

## Каскадно-иерархическое моделирование в задачах анализа динамики ресурсных характеристик сложных систем

Ю. В. Доронина<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-4699-025X](https://orcid.org/0000-0003-4699-025X), [apkSev@yandex.ru](mailto:apkSev@yandex.ru)

А. В. Скатков<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-5678-9587](https://orcid.org/0000-0002-5678-9587)

<sup>а</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь, Университетская ул., 33, 299053, РФ

**Постановка проблемы:** описание динамики ресурсных характеристик сложных систем обуславливает необходимость декомпозиции оптимизационных задач и детализацию уровней представления систем, что порождает полимодельность. В задачах, где требуется построение полимодельных комплексов, имеющих сложные связи между моделями, применение только иерархической топологии комплексов моделей не обеспечивает взаимосвязь факторов динамики моделирования и учет объема данных на каждом иерархическом уровне и не отражает параметрическую изменчивость экспериментов на каждом уровне. **Цель:** разработка методологии построения полимодельных комплексов в рамках каскадно-иерархических структур и формирование оценочного функционала с учетом принципа его перманентности для моделирования ресурсных характеристик сложных систем при исследовании динамики деградационных отказов и пополнения ресурсов. **Методы:** системный анализ и структурный синтез моделей, встроенные модели Маркова с квазипоглощающим состоянием на локальном уровне полимодельного комплекса. **Результаты:** сформулирован принцип перманентности оценочного функционала, на основе которого реализован подход к решению задач поддержки принятия решений по ресурсной обеспеченности сложных технических систем путем определения стратегии обслуживания. В общем случае каскадно-иерархическая схема моделирования сформирована в трехмерном функциональном пространстве: структура системы – вид (уровень) модели – каскады планов моделирования. Предложенная методология моделирования в рамках каскадно-иерархической топологии полимодельного комплекса на основе принципа перманентности оценочного функционала позволила сохранить константность представимости системных характеристик при фазовом укрупнении пространства моделирования и тем самым рационализировать планирование экспериментов. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы при разработке и анализе динамики ресурсной обеспеченности функционирования сложных технических систем. Предложенный подход реализует возможность в параметрическом модельном пространстве строить планы исследований сложных систем и на основе принципа перманентности оценочного функционала сохранить константность представимости системных характеристик при фазовом укрупнении пространства моделирования.

**Ключевые слова** – полимодельный комплекс, каскадно-иерархические модели, оценочный функционал, динамика ресурсов, сложные технические системы, модели Маркова.

**Для цитирования:** Доронина Ю. В., Скатков А. В. Каскадно-иерархическое моделирование в задачах анализа динамики ресурсных характеристик сложных систем. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 48–58. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-48-58

**For citation:** Doronina Yu. V., Skatkov A. V. Cascade-hierarchical modeling in analyzing the dynamics of complex system resource characteristics. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 48–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-48-58

### Введение

В задачах анализа характеристик сложных систем исследователю в большинстве случаев приходится осмысливать причинно-следственные связи, разворачивающиеся в многомерном координатном пространстве. При построении полимодельных комплексов (ПМК), имеющих сложные связи между отдельными моделями, если применять только иерархическую топологию (монотопологию) моделей, могут появиться следующие проблемы:

1) сложность обеспечения взаимосвязи факторов динамики моделирования и учета объема данных на каждом иерархическом уровне;

2) сложность отражения параметрической изменчивости экспериментов на каждом уровне;

3) упрощение модельной организации на каждом иерархическом уровне,

— что может привести к невозможности оценить качество модели и требуемый объем данных для моделирования [1, 2].

Исследование ресурсных характеристик сложных технических систем (СТС) реализуется в процессах анализа и синтеза этих систем на основе аналитического или имитационного подходов и часто сопряжено с проблемой размерности, заключающейся как в объеме требуемой априорной информации для моделирования, так и в структурной сложности отображений (моделей), реализующих процесс исследования [2–5]. При построении комплексов моделей для анализа ресурсных характеристик СТС должны решаться задачи:

— передачи данных результатов работы одной модели в другую, что приводит к росту промежуточных данных;

— нивелирования сложности оптимизационных задач и неопределенности характеристик функционирования СТС путем декомпозиции и детализации уровней представления моделей;

— снижения трудности в оценке качества комплексов моделей, порожденных их структурной сложностью и топологическим многообразием.

С одной стороны, полимодельность порождается необходимостью моделирования на большом числе групп переменных, с другой стороны, требуется построение ПМК, в том числе для оценки качества самих моделей [4, 6, 7]. То есть полимодельность является функционально-операционной, что связано с разнотипностью задач моделирования на различных уровнях.

Полимодельные комплексы в большинстве своем представлены исследователями в рамках иерархических структур, хотя можно утверждать, что ПМК может формироваться различными способами, например, посредством объединения результатов каждой модели, входящей в комплекс, или каскадным наращиванием и уточнением результатов моделирования [4, 5, 8].

Исследованиями качественного построения комплексов моделей занимались многие авторы, например, в работе [4] констатируется, что остается нерешенной проблема оценивания качества моделей, упорядочения и организации взаимодействия различных классов моделей ПМК, обоснованного синтеза новых моделей либо выбора из числа уже существующих моделей наиболее предпочтительных, предназначенных для решения конкретных прикладных задач [9–13].

Таким образом, моделирование ресурсных характеристик и уточнение топологии модельных комплексов являются актуальными для отраслевых предприятий.

### Принцип перманентности оценочного функционала как основа реализации каскадно-иерархического подхода

Для решения задачи оценки остаточного ресурса будем использовать следующую структурную иерархию СТС: детали (уровень *A*) — узлы (уровень *B*) — агрегаты (уровень *C*) — система в целом (уровень *СТС*). Обозначим остаточные ресурсы, требуемые на каждом уровне иерархии, как *RA*, *RB*, *RC*, *RСТС*. Для определенного класса систем уровни *A*, *B*, *C*, *СТС* являются естественными структурными единицами, например, для систем в области машиностроения или информационно-управляющих систем [14].

С использованием графовых отображений можно определить некоторую структуру, основанную на определенной детализации СТС, которая учитывает требуемый или остаточный ресурс на каждом элементном уровне:  $G^N(RN, M)$ , где *RN* — вершины, соответствующие остаточному ресурсу уровня *N*; *M* — дуги, отражающие влияние остаточного ресурса каждого уровня на остаточный ресурс СТС в целом. Для графа  $G_k^A$  уровня *A* дуга *M* определит влияние величины остаточного ресурса на ресурс высшего уровня:  $RA_k \rightarrow RB_j$ ,  $k = 1, K$ ,  $j = 1, J$ . Аналогично для уровней *B*, *C* и *СТС*:  $G_i^B : RB_i \rightarrow RC_j$ ;  $G_j^C : RC_j \rightarrow RСТС$ .

Требования к ресурсам на каждом уровне иерархии СТС (рис. 1) определяются следующими компонентами:  $RСТС(t_0, X, D, E)$ , где  $t_0$  — начальный момент времени оценки остаточного ресурса СТС; *X*, *D*, *E* — некоторые конструктивные, технологические и энергетические характеристики остаточного ресурса СТС соответственно. Множество характеристик остаточного ресурса СТС может быть расширено, но в данном случае не оказывает принципиального влияния на результаты исследования. Принимая во внимание изменчивость распределения ресурсов СТС на некотором отрезке времени жизни системы  $[0, T]$ , с учетом  $t_{k-1}$  и  $t_k \in [0, T]$ ,  $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$  можно формализовать динамику изменения остаточного ресурса для каждого уровня иерархии:  $N(t_{k-1}) \rightarrow RN(t_k)$ ,  $N \in \{A, B, C, СТС\}$ . Для одного уровня иерархии СТС рассматриваются два возможных варианта формального представления требуемого остаточного ресурса: относительно целостного системного объекта либо относительно множества элементов, составляющих этот объект, учитывая принцип аддитивности. Для одноуровневой одноэлементной системы в момент времени  $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$  требуемый остаточный ресурс может быть определен как

$$R1(t_k) = \min\{(\alpha_0 R0(t_{k-1}) + \alpha_1 \psi_1(v_k, t_k) + \alpha_2 \varphi_1(u_k, t_k) + \alpha_3 \xi_1(t_{k-1}) + \alpha_4 \mu_1(t_k) + \alpha_5 \varepsilon_1)\}, \quad (1)$$

где  $R0(t_k)$ ,  $R1(t_{k-1})$  — остаточные ресурсы 0-го и 1-го уровней в соответствующие моменты времени ( $t_k$ ), ( $t_{k-1}$ );  $\psi_1(v_k, t_k)$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие воздействия условий внешней среды, в которой функционирует СТС, отражающая влияние этих условий на ресурсные характеристики СТС;  $\varphi_1(u_k, t_k)$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие различных режимов работы (рабочих циклов СТС);  $\xi_1(t_k)$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие естественных причин деградации СТС (старение, коррозия, износ, усталость), отражающая их влияние на ресурсные характеристики [8];  $\mu_1(t_k)$  — функция, описывающая рост ресурса вследствие про-

ведения профилактических работ (обслуживание СТС) с учетом работы персонала по регламенту и ошибок персонала;  $\varepsilon_1$  — случайная функция, отражающая интенсивность влияния неопределенности условий функционирования на ресурсные характеристики СТС;  $\alpha_0 - \alpha_5$  — коэффициенты, определяющие степень воздействия указанных функций на ресурсные характеристики СТС.

Оценка гарантируемого остаточного ресурса для одноуровневой многоэлементной системы (1) может быть записана в виде

$$R1(t_k) = \min_{j \in [N=1]} \{(\alpha_0 R0(t_{k-1}) + \alpha_1 \psi_1(v_k, t_k) + \alpha_2 \varphi_1(u_k, t_k) + \alpha_3 \xi_1(t_{k-1}) + \alpha_4 \mu_1(t_k) + \alpha_5 \varepsilon_1)\}. \quad (2)$$

Для двух уровней иерархии СТС второй уровень может быть только агрегатом, т. е. иметь нулевую аддитивность. С учетом выражений (1) и (2) для двухуровневой СТС в тех же предположениях получим

$$\left\{ \begin{aligned} R1(t_k) &= \min_{j \in [N=1]} \{(\alpha_0 R0_j(t_{k-1}) + \alpha_1 \psi_j(v_k, t_k) + \alpha_2 \varphi_j(u_k, t_k) + \alpha_3 \xi_j(t_{k-1}) + \alpha_4 \mu_j(t_k) + \alpha_5 \varepsilon_1)\}; \\ R2(t_2) &= \min_{j \in [N=2]} \{ \min_{j \in [N=2]} \{ \alpha_j R1_j(t_{k-1}) \}; \\ &(\alpha_2 R2(t_{k-1}) + \alpha_3 \psi_2(v_k, t_k) + \alpha_4 \varphi_2(u_k, t_k) + \alpha_5 \xi_2(t_{k-1}) + \alpha_6 \mu_2(t_k) + \alpha_7 \varepsilon_2)\}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В общем случае запишем

$$RN(t_k) = \min_{j \in N} \{ \alpha_j R_j [N-1](t_{k-1}) \};$$

$$(\alpha_2 RN(t_{k-1}) + \alpha_3 \psi_N(v_k, t_k) + \alpha_4 \varphi_N(u_k, t_k) + \alpha_5 \xi_N(t_{k-1}) + \alpha_6 \mu_N(t_k) + \alpha_7 \varepsilon_N), \quad (4)$$

где  $R[N-1](t_{k-1})$  — остаточный ресурс предшествующего иерархического уровня (в связи с тем, что уровень может быть представлен множеством элементов, справедливо:  $\min_{j \in N} \{ \alpha_j R_j [N-1](t_{k-1}) \}$  при  $j \in N$ );  $RN(t_{k-1})$  — остаточный ресурс предшествующего временного отрезка для  $RN(t_k)$ ;  $\psi_N(v_k, t_k)$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие воздействия условий внешней среды, в которой функционирует СТС, отражающая влияние этих условий на ресурсные характеристики для  $N$ -го уровня СТС;  $\varphi_N(u_k, t_k)$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие различных режимов работы (рабочих циклов СТС) для  $N$ -го уровня СТС;  $\xi_N(t_{k-1})$  — функция, описывающая убывание ресурса вследствие естественных причин деградации СТС для  $N$ -го уровня СТС;  $\mu_N(t_k)$  — функция, описывающая рост ресурса вследствие проведения профилактических работ (обслуживание СТС) с учетом работы персонала по регламенту

и ошибок персонала для  $N$ -го уровня СТС;  $\varepsilon_N$  — случайная функция, описывающая убывание ресурса вследствие влияния неопределенности условий функционирования на ресурсные характеристики СТС;  $\alpha_2 - \alpha_7$  — коэффициенты, определяющие степень воздействия указанных функций на ресурсные характеристики СТС.

Из двух сравниваемых величин, подлежащих минимизации в выражениях (3) и (4), как правило, минимальным оказывается второе слагаемое, т. е.  $RN(t_k)$  в простейшем случае может быть определен как  $RN(t_k) = \alpha_2 RN(t_{k-1}) + Z(\cdot)$ , где  $Z(\cdot) = \alpha_3 \psi_N(v_k, t_k) + \alpha_4 \varphi_N(u_k, t_k) + \alpha_5 \xi_N(t_{k-1}) + \alpha_6 \mu_N(t_k) + \alpha_7 \varepsilon_N$ .

**Принцип перманентности оценочного функционала (ППОФ) как основы реализации каскадно-иерархического подхода.** Определяющее системное свойство осуществления каскадно-иерархического представления СТС — сохранение в рамках суперпозиции отображений ряда последовательных уровней детализации сквозной единой системной характеристики для категории оценочного функционала при исследовании качества функционирования (работоспособности) системы. В этом и состоит идея соблюдения ППОФ в рамках каскадно-иерархического подхода к топологическому описанию ПМК.

Определение ресурсных характеристик СТС на основе  $RN(t_k)$  в выражении (1) соответствует ППОФ через каскадно-иерархическую топологию ПМК.

Для некоторого малого  $\Delta t > 0$  и заданных величин остаточного ресурса в начальный момент времени:  $RA(t_0) = ra$ ,  $RB(t_0) = rb$ ,  $RC(t_0) = rc$ ,  $RCTC(t_0) = rctc$  для  $t_{k-1}, t_k \in [0, T]$ ;  $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$ , остаточные ресурсы СТС в рамках иерархии структурных единиц могут быть представлены системой обыкновенных линейных дифференциальных уравнений в предположении, что  $ra, rb, rc, rctc$  дифференцируемы, а функции, стоящие справа, — непрерывны на рассматриваемом временном интервале:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dRA(t_k)}{dt} &= \alpha_1^A RA(t_{k-1}) + \alpha_3^A \psi_A(v_k, t_k) + \alpha_4^A \varphi_A(u_k, t_k) + \alpha_5^A \xi_A(t_{k-1}) + \alpha_6^A \mu_A(t_k) + \alpha_7^A \varepsilon_A \\ \frac{dRB(t_k)}{dt} &= \beta_2^B RB(t_{k-1}) + \beta_3^B \psi_B(v_k, t_k) + \beta_4^B \varphi_B(u_k, t_k) + \beta_5^B \xi_B(t_{k-1}) + \beta_6^B \mu_B(t_k) + \beta_7^B \varepsilon_B \\ \frac{dRC(t_k)}{dt} &= c_2^C RC(t_{k-1}) + c_3^C \psi_C(v_k, t_k) + c_4^C \varphi_C(u_k, t_k) + c_5^C \xi_C(t_{k-1}) + c_6^C \mu_C(t_k) + c_7^C \varepsilon_C \\ \frac{dRCTC(t_k)}{dt} &= \tau_2^{CTC} RCTC(t_{k-1}) + \tau_3^{CTC} \psi_{CTC}(v_k, t_k) + \tau_4^{CTC} \varphi_{CTC}(u_k, t_k) + \tau_5^{CTC} \xi_{CTC}(t_{k-1}) + \tau_6^{CTC} \mu_{CTC}(t_k) + \tau_7^{CTC} \varepsilon_{CTC} \end{aligned} \right. , \quad (5)$$

где  $\alpha_{(\cdot)}^A, \beta_{(\cdot)}^B, c_{(\cdot)}^C, \tau_{(\cdot)}^{CTC}$  — параметры, определяющие степень воздействия соответствующих функций на ресурсные характеристики СТС.

Система (5) является описанием ресурсных зависимостей и может быть структурно усложнена за счет введения нелинейности в локальных областях, а также может быть представлена в безразмерной форме с сохранением той же нотации. Существование решения системы (5) гарантируется теоремой Коши и возможно по конечно-разностной схеме с учетом начальных условий (распределения ресурса в момент времени  $t_0$ ) при задании неопределенных компонент детерминированными прогностическими значениями исходя из конкретных условий работы СТС. Поскольку функции  $\psi_N, \phi_N, \xi_N$  являются неотрицательными, выпуклыми, следовательно, правые части не только непрерывны, но и удовлетворяют условию Липшица. Для системы (5) гарантируется существование решения и его единственность для заданных начальных условий.

Применение ППОФ для одноуровневой системы позволяет сформулировать суперпозицию отображения детализации единой системной характеристики категории оценочного функционала качества функционирования (работоспособности) системы в двух формах (для агрегированной и структурно аддитивной системы).

Для двухуровневой системы ППОФ позволяет сформулировать сохранение при суперпозиции отображений двух последовательных уровней детализации сквозной единой системной харак-

теристики категории оценочного функционала качества функционирования (работоспособности) системы при переходе от структурной аддитивности (на первом уровне) к агрегированию (на втором).

При решении задачи объект и предмет исследования представлены комплексом исследуемых процессов, что порождает формирование ПМК. Структурная схема иерархии моделей в ПМК (рис. 1) содержит три основных уровня: верхний и внутренний уровни, связанные с моделями эксплуатации и ресурсной обеспеченности, и уровень квалитметрии моделей. Данное структурное представление иерархии и каскадов моделей в ПМК иллюстрирует накопление степеней свободы моделирования, например, в рамках квалитметрического анализа формируется накапливаемая сложность согласно плану моделирования  $\Pi(\cdot)$ , что отражено в каскадных моделях текущего уровня.

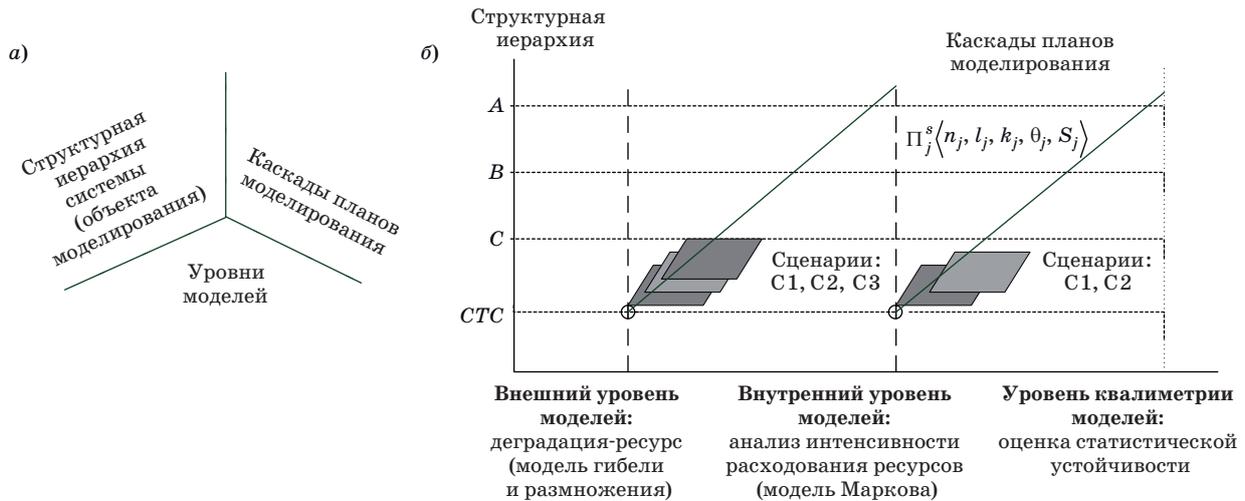
В задачах анализа динамики ресурсных характеристик СТС необходимо иметь обширный экспериментальный материал, что в ряде случаев затруднительно или невозможно. Следовательно, как на стадии создания, так и на стадии эксплуатации СТС ресурсный анализ может быть осуществлен на основе имитационного моделирования (ИМ) [15–18].

