

УДК 519.7

Подход к моделированию прогнозных цифровых двойников сложных многорежимных объектов

Павлов Александр Николаевич^{1,2} — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления космических комплексов», ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. Научные интересы: системный анализ и принятие решений в условиях существенной неопределенности, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. E-mail: pavlov62@list.ru

Воротягин Валентин Николаевич¹ — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Технологии и средства автоматизации обработки и анализа информации космических средств». Научные интересы: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. E-mail: vorotyagin@rambler.ru

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39

Для цитирования: Павлов А. Н., Воротягин В. Н. Подход к моделированию прогнозных цифровых двойников сложных многорежимных объектов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 37–45. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-37-45

Аннотация. Развитие инструментов моделирования является ключевым фактором создания и реализации интеллектуальных (прогнозных) цифровых двойников. Как правило, многие сложные объекты (СЛО) являются многорежимными, т. е. априори обладают свойством немонотонности. Изменения содержания целей и задач, стоящих перед объектом, а также деструктивные воздействия внешней среды приводят к неопределенности функционирования СЛО, которая связана с интенсивностью и характером использования различных режимов их работы. **Цель исследования:** указанная ситуация потребовала разработки подхода к исследованию многорежимных немонотонных систем в условиях существенной неопределенности. **Результаты:** учет режимов работы объекта в виде вершин схем функциональной целостности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) исчислений показал, что функциональная структура многорежимного объекта становится немонотонной. Данная ситуация, а также отсутствие знаний об интенсивности и характере задействования этих режимов потребовала от авторов статьи разработать модельно-алгоритмическую надстройку над ОЛВМ, в основе которой лежит концепция параметрического генома функциональных структур многорежимных СЛО. **Практическая значимость:** предложенный подход позволил оценить показатели структурно-функциональной надежности и живучести таких объектов в условиях отсутствия знаний о циклограммах задействования режимов функционирования. Опираясь на изложенный в статье подход, необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие проводить мониторинг и управление режимами функционирования СЛО.

Ключевые слова: цифровой двойник, многорежимный объект, схема функциональной целостности, немонотонная система, параметрический геном

2.3.1 — системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00706

Введение

Развиваемые в последние десятилетия [1–4] киберфизические системы, умное производство, интернет вещей (*IoT*), виртуальная и дополненная реальность (*VR/AR*), большие данные (*Big Data*), цифровые двойники (*Digital Twin*) и другие технологии занимают центральное место не только в контексте четвертой промышленной революции (*Industry 4.0*), которая акцентирует внимание на автоматизации и интеллектуализации различных производств, но и в рамках пятой промышленной революции (*Industry 5.0*). В рамках данной новой концепции предполагается более тесная синергия между людьми и автономными машинами, подчеркивая важность взаимодействия человека и технологий для достижения максимального уровня эффективности и инновативности. В рамках *Industry 5.0* акцент смещается от исключительно автоматизированных процессов к созданию гармоничной среды, где человек и машина работают в тандеме, усиливая друг друга. На этом этапе технологии становятся не просто инструментами, а полноценными партнерами, которые способны адаптироваться к человеческим потребностям, взаимодействовать и даже предвосхищать ожидания. Это создает новые возможности для повышения производственной эффективности и качества обслуживания услуг.

Киберфизические системы в *Industry 5.0* способны интегрировать физические и вычислительные компоненты, что позволяет обеспечить более глубокую взаимосвязь между всем процессом производства. В то время как *Industry 4.0* сосредотачивалась на автоматизации и оптимизации производственных процессов, *Industry 5.0* предлагает гораздо более сложные и многоуровневые модели взаимодействия, где учитываются не только технические, но и человеческие факторы.

Интернет вещей также играет важную роль в этой эволюции, позволяя устройствам обмениваться данными и взаимодействовать друг с другом в реальном времени. Это создает возможность для создания умных фабрик, где каждое устройство «знает» свое место в общем процессе

и может быстро адаптироваться к изменениям в условиях работы, улучшая производительность.

Виртуальная и дополненная реальность помогают не только в обучении и ориентации сотрудников, но и в проектировании новых продуктов, позволяя моделировать воссоздаваемые сценарии с высоким уровнем детализации. Это упрощает процесс взаимодействия между различными участниками производственной цепочки и способствует более интуитивному выбору решений.

Большие данные и цифровые двойники представлены как мощные инструменты, позволяющие анализировать конкурентные условия, проблемы и возможности в режиме реального времени. Цифровые двойники, представляя собой виртуальные копии физических объектов, позволяют проводить мониторинг и оптимизацию процессов, затрат и производительности без вмешательства в живую систему.

Представляется, что искусственный интеллект и роботизация, интернет вещей и цифровизация позволят реалистично моделировать не только сами сложные объекты (СЛО), но и процессы их создания, эксплуатации в различных условиях, станут частью нашего повседневного существования. Оптимизация процессов с помощью этих достижений значительно повлияла на ценность человека в осуществлении многих задач в разных отраслях, что вызвало высокую озабоченность и возражение среди работников. Тем не менее пятая промышленная революция напомнит о человечестве [1, 2].

Создание прогнозных цифровых двойников действительно представляет собой важный шаг вперед в управлении сложными системами. Цифровой двойник, состоящий из гармоничной интеграции физических, цифровых и программных компонентов, является мощным инструментом для анализа и предсказания поведения объектов в реальном времени. Однако введение кибернетического слоя, основанного на алгоритмах машинного обучения и обработке больших данных, значительно усиливает его функциональные возможности.

Эти кибернетические компоненты обеспечивают возможность не только наблюдать за состояни-

ем объектов, но и предсказывать возможные изменения и сценарии их поведения. Это позволяет управлять сложностью, возникающей из множества взаимосвязанных факторов, что критически важно для современных организаций, работающих в условиях неопределенности и быстро меняющейