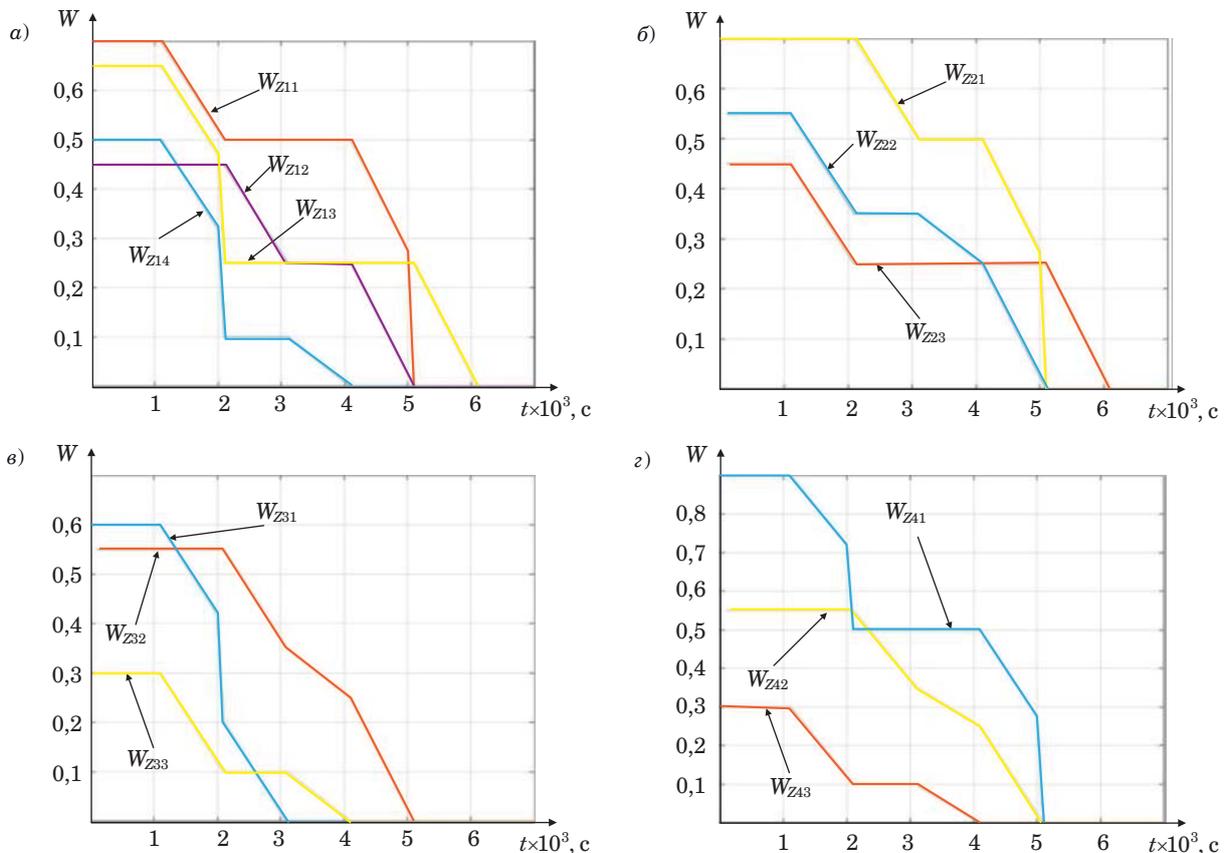
Представленный в работе подход был реализован в MatLab. В качестве исходных данных выбраны следующие: стратегия максимальной эффективности выполнения задачи; моделирование проводилось для ресурсов $E = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7\}$; коэффициенты значимости задаются матрицей $k_i = \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7\} = \{0,2, 0,2, 0,1, 0,25, 0,25, 0,2, 0,25\}$; время моделирования 10^4 с. Полученные результаты для задач Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 (рис. 3, а-г) показывают основание вы-

бора того или иного сценария задействования ресурсов системы, позволяющих выполнить задачу с максимальной эффективностью.

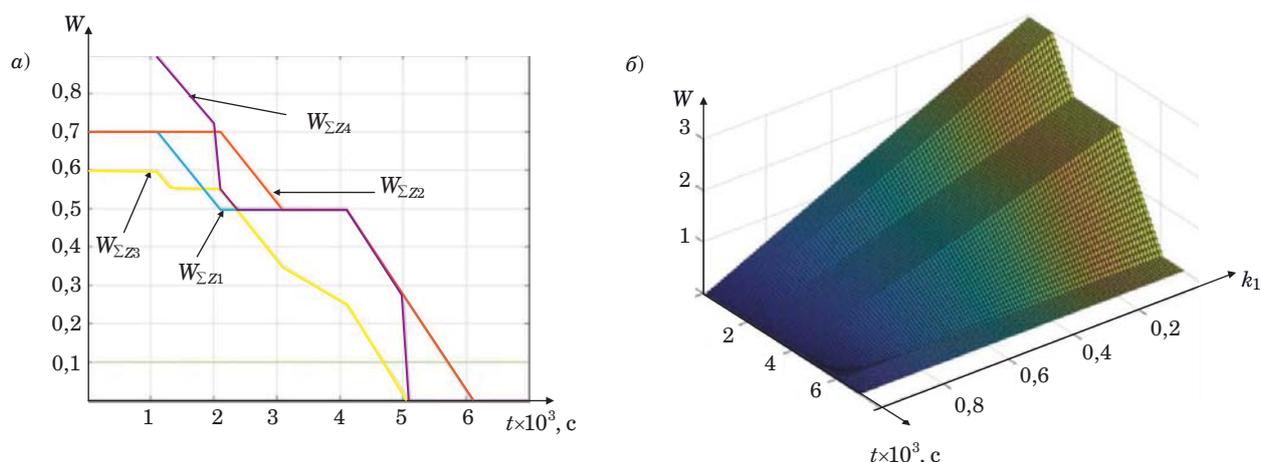
Результаты выбора сценария для каждой задачи представлены на рис. 4, а. Таким образом, с увеличением коэффициента деградации системы и нагрузки на оставшиеся ресурсы происходит снижение эффективности функционирования ресурсов и выполнения задач.

Для каждой задачи построены графики зависимости эффективности их выполнения от времени функционирования (коэффициента деградации) и коэффициента значимости ресурсов системы. Видно из рис. 4, б для первой задачи, что с увеличением значимости уменьшается эффективность выполнения задачи, что обусловлено возрастающей нагрузкой на ресурсы системы при нарушении функционирования ее элементов.

Результатом моделирования для каждого варианта исходных данных в любой момент времени моделирования будет оптимальное задействование ресурсов системы для каждой задачи, например, для $t_1 = 1200$ с и $t_2 = 2200$ с:



■ **Рис. 3.** Зависимость эффективности выполнения первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) задачи от времени моделирования с использованием различных сценариев задействования ресурсов
 ■ **Fig. 3.** Dependence of the efficiency of the first (а), second (б), third (в) and fourth (г) task using different scenarios of resource involvement on the simulation time



■ **Рис. 4.** Зависимость эффективности выполнения задач: *a* – от времени моделирования; *б* – от времени моделирования и значимости задачи

■ **Fig. 4.** Dependence of the efficiency of task execution: *a* – on the simulation time; *б* – on the modeling time and the significance of the task

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}_{\text{opt1}} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \\
 \mathbf{Y}_{\text{opt2}} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Как видно из матриц (3), с увеличением времени функционирования (моделирования) системы для одних задач сценарий их выполнения (задействования ресурса) не меняется, для других может происходить его смена. На времени моделирования t_1 и t_2 для задач Z_1 и Z_2 сценарий остается прежним (см. рис. 3, *a*, *б*), а для задач Z_3 и Z_4 меняется (см. рис. 3, *в*, *г*).

Заключение

Изменение состояния системы и ее элементов из-за отказов, поломок, последствий воздействия различных факторов приводит к постепенной деградации системы, неспособности ее выполнить свое целевое предназначение. Выполнение целевого предназначения в условиях ограниченности ресурса и необходимости формировать резерв средств системы наряду с потребностями лиц, принимающих решение, в получении результатов функционирования системы с максимальным качеством определяют актуальность исследования, а также необходимость оптимизации СТС в условиях меняющейся обстановки.

Особенностью алгоритма оптимизации структуры СТС является учет процесса функционирования системы и ее элементов, определение связей между ними и оценка влияния пропадания элементов ПФС на качество функционирования системы. Предлагается использовать четыре возможных варианта оптимизации структуры, в том числе на основе учета обеспечения выполнения критически значимых элементов ПФС. Предложенный в работе алгоритм разработан в развитие идей авторов, представленных в [1, 5, 7] и направленных на обеспечение функциональной устойчивости СТС.

Литература

1. **Остроумов О. А.** Проблема обеспечения функциональной устойчивости систем критически важных объектов. *Электросвязь*, 2022, № 1, с. 14–18. doi:10.34832/ELSV.2022.26.1.005
2. **Burlov V., Lepeshkin O., Lepeshkin M.** Parameters of the synthesized model of management of technosphere safety in the region. *E3S Web of Conferences, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019)*, 2020, vol. 164, pp. 7–11. doi:10.1051/e3sconf/202016407011
3. **Burlov V., Uzun O., Grachev M., Faustov S., Sipovich D.** Web-based Power Management and Use Model. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258 AISC, pp. 629–641. doi:10.1007/978-3-030-57450-5_54
4. **Бородакий Ю. В., Тарасов А. А.** О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем. *Известия ТРТУ*, 2006, № 7 (62), с. 5–12.