Применение скрытых моделей Маркова (СММ) к анализу надежности и прогнозированию характеристик СТС в ИМ широко распространено. Результаты моделирования не во всех случаях



■ **Рис. 1.** Структурное представление иерархии и каскадов моделей в ПМК

■ **Fig. 1.** Structural representation of hierarchy and cascades of models in a multi-model complex



■ **Рис. 2.** Каскадно-иерархическое обобщенное структурное представление: *a* — пространств модели — структур — планов моделирования; *b* — полимодельного комплекса для анализа ресурсных характеристик СТС  
 ■ **Fig. 2.** Cascade-hierarchical generalized structural representation: *a* — model spaces — structures — modeling plans; *b* — a multi-model complex for analyzing the resource characteristics of the СТС

оказываются репрезентативными и достоверными, в связи с этим целесообразно развивать механизмы решения задач анализа динамики СТС с учетом оценки качества решений в рамках СММ.

При исследовании ресурсных характеристик СТС на основе ИМ с учетом ППОФ в ряде случаев каскадное представление моделей может быть осуществлено последовательностью планов экспериментов  $\Pi_n \langle \cdot \rangle \rightarrow \Pi_{n+1} \langle \cdot \rangle$ . На рис. 2, *a* и *b* схематически показаны пространство модели — структуры — планы моделирования и обобщенная схема каскадно-иерархического моделирования при анализе ресурсных характеристик СТС.

Планы имитационных экспериментов могут быть представлены в виде кортежа  $\Pi \langle n, l, k, \theta \rangle$ , где  $n$  — скаляр, задающий число сгенерированных переходов СММ,  $n = |N|$ ;  $l_m$  — длина  $m$ -й цепи Маркова,  $l = |L|$ ;  $k$  — кратность запусков модели,  $k = |K|$ ;  $\theta_{n,l,k}$  — многомерная матрица, которая может содержать результаты первичной статистики. Таким образом, если обозначить  $D$  — множество допустимых планов ( $J = |D|$ ), то  $\Pi \langle n_j, l_j, k_j, \theta_j \rangle$  — реализуемый план. Таким образом, каскадная составляющая ПМК представлена разным функциональным наполнением, имеющим, соответственно, накапливаемую сложность согласно планам  $\Pi \langle \cdot \rangle$ .

На основе принципа перманентности оценочного функционала как основы реализации каскадно-иерархического подхода осуществлено объединение в рамках каскадно-иерархического структурного представления моделей в виде пространства модели — структуры — планы ПМК для анализа ресурсных характеристик СТС.

### Пример реализации каскадно-иерархического подхода при моделировании ресурсных характеристик СТС

Целью моделирования является формирование ПМК, на основе которого необходимо провести оценку ресурсных характеристик СТС, что соответствует вводу верхнего и вложенного подуровней и нескольких сценариев, определенных лицом, принимающим решения (ЛПР), как условия функционирования СТС на каждом из уровней.

Рассмотрим процесс деградации некоторой технической системы (уровень иерархии: СТС), уравниваемый циклами пополнения ресурса: деградационный процесс — пополнение ресурса (ДП-ПР) [13]. Схема моделирования может быть реализована на основе обобщенного опыта стохастического моделирования и с учетом классификации модельных схем, предложенных

в работе [5]:  $schema P_m : \langle S_0, S_1, \dots, S_n \rangle \xrightarrow{M_x^{I,K}} \|P_{ij}\|$ , где  $P_m$  — дискретно-стохастическая модель ( $P$ -схема), модель с ожидаемым результатом в виде матрицы;  $\rightarrow$  будем обозначать отображение, осуществляемое имитационной моделью  $M_x^{I,K}$ , где  $I, K$  — индексы иерархии и каскада ПМК соответственно.

Процесс ДП-ПР СТС может быть представлен моделью Маркова с дискретными состояниями:  $S_0$  — начальное состояние системы;  $S_n$  —  $n$ -е состояние, в котором оказывается система после

$n$ -го перехода;  $S_d$  — некоторое состояние деградации СТС (квазипоглощающее (КП)), после которого при достижении предельно низкого уровня обеспеченности ресурсом  $P_d(t)$  система переходит в предельное поглощающее состояние  $S_p$ ;  $\lambda_{ij}$  — интенсивность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ .

Согласно известной аналитической схеме решения данной задачи на основе модели гибели и размножения, вероятности пребывания СТС в состояниях можно записать системой дифференциальных уравнений Колмогорова с учетом нормировки и при условии, что начальное распределение вероятностей имеет вид  $P_0(t) = 1, P_1(t) = 0, \dots, P_d(t) = 0$ . Финальное значение вероятности пребывания СТС в состоянии  $P_0$  с КП-состоянием  $S_d$  определяется по известным формулам (модель гибели и размножения).

Для рассматриваемого процесса ДП-ПР СТС в течение некоторого времени  $t$  согласно схеме моделирования *schema*  $P_m$  получено следующее семейство кривых, отражающих изменение распределения вероятностей пребывания в состояниях относительно сценариев изменения интенсивности  $\lambda_{ij}$  (т. е. от равновесия веток модели ДП-ПР) (табл. 1, рис. 3). Для удобства записи переменных в табл. 1 введены обозначения цепочек переходов и их интенсивностей:  $\alpha_i = (\lambda_{01} \rightarrow \lambda_{12} \rightarrow \lambda_{23} \rightarrow \lambda_{34}) | (\lambda_{10} \leftarrow \lambda_{21} \leftarrow \lambda_{32} \leftarrow \lambda_{43})$ , где  $\alpha_i$  формирует три сценария  $S_j$ , описывающих различные ситуации по ДП-ПР. Шаг изменения  $\lambda_{ij} \rightarrow \lambda_{jk}$  принят  $\Delta = 0,2$ .

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 3, позволил сделать ряд выводов.

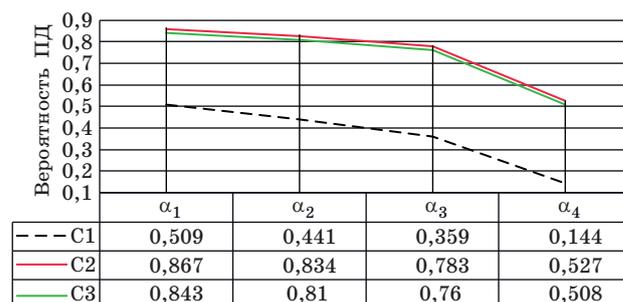
1. При описании условий моделирования потребовалось вводить дополнительные переменные и константы ( $\alpha_i, \Delta, C_j$ ), что усложнило модель верхнего уровня. Это соответствует вводу вложенного подуровня, в котором произведена заме-

на переменных; выбраны три сценария и четыре различных коэффициента  $\alpha_i$ .

2. С точки зрения содержательного аспекта моделирования следует отметить, что сценарии изменения параметров модели значительно влияют на вероятность пребывания СТС в КП-состоянии  $S_d$ . При известных интенсивностях  $\lambda_{ij}$  нахождение вероятности не составит труда, но в ситуации, когда  $\lambda_{ij}$  не заданы, моделирование возможно только на основе сценарного подхода.

3. Модель верхнего уровня позволила получить предварительные оценки распределения вероятностей при принятом исходном распределении ресурса СТС. Для сценариев  $S_1, S_2$  средние изменения  $\Delta P_d$  составили 0,35.