5. Кондрашов Ю. В., Сатдинов А. И., Синюк А. Д., Остроумов О. А. Концептуальная модель контроля функций системы связи для выявления конфликтных ситуаций. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2022, т. 16, № 5, с. 21–27. doi:10.36724/2072-8735-2022-16-5-21-27
6. Петренко С. А. Концепция поддержания работоспособности киберсистем в условиях информационно-технических воздействий. *Труды ИСА РАН*, 2009, т. 41, с. 175–193.
7. Лаута О. С., Баленко Е. Г., Федоров В. Х., Лепешкин О. М., Остроумов О. А. Метод построения профиля функционирования сложной технической системы. *Инженерный вестник Дона*, 2023, № 2. ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2023/8183 (дата обращения: 10.05.2023).
8. El-Mowafy A. On detection of observation faults in the observation and position domains for positioning of intelligent transport systems. *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93(4). doi:10.1007/s00190-019-01306-1
9. ChauPattnaik S., Ray M., Nayak M. Component based reliability prediction. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2021, vol. 12, pp. 391–406. doi.org/10.1007/s13198-021-01079-x
10. Si S., Zhao J., Cai Z., Dui H. Recent advances in system reliability optimization driven by importance measures. *Frontiers of Engineering Management*, 2020, vol. 7(1), pp. 335–358. doi:10.1007/s42524-020-0112-6
11. Debnath S., Arif W., Roy S., Baishya S., Sen D. A comprehensive survey of emergency communication network and management. *Wireless Personal Communications*, 2022, vol. 124, pp. 1375–1421. doi:10.1007/s11277-021-09411-1
12. Kabadurmus O., Smith A. E. Evaluating reliability/survivability of capacitated wireless networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 26–40. doi:10.1109/TR.2017.2712667
13. Brauner F., Claßen M., Fiedrich F. Competence as Enabler of Urban Critical Infrastructure Resilience Assessment. In: *Urban Disaster Resilience and Security*. A. Fekete, F. Fiedrich (eds). The Urban Book Series Springer, Cham., 2018, pp. 171–184. doi:10.1007/978-3-319-68606-6_11
14. Савищенко Н. В., Остроумов О. А. Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса — Накагами. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 6, с. 71–80. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.71
15. Pashintsev V. P., Chipigs A. F., Koval S. A., Skorik A. D. Analytical method for determining the interval of spatial correlation of fading in single-beam decimeter radio line. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 89–104. doi:10.1615/TELECOMRADENG.2021038432
16. Макаренко С. И. *Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография*. СПб., Научно-технические технологии, 2020. 337 с.
17. Haque M. A., Shetty S., Krishnappa B. ICS-CRAT: A cyber resilience assessment tool for industrial control systems. *2019 IEEE 5th Intl Conf. on Big Data Security on Cloud (Big Data Security), IEEE Intl Conf. on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conf. on Intelligent Data and Security (IDS)*, Washington, DC, USA, 2019, pp. 273–281. doi:10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS.2019.00058
18. Haque M. A., De Teyou G. K., Shetty S., Krishnappa B. Cyber resilience framework for industrial control systems: concepts, metrics, and insights. *2018 IEEE Intern. Conf. on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, Miami, FL, USA, 2018, pp. 25–30. doi:10.1109/ISI.2018.8587398
19. Kotenko I., Saenko I., Laut O., Karpov M. Methodology for management of the protection system of smart power supply networks in the context of cyber-attacks. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18. doi:10.3390/en14185963
20. Kete N., Punzo G., Linkov I. Enhancing resilience within and between critical infrastructure systems. *Environment Systems and Decisions*, 2018, vol. 38, pp. 275–277. doi:10.1007/s10669-018-9706-5
21. Zhu Q. Multilayer Cyber-Physical Security and Resilience for Smart Grid. In: *Smart Grid Control. Power Electronics and Power Systems*. J. Stoustrup, A. Annaswamy, A. Chakraborty, Z. Qu (eds). Springer, Cham. 2019, pp. 225–239. doi:10.1007/978-3-319-98310-3_14
22. Bassam Moussa, Parisa Akaber, Mourad Debbabi, Chadi Assi. Critical links identification for selective outages in interdependent power-communication networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 472–483.
23. Shaikh A., Gupta P. Real-time intrusion detection based on residual learning through ResNet algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022. doi:10.1007/s13198-021-01558-1
24. Афонин И. Е., Петров С. В., Макаренко С. И. Переход к адаптивно-сетевой структуре системы управления воздушно-космической обороной, как один из основных путей повышения ее устойчивости. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2021, № 19, с. 159–178. doi:10.24412/2500-4352-2021-19-159-178. <https://vva.mil.ru/upload/site21/B7st1fUZlu.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).
25. Hatim Q., Saldaña Ch., Shao G., Kim D. B., Morris K., Witherell P., Rachuri S., Kumara S. A decision support methodology for integrated machining process and operation plans for sustainability and productivity assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 3207–3230. doi:10.1007/s00170-019-04268-y

26. Kumari J., Karim R., Thaduri A., Pierre D. A framework for now-casting and forecasting in augmented asset management. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022, vol. 13, pp. 2640–2655. doi:10.1007/s13198-022-01721-2
27. Hammad A. W. A., Haddad A. Infrastructure Resilience: Assessment, Challenges and Insights. In: *Industry, Innovation and Infrastructure. Series: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. W. L. Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. L. Salvia, T. Wall (eds). Springer, Cham. 2021, pp. 1–13. doi:10.1007/978-3-319-71059-4_25-1
28. Sinjuk A. D., Ostroumov O. A. Theorem about key capacity of a communication network. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 79–87. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-79-87
29. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 8th Intern. Scientific Conf. "TechSys 2019" – Engineering, Technologies and Systems*, 2019, vol. 618, pp. 12–88. 10.1088/1757-899X/618/1/012088
30. Юсупов Р. М., Мусаев А. А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий. *Тр. СПИИРАН*, 2017, вып. 1(51), с. 5–34. doi:10.15622/sp.51.1
31. Арсеньев В. Н., Хомоненко А. Д., Ядренкин А. А. Взвешенный учет априорной и опытной информации в задаче оценивания эффективности функционирования системы управления при распределении числа испытаний по закону Паскаля. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 39–47. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-39-47
32. Беляков М. И. Модель процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры в задаче оценивания его эффективности. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2020, № 11–12 (149–150), с. 71–75.
33. Сухов А. М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 3, с. 31–44. doi:10.31799/1684-8853-2022-3-31-44
34. Сухов А. М., Крупенин А. В., Якунин В. И. Методы анализа и синтеза исследования эффективности процессов функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. *Автоматизация процессов управления*, 2021, № 4 (66), с. 4–14.
35. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Петров М. В. Базовый сценарий поддержки принятия решений на основе моделей жизни пользователей в цифровой среде. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 4, с. 47–60. doi:10.31799/1684-8853-2021-4-47-60

UDC 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25

EDN: ABOZFA

Optimization of the functioning profile of a complex technical systemA. D. Sinuk^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-0608-4359O. M. Lepeshkin^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0362-0446V. A. Filimonov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-2297-9338O. A. Ostroumov^a, PhD, Tech., orcid.org/0000-0003-1674-6248, oleg-26stav@mail.ru^aS. M. Budenny Military Academy of Communication, 3, Tikhoretskii Pr., 190064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Under the conditions of limited resources of a system, there is a need to use them as efficiently as possible. When designing and building a system, its structural optimization is used, in which it can be redundant in terms of the functions and tasks performed. This is inefficient and requires a lot of resources. **Purpose:** To develop an algorithm for optimizing the use of resources and fulfilling the profile of the functioning of a complex technical system to ensure the fulfillment of its intended purpose. **Results:** We develop a new algorithm for optimizing the use of resources and fulfilling the functioning profile of a complex technical system, based on the need for the system to perform its functions and tasks. This will allow one to obtain optimal scenarios for the performance of the function and task of the system anytime, regardless of the influence of destabilizing factors and changing conditions, and to ensure the functional stability of the system in a timely manner. We propose to search for a set of options allowing to use resources to perform each task of the system and then to choose the optimal scenario for it from this set. The choice is made on the basis of an assessment of the total efficiency of resource use for each task. We present the results of using the algorithm to select the optimal scenario for the execution of a limited set of system tasks, the results being based on the formation of a set of matrices for optimal task performance and performance matrices for the intended purpose of the system. **Practical relevance:** The results of the study can be used in the design and construction of management, control, decision support systems for calculating and choosing the most effective option for performing tasks, functions, and intended purpose of a system.

Keywords – optimization, functional stability, reliability, criticality of system elements, system criticality, communication system, control system, complex technical system, system functioning profile, system functioning regulation, functioning efficiency, system state, task execution script.

For citation: Sinuk A. D., Lepeshkin O. M., Filimonov V. A., Ostroumov O. A. Optimization of the functioning profile of a complex technical system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 12–25 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