Следовательно, для модели внутреннего уровня, отражающей функционирование системы с учетом остаточного ресурса, целесообразно учитывать полученную на верхнем уровне оценку  $\Delta P_d$ . Согласно (5), требуемый ресурс для СТС в момент времени  $t_k$  для верхнего уровня моделирования может быть определен следующим образом:



■ **Рис. 3.** Диаграмма оценок вероятностей пребывания СТС в КП-состоянии  $S_d$  от соотношения интенсивностей  $\lambda_{ij}$  процессов в модели верхнего уровня

■ **Fig. 3.** Chart of estimates of the probability of CTS stay in the quasi-absorbing state,  $S_d$  depends on the ratio  $\lambda_{ij}$  of the process intensities in the upper-level model

■ **Таблица 1.** Значения изменения интенсивностей  $\lambda_{ij}$  переходов СТС для модели верхнего уровня

■ **Table 1.** Values for changing transition intensities  $\lambda_{ij}$  CTS for the top-level model

Описание сценария	Интенсивность в сценариях			
	$\alpha_i = (\lambda_{01} \rightarrow \dots \lambda_{34})   (\lambda_{10} \leftarrow \dots \lambda_{43}), \Delta = 0,2$			
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
Сценарий С1: постепенное снижение интенсивности ПР на фоне снижения ДП	(0,5–0,9) / (0,7–0,1)	(0,4–0,9) / (0,7–0,1)	(0,3–0,9) / (0,7–0,1)	(0,1–0,7) / (0,7–0,1)
Сценарий С2: постепенное повышение интенсивности ДП и ПР	(0,5–0,9) / (0,1–0,7)	(0,4–0,9) / (0,1–0,7)	(0,3–0,9) / (0,1–0,7)	(0,1–0,7) / (0,1–0,7)
Сценарий С3: рост интенсивности ДП при неизменной интенсивности ПР	(0,5–0,99) / 0,1	(0,4–0,99) / 0,1	(0,3–0,9) / 0,1	(0,1–0,7) / 0,1

$$\begin{aligned}
 RCTC(t_k) = & \alpha_2 RCTC(t_{k-1}) + \alpha_3 \psi_{CTC}(v_k, t_k) + \\
 & + \alpha_4 \varphi_{CTC}(u_k, t_k) + \alpha_5 \xi_{CTC}(t_{k-1}) + \alpha_6 \mu_{CTC}(t_k) + \\
 & + \alpha_7 \varepsilon_{CTC} = \alpha_2 RCTC(t_{k-1}) + K(\cdot) + \alpha_6 \mu_{CTC}(t_k), \quad (6)
 \end{aligned}$$

где  $K(\cdot) = K(\alpha_3 \psi_{CTC}(v_k, t_k) + \alpha_4 \varphi_{CTC}(u_k, t_k) + \alpha_5 \xi_{CTC}(t_{k-1}) + \alpha_7 \varepsilon_{CTC})$ ;  $RCTC(t_{k-1})$  — требуемый ресурс для агрегатов СТС;  $\mu_{CTC}(t_k)$  — функция обслуживания СТС, которая наращивает ее ресурс  $RCTC(t_0) + \Delta RCTC(t_k)$ , вследствие чего вероятность пребывания СТС в КП  $P_d$  снижается. С учетом трех сценариев  $C_j$ , описывающих различные ситуации по ДП-ПР, имеет место система уравнений как частный случай систем (4) и (5):

$$\begin{cases}
 RCTC^{C1}(t_k) = \alpha_2^{C1} RCTC^{C1}(t_{k-1}) + \\
 + \vartheta^{C1}(\cdot) + \alpha_7^{C1} \mu_{CTC}^{C1}(t_k) \\
 RCTC^{C2}(t_k) = \alpha_2^{C2} RCTC^{C2}(t_{k-1}) + \\
 + \vartheta^{C2}(\cdot) + \alpha_7^{C2} \mu_{CTC}^{C2}(t_k) \\
 RCTC^{C3}(t_k) = \alpha_2^{C3} RCTC^{C3}(t_{k-1}) + \\
 + \vartheta^{C3}(\cdot) + \alpha_7^{C3} \mu_{CTC}^{C3}(t_k)
 \end{cases}, \quad (7)$$

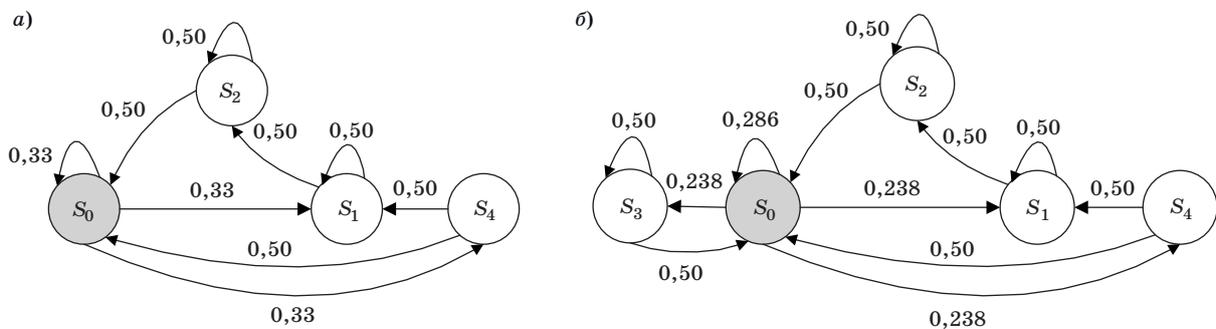
где коэффициенты  $\alpha_{(\cdot)}^{C1}$ ,  $\alpha_{(\cdot)}^{C2}$ ,  $\alpha_{(\cdot)}^{C3}$  определяются условиями функционирования СТС по каждому из сценариев.

Решение системы (7) может быть реализовано любым известным методом, учитывая полученные оценки  $\Delta P_d$ , однако в связи со сложностью технического представления система (7) не всегда может быть эффективным инструментом.

На основе фазового укрупнения модельного представления СТС для вложенной модели ПМК, связанной с оценкой расходования ресурсов в зависимости от сценария интенсивности расходования ресурсов в жизненном цикле СТС, всюду далее рассматривается вложенная модель Маркова (ВММ) без поглощающих состояний в рамках стационарного (квазистационарного) режимов.

ВММ строится по схеме *schema A*:  $\|P_{ij}\| \rightarrow \|P_{ij}^{M_m}\|$  в следующем фазовом пространстве состояний системы:  $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$ , где  $\|P_{ij}\|$  — матрица переходов ВММ;  $\langle S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 \rangle$  — последовательность состояний ВММ;  $k$  — число запусков модели, за которое система из первоначального состояния перейдет в терминальное состояние, описываемое матрицей  $\|P_{ij}^k\|$ ;  $\|P_{ij}^{M_m}\|$  — «восстановленная» матрица переходных вероятностей, содержащая статистические оценки  $P_{ij}$ ;  $S_0$  — рабочее состояние СТС,  $S_1$  — состояние отказа СТС,  $S_2$  — состояние пополнения ресурса системы после отказа СТС,  $S_3$  — состояние профилактики СТС (в модели не фиксируется, работает или простаивает система в момент пополнения ресурса),  $S_4$  — состояние сбоя СТС (это состояние, из которого может быть осуществлен переход либо в состояние отказа, вслед за которым требуется пополнение ресурса, либо в начальное состояние без пополнения ресурса; таким образом,  $S_4$  — это состояние, при котором пополнение ресурса СТС не требуется [7, 19, 20]). На рис. 4 приведены графы переходов такой СТС.