References

- Ostroumov O. A. The problem of ensuring the functional stability of systems of critically important objects. *Elektrosvyaz*, 2022, no. 1, pp. 14–18 (In Russian). doi:10.34832/ELSV.2022.26.1.005
- Burlov V., Lepeshkin O., Lepeshkin M. Parameters of the synthesized model of management of technosphere safety in the region. *E3S Web of Conferences, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019)*, 2020, vol. 164, pp. 7–11. doi:10.1051/e3sconf/202016407011
- Burlov V., Uzun O., Grachev M., Faustov S., Sipovich D. *Web-based Power Management and Use Model*. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258 AISC, pp. 629–641. doi:10.1007/978-3-030-57450-5_54
- Borodaki Yu. V., Tarasov A. A. On the functional stability of information and computing systems. *Izvestiya Taganrogsogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 62, no. 7, pp. 5–12 (In Russian).
- Sinyuk A. D., Satdinov A. I., Kondrashov Yu. V., Ostroumov O. A. Communication system functions control conceptual model for detecting conflict situations. *T-Comm*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 21–27 (In Russian). doi:10.36724/2072-8735-2022-16-5-21-27
- Petrenko S. A. The concept of maintaining the cyber systems operability in conditions of information and technical influences. *Proc. of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 41, pp. 175–193 (In Russian).
- Lauta O. S., Balenko E. G., Fedorov V. Kh., Lepeshkin O. M., Ostroumov O. A. Method for constructing a profile of the functioning of a complex technical system. *Engineering Journal of Don*, 2023, no. 2. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2023/8183 (accessed 10 May 2023) (In Russian).
- El-Mowafy A. On detection of observation faults in the observation and position domains for positioning of intelligent transport systems. *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93(4). doi:10.1007/s00190-019-01306-1
- ChauPattnaik S., Ray M., Nayak M. Component based reliability prediction. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2021, vol. 12, pp. 391–406. doi.org/10.1007/s13198-021-01079-x
- Si S., Zhao J., Cai Z., Dui H. Recent advances in system reliability optimization driven by importance measures. *Frontiers of Engineering Management*, 2020, vol. 7(1), pp. 335–358. doi:10.1007/s42524-020-0112-6
- Debnath S., Arif W., Roy S., Baishya S., Sen D. A comprehensive survey of emergency communication network and management. *Wireless Personal Communications*, 2022, vol. 124, pp. 1375–1421. doi:10.1007/s11277-021-09411-1
- Kabadurmus O., Smith A. E. Evaluating reliability/survivability of capacitated wireless networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 26–40. doi:10.1109/TR.2017.2712667
- Brauner F., Claßen M., Fiedrich F. *Competence as Enabler of Urban Critical Infrastructure Resilience Assessment*. In: *Urban Disaster Resilience and Security*. A. Fekete, F. Fiedrich (eds). The Urban Book Series Springer, Cham., 2018, pp. 171–184. doi:10.1007/978-3-319-68606-6_11
- Savischenko N. V., Ostroumov O. A. Calculation of optimal and reasonable number of diversity branches in communication channels with additive white Gaussian noise and common Rice – Nakagami fading. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 71–80 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.71
- Pashintsev V. P., Chipigs A. F., Koval S. A., Skorik A. D. Analytical method for determining the interval of spatial correlation of fading in single-beam decimeter radio line. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 89–104. doi:10.1615/TELECOMRADENG.2021038432
- Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyah prednamerennykh destabilizirujushchih vozdeystvij i vedenija razvedki* [Models of communication systems in conditions of deliberate destabilizing impacts and intelligence]. Saint-Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 337 p. (In Russian).
- Haque M. A., Shetty S., Krishnappa B. ICS-CRAT: A cyber resilience assessment tool for industrial control systems. *2019 IEEE 5th Intl Conf. on Big Data Security on Cloud (Big Data Security), IEEE Intl Conf. on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conf. on Intelligent Data and Security (IDS)*, Washington, DC, USA, 2019, pp. 273–281. doi:10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS.2019.00058
- Haque M. A., De Teyou G. K., Shetty S., Krishnappa B. Cyber resilience framework for industrial control systems: concepts, metrics, and insights. *2018 IEEE Intern. Conf. on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, Miami, FL, USA, 2018, pp. 25–30. doi:10.1109/ISI.2018.8587398