Введем коэффициент расходования ресурса как нормированный показатель, отражающий интенсивность динамики ресурсов различных типов в  $j$ -м состоянии СТС,  $RCI_j$  (Resource Consumption Index). Тогда общий потребляемый ресурс СТС может быть определен как  $\sum_{j=1}^J n \cdot RCI_j$ , где  $n$  — частота захода в каждое состояние ВММ. С учетом длительности локального жизненного цикла получим  $\sum_{j=1}^J n \cdot RCI_j \cdot t$ . Рассмотрим план  $\Pi_j^s \langle n_j, l_j, k_j, \theta_j, Z_j \rangle$ , где  $Z_j$  — интенсивность расходования ресурсов в  $j$ -м состоянии СТС. В табл. 2 приведены результаты моделирования



■ **Рис. 4.** Граф переходов для состояний СТС с учетом остаточного ресурса для модели внутреннего уровня: *a* — без пополнения ресурса; *b* — с пополнением ресурса,  $S_3$

■ **Fig. 4.** Transition graph for CTS states with a residual resource for an internal-level model: *a* — without adding resources; *b* — with the completion of the resource,  $S_3$

■ **Таблица 2.** Результаты моделирования  $RCI_j$  затрат при эксплуатации СТС в зависимости от разных сценариев интенсивности расходования ресурсов в модели внутреннего уровня

■ **Table 2.** Results of  $RCI_j$  simulation of costs during the operation of the CTS depending on different scenarios of expenditure intensity resources in the internal level model

Состояние системы	Значение $RCI_j$		Интенсивность расходования ресурсов		Общий израсходованный ресурс	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
$S_0$	0,5	0,2	36,4	14,56	56,94	40,66
$S_1$	0,2		9,38	9,384		
$S_2$	0,2		8,39	8,392		
$S_3$	0,1		2,62	5,24		
$S_4$	0,01		0,15	3,084		

$\sum_{j=1}^J n \cdot RCI_j$ . Под сценарием  $C_i$ ,  $i = \|C\|$  в предлож-

женном методе текущего уровня моделирования понимается событие или группа событий, приводящих СТС в КП-состояние, что связано с изменением интенсивности расходования ресурсов:

$C_i : \langle P_{ij}^{M_m} | c(S_i), RCI_i \rangle$ , где  $P_{ij}^{M_m}$  — элемент матрицы  $\|P_{ij}^{M_m}\|$ ;  $c(S_i)$  — стоимость пребывания СТС

в каждом  $S_i$ ;  $RCI_j$  — коэффициент расходования ресурсов. В табл. 2 рассмотрены два сценария:  $C_1 : RCI_j$  при разных  $c(S_i)$ , определенных ЛПП, и  $C_2 : RCI_j$  при равных  $c(S_i)$  для всех  $S_i$ . Сценарий  $C_1$  соответствует ситуации, когда ЛПП производит ранжирование  $c(S_i)$ , что определяется различными уровнями обеспеченности профилактики или отказа СТС. Для  $C_2$  характерно нейтральное отношение ЛПП к стоимости пребывания в каждом состоянии системы  $S_i$ .

Полученные результаты моделирования (см. табл. 2) отражают зависимость  $RCI$  от различных сценариев обслуживания. Для  $S_0(C_1)$  при  $c(S_0(C_1)) = 0,5$  относительно  $S_0(C_2)$  при  $c(S_0(C_2)) RCI_j$  отличается в 2,5 раза.

В отличие от модели верхнего уровня число сценариев, отражающих варианты интенсивности расходования ресурсов, другое: три в модели верхнего уровня и два в модели внутреннего, — что приводит к сложной интерпретации постановки экспериментов при моделировании. С учетом двух сценариев  $C_1, C_2$ , описывающих различные ситуации расходования ресурса на основе коэффициента  $RCI_j$ , можно записать систему уравнений как частный случай системы (4) по аналогии с (7).

Исследование динамики ресурсных характеристик систем обуславливает необходимость декомпозиции оптимизационных задач и детализацию уровней представления исследуемых систем, порождающую полимодельность, что, в свою очередь, для решения прикладных задач значительно усложняет процесс моделирования [20, 22–29]. Авторский подход позволил на основе предложенной методологии формализовать каскадно-иерархический подход и обеспечить упорядоченность построения ПМК для прикладной области, формализацию оценок и с учетом ППОФ получить комплексы оценок в каждом каскаде всех уровней иерархии.

### Заключение

В задачах анализа ресурсных показателей СТС часто возникает проблема формулировки обобщенных выводов функционирования системы, а для более объективной оценки необходим больший объем данных. Этот фактор требует построения ПМК, имеющих сложные связи между моделями (при передаче данных из одной модели в другую). В этом случае применение одного, например иерархического, типа моделей в ПМК может привести к ряду проблем, связанных со сложностью идентификации и учета взаимосвязи факторов динамики моделирования, учета объема данных на каждом иерархическом уровне, наличием параметрической изменчивости экспериментов на каждом уровне.

В предложенной авторами методологии каскадно-иерархическая схема моделирования сформирована в трехмерном параметрическом пространстве: структура системы — вид (уровень) модели — каскады планов моделирования. Каскадно-иерархическая топология ПМК позволила минимизировать указанные проблемы, а на основе сформулированного принципа перманентности оценочного функционала сохранить константность зависимости системных характеристик при фазовом укрупнении пространства моделирования. Дальнейшее развитие исследований планируется в направлении исследования их топологических параметров и формирования схем принятия решений на разных уровнях и типах задач.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 19-29-06015/19, 19-29-06023/19).

## Литература

1. Ашимов А. А., Гейда А. С., Лысенко И. В., Юсупов Р. М. Эффективность функционирования и другие операционные свойства систем: задачи и метод оценивания. *Труды СПИИРАН*, 2018, № 5(60), с. 241–270. doi.org/10.15622/sp.60.9
2. Соколов Б. В., Бураков В. В., Микони С. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов. *Информация и космос*, 2018, № 3, с. 36–43.
3. Panella I., Hardwick G. Model oriented system design applied to commercial aircraft secondary flight control systems. In: Obaidat M., Zren T., Rango F. (eds). *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2019, vol. 873. Pp. 55–76.
4. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. *Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов*. М., РАН, 2018. 314 с.
5. Доронина Ю. В., Скатков А. В. Анализ статистической устойчивости стационарных марковских моделей. *Труды СПИИРАН*, 2019, № 5(18), с. 1119–1148. doi 10.15622/sp.2019.18.5.1119-1148
6. Degiannakis S., Floros C. Methods of volatility estimation and forecasting. In: *Modelling and Forecasting High Frequency Financial Data*. Palgrave Macmillan, London, 2015. Pp. 58–109.
7. Волкова В. Н., Козлов В. Н., Магер В. Е., Черненко Л. В. Классификация методов и моделей в системном анализе. *Сборник докладов XX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017)*, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017 г., СПбГЭТУ (ЛЭТИ), СПб., 2017, с. 223–226.
8. Okhtilev M. Yu., Gnidenko A. S., Alferov V. V., Salukhov V. I., Nazarov D. I. Methods and algorithms of integrated modeling of complex technical objects in dynamically changing conditions. *Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW*, 2018, pp. 282–284.
9. Дедков В. К. Методика построения модели прогнозирования надежности «стареющего» технического объекта. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*, 2009, № 1, с. 366–368.
10. Kunit Park. *Fundamentals of Probability and Stochastic Processes with Applications to Communications*. New York, Springer, 2018. 273 p.
11. Rabiner L. R., Wilpon J. G., and Juang B. H. A model-based connected digit recognition system using either hidden Markov models or templates. *Computer Speech and Language*, 1986, vol. 1, no. 2, pp. 167–197.
12. Chen J., Ma C., Song D. Time to failure estimation based on degradation model with random failure threshold. *International Journal of Reliability and Safety*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 145–157.
13. Гончаров А. М., Чащин С. В., Прохоров М. А. Подход к решению задачи оценивания устойчивого функционирования информационной системы на примере центра обработки данных. *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*, 2017, т. 11, № 4, с. 20–25.
14. Цвиркун А. Д. *Основы синтеза структуры сложных систем*. М., Наука, 1982. 200 с.
15. Zelentsov V. A., Potryasaev S. A., Pimanov I. J., Nemyukin S. A. Creation of intelligent information flood forecasting systems based on service oriented architecture. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol. 466, pp. 371–381. doi:10.1007/978-3-319-33389-2\_35
16. Скатков А. В., Воронин Д. Ю., Скатков И. А. Особенности моделирования деградационных отказов первичных измерителей систем мониторинга. *Системы контроля окружающей среды*, 2017, № 7(27), с. 48–56.
17. Кузнецов А. В. Распределение ограниченных ресурсов в системе с устойчивой иерархией (на примере перспективной системы военной связи). *Управление большими системами*, 2017, вып. 66, с. 68–93.
18. Новиков Д. А. Аналитическая сложность и погрешность решения задач управления организационно-техническими системами. *Автоматика и телемеханика*, 2018, № 5, с. 107–118.
19. *New Frontiers in Information and Production Systems Modeling and Analysis — Incentive Mechanisms, Competence Management, Knowledge-based Production*. Series “Intelligent Systems Reference Library”. Ed. by P. Rozewsky, D. Novikov, O. Zaikin, N. Bakhtadze. Berlin, Springer, 2016. 268 p. doi:10.1007/978-3-319-23338-3
20. Zhukova N., Vodyaho A., Levonevskiy D., Simonenko A. The method of data transformation for modeling technical objects. *Proceedings of the XXI IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2018)*, 2018, pp. 450–453.
21. Gnidenko A. S., Zelentsov V. A., Kulakov A. U. Hierarchical polymodel complex of combined planning of transport and logistics systems. *Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW*, 2018, pp. 276–279.
22. Кононова Я. Г., Шубин М. В., Ермаков Е. А. Ремонт авиационной техники военного назначения в рамках государственно-частного партнерства. *Проблемы экономики и менеджмента*, 2016, № 5 (57). <https://cyberleninka.ru/article/n/remont-aviatsionnoy-tehniki-voennogo-naznacheniya-v-ramkah-gosudarstvenno-chastnogo-partnyorstva> (дата обращения: 23.11.2019).
23. Киселев Ю. В., Мотиенко А. И., Басов О. О., Саитов И. А. Структурно-функциональная модель интеллектуальной инфокоммуникационной системы. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2018, т. 18, № 6, с. 1034–1046.
24. Баранов В. В., Цвиркун А. Д. Управление развитием: структурный анализ, задачи, устойчивость. *Автоматика и телемеханика*, 2018, № 10, с. 55–75.

25. Батенков К. А. Общие подходы к анализу и синтезу структур сетей связи. *Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции*, 2017, с. 19–23.
26. Нестерук Ф. Г. К организации интеллектуальной защиты информации. *Труды СПИИРАН*, 2009, № 10, с. 148–159. <https://doi.org/10.15622/sp.10.10>
27. Новиков Д. А. Иерархические модели военных действий. *Управление большими системами*, 2012, вып. 37, с. 25–62.
28. Месарович М., Мако Д., Такахара И. *Теория иерархических многоуровневых систем*. М., Мир, 1973. 344 с.
29. Majedi M., Osman K. A novel architectural design model for enterprise systems: evaluating enterprise resource planning system and enterprise application integration against service oriented architecture. *Proceedings of 3rd International Conference on Pervasive Computing and Applications*, Alexandria, Egypt, IEEE Computer Society, 2008, pp. 116–121.

UDC 004.052

doi:10.31799/1684-8853-2020-3-48-58

**Cascade-hierarchical modeling in analyzing the dynamics of complex system resource characteristics**Yu. V. Doronina<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0003-4699-025X](https://orcid.org/0000-0003-4699-025X), [apkSev@yandex.ru](mailto:apkSev@yandex.ru)A. V. Skatkov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-5678-9587](https://orcid.org/0000-0002-5678-9587)<sup>a</sup>Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., 299053, Sevastopol, Russian Federation

**Introduction:** Describing the dynamically changing resource characteristics of a complex system makes it necessary to decompose the optimization problems and itemize the system representation levels. This leads to multi-model approaches. In problems which require the construction of multi-model complexes with sophisticated links between the models, the sole use of hierarchical topology of model complexes does not guarantee that the modeling dynamics factors are connected and the data volume is taken into account at each hierarchical level. It also does not reflect the parametric variability of experiments at each level. **Purpose:** Developing a technique for constructing multi-model complexes within cascade-hierarchical structures, and forming the evaluation functionality taking into account the principle of its permanence for modeling the resource characteristics of complex systems when studying the dynamics of degradation failures and replacement of resources. **Methods:** System analysis and structural synthesis of models; embedded Markov models with quasi-absorbing state at the local level of a multi-model complex. **Results:** The principle of permanent evaluation functionality is formulated. It allows you to implement an approach to the problems of decision support for resource provision in complex technical systems by determining the service strategy. In general, a cascade-hierarchical modeling scheme is formed in a three-dimensional functional space: system structure — model type (level) — modeling plan cascades. The proposed modeling methodology within the cascade-hierarchical topology of a multi-model complex on the base of the permanent evaluation functionality principle allows you to keep the constancy of the representability of system characteristics under the phase enlargement of the modeling space, and thereby rationalize the planning of your experiments. **Practical relevance:** The results of the research were used in the development and analysis of the dynamics of resource security of complex technical systems. The proposed approach makes it possible to formulate research plans for complex systems in a parametric model space.