- Kotenko I., Saenko I., Lauta O., Karpov M. Methodology for management of the protection system of smart power supply networks in the context of cyberattacks. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18. doi:10.3390/en14185963
- Kete N., Punzo G., Linkov I. Enhancing resilience within and between critical infrastructure systems. *Environment Systems and Decisions*, 2018, vol. 38, pp. 275–277. doi:10.1007/s10669-018-9706-5
- Zhu Q. *Multilayer Cyber-Physical Security and Resilience for Smart Grid*. In: *Smart Grid Control. Power Electronics and Power Systems*. J. Stoustrup, A. Annaswamy, A. Chakraborty, Z. Qu (eds). Springer, Cham. 2019, pp. 225–239. doi:10.1007/978-3-319-98310-3_14
- Bassam Moussa, Parisa Akaber, Mourad Debbabi, Chadi Assi. Critical links identification for selective outages in interdependent power-communication networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 472–483.
- Shaikh A., Gupta P. Real-time intrusion detection based on residual learning through ResNet algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022. doi:10.1007/s13198-021-01558-1
- Afonin I. E., Petrov S. V., Makarenko S. I. Transition to the adaptive network structure of the aerospace defense control system as one of the main ways to increase its stability. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, 2021, no. 19, pp. 159–178. doi:10.24412/2500-4352-2021-19-159-178. Available at: <https://vva.mil.ru/upload/site21/B7st1fUZlu.pdf> (accessed 10 May 2023) (In Russian).
- Hatim Q., Saldana Ch., Shao G., Kim D. B., Morris Kc., Witherell P., Rachuri S., Kumara S. A decision support methodology for integrated machining process and operation plans for sustainability and productivity assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 3207–3230. doi:10.1007/s00170-019-04268-y
- Kumari J., Karim R., Thaduri A., Pierre D. A framework for now-casting and forecasting in augmented asset management. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022, vol. 13, pp. 2640–2655. doi:10.1007/s13198-022-01721-2
- Hammad A. W. A., Haddad A. *Infrastructure Resilience: Assessment, Challenges and Insights*. In: *Industry, Innovation and Infrastructure. Series: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. W. L. Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. L. Salvia, T. Wall (eds). Springer, Cham, 2021, pp. 1–13. doi:10.1007/978-3-319-71059-4_25-1
- Sinjuk A. D., Ostroumov O. A. Theorem about key capacity of a communication network. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 79–87. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-79-87
- Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 8th Intern. Scientific Conf. "TechSys 2019" – Engineering, Technologies and Systems*, 2019, vol. 618, pp. 12–88. doi:10.1088/1757-899X/618/1/012088
- Yusupov R. M., Musaev A. A. Efficiency of information systems and technologies: Features of estimation. *SPIIRAS Proc.*, 2017, vol. 2, no. 51, pp. 5–34 (In Russian). doi:10.15622/sp.51.1
- Arseniev V. N., Khomonenko A. D., Yadrenkin A. A. Weighed ranking of aprioristic and experimental data in control system functioning efficiency estimation problem with Pascal-distributed number of tests. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 39–47 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-39-47
- Belyakov M. I. The information security system functioning process model of a critical information infrastructure object in the assessment of its effectiveness. *Military Enginry. Iss. 16: Counter-terrorism Technical Devices*, 2020, no. 11–12 (149–150), pp. 37–40 (In Russian).

33. Sukhov A. M. Evaluating the effectiveness of the information security system process based on the theory of stochastic indicators. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 3, pp. 31–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-3-31-44
34. Sukhov A. M., Krupenin A. V., Yakunin V. I. The analysis and synthesis methods of research of the operation processes efficiency of the computer attacks detection, prevention and consequences elimination system. *Automation of Control Processes*, 2021, no. 4 (66), pp. 4–14 (In Russian).
35. Smirnov A. V., Levashova T. V., Petrov M. V. Scenario model of intelligent decision support based on user's digital life models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 4, pp. 47–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-4-47-60
-
-

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.