**Keywords** — multi-model complex, cascade-hierarchical models, evaluation functionality, resource dynamics, complex technical systems, Markov models.

**For citation:** Doronina Yu. V., Skatkov A. V. Cascade-hierarchical modeling in analyzing the dynamics of complex system resource characteristics. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 48–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-48-58

**References**

- Ashimov A. A., Geida A. S., Lysenko I. V., Yusupov R. M. System functioning efficiency and other system operational properties: research problems, evaluation method. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 5(60), pp. 241–270 (In Russian). doi: [10.15622/sp.60.9](https://doi.org/10.15622/sp.60.9)
- Sokolov B. V., Burakov V. V., Mikoni S. V., Yusupov R. M. Methodological and methodical bases of the theory of estimation of quality of models and polymodel complexes. *Informatsiya i kosmos*, 2018, no. 3, pp. 36–43 (In Russian).
- Panella L., Hardwick G. *Model oriented system design applied to commercial aircraft secondary flight control systems*. In: Obaidat M., Zren T., Rango F. (eds). *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2019, vol. 873. Pp. 55–76.
- Mikoni S. V., Sokolov B. V., Jusupov R. M. *Kvalimetriya modelej i polimodel'nyh kompleksov* [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow, Rossijskaya akademiya nauk Publ., 2018. 314 p. (In Russian).
- Doronina Yu. V., Skatkov A. V. Statistical stability analysis of stationary Markov models. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, no. 5(18), pp. 1119–1148 (In Russian). doi: [10.15622/sp.2019.18.5.1119-1148](https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1119-1148)
- Degiannakis S., Floros C. *Methods of Volatility Estimation and Forecasting*. In: *Modelling and Forecasting High Frequency Financial Data*. Palgrave Macmillan, London, 2015. Pp. 58–109.
- Volkova V. N., Kozlov V. N., Mager V. E., Chernenkaya L. V. Classification of methods and models in system analysis. *Sbornik dokladov XX Mezhdunarodnoj konferencii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2017)* [Reports of the XX International Conference on Soft Issues and Measurements (SCM-2017)], Saint-Petersburg, 2017, pp. 223–226 (In Russian).
- Okhtilev M. Yu., Gnidenko A. S., Alferov V. V., Salukhov V. I., Nazarov D. I. Methods and algorithms of integrated modeling of complex technical objects in dynamically changing conditions. *Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW*, 2018, pp. 282–284.
- Dedkov V. K. Method of constructing a model for predicting the reliability of an “aging” technical object. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost’ i kachestvo”* [Pro-

- ceedings of the International Symposium “Reliability and quality”], 2009, vol. 1, pp. 366–368 (In Russian).
10. Kunil Park. *Fundamentals of Probability and Stochastic Processes with Applications to Communications*. New York, Springer, 2018. 273 p.
  11. Rabiner L. R., Wilpon J. G., and Juang B. H. A model-based connected digit recognition system using either hidden Markov models or templates. *Computer Speech and Language*, 1986, vol. 1, no. 2, pp. 167–197.
  12. Chen J., Ma C., Song D. Time to failure estimation based on degradation model with random failure threshold. *International Journal of Reliability and Safety*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 145–157.
  13. Goncharov A. M., Chashchin S. V., Prokhorov M. A. Approach to solving the problem of assessing the sustainable functioning of the information system at the data processing center. *T-Comm*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 20–25 (In Russian).
  14. Tsvirkun A. D. *Osnovy sinteza struktury slozhnykh sistem* [Fundamentals of synthesis of the structure of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 200 p. (In Russian).
  15. Zelentsov V. A., Potryasaev S. A., Pimanov I. J., Nemykin S. A. Creation of intelligent information flood forecasting systems based on service oriented architecture. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol. 466, pp. 371–381. doi:10.1007/978-3-319-33389-2\_35
  16. Skatkov A. V., Voronin D. Yu., Skatkov I. A. Features of simulation of degradation failures of primary meters of monitoring systems. *Environmental Control Systems*, 2017, vol. 7 (27), pp. 48–56 (In Russian).
  17. Kuznetsov A. V. Allocation of limited resources in a system with a stable hierarchy (on the example of prospective military communications system). *UBS*, 2017, iss. 66, pp. 68–93 (In Russian).
  18. Novikov D. A. Analytical complexity and error of solving problems of management of organizational and technical. *Automation and Remote Control*, 2018, no. 5, pp. 107–118 (In Russian).
  19. *New Frontiers in Information and Production Systems Modeling and Analysis — Incentive Mechanisms, Competence Management, Knowledge-based Production*. Series “Intelligent Systems Reference Library”. Ed. by P. Rozewsky, D. Novikov, O. Zaikin, N. Bakhtadze. Berlin, Springer, 2016. 268 p. doi:10.1007/978-3-319-23338-3
  20. Zhukova N., Vodyaho A., Levonevskiy D., Simonenko A. The method of data transformation for modeling technical objects. *Proceedings of the XXI IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM’2018)*, 2018, pp. 450–453.
  21. Gnidenko A. S., Zelentsov V. A., Kulakov A. U. Hierarchical polymodel complex of combined planning of transport and logistics systems. *Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW*, 2018, pp. 276–279.
  22. Kononova Y. G., Shubin M. V., Ermakov E. A. Repair of military aviation equipment in the public-private partnership. *Problemy ekonomiki i menedzhmenta*, 2016, no. 5 (57). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/remont-avitsionnoy-tehniki-voennogo-naznacheniya-v-ramkah-gosudarstvenno-chastnogo-partnyorstva> (accessed 21 November 2019) (In Russian).
  23. Kiselev Yu. V., Motienko A. I., Basov O. O., Saitov I. A. Structural-functional model of intelligent infocommunication system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, iss. 18, vol. 6, pp. 1034–1046 (In Russian).
  24. Baranov V. V., Tsvirkun A. D. Development control: structural analysis, problems, stability. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79(10), pp. 1780–1796 (In Russian).
  25. Batenkov K. A. To the question of assessing the reliability of bipolar and multipolar networks. *Materialy Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii “Sovremennye problemy telekommunikacij”* [Proceedings of Russian Scientific Conference “Modern Problems of Radio Electronics”], 2017, pp. 604–608 (In Russian).
  26. Nesteruk P. G. To organization of intellectual protection of the information. *SPIIRAS Proceedings*, 2009, no. 10, pp. 148–159 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.10.10>
  27. Novikov D. A. Hierarchical models of combat. *UBS*, 2012, iss. 37, pp. 25–62 (In Russian).
  28. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of Hierarchical Multilevel Systems]. Moscow, Mir Publ., 1973. 344 p. (In Russian).
  29. Majedi M., Osman K. A novel architectural design model for enterprise systems: evaluating enterprise resource planning system and enterprise application integration against service oriented architecture. *Proceedings of 3rd International Conference on Pervasive Computing and Applications*, Alexandria, Egypt, IEEE Computer Society, 2008, pp. 116–121.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь 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.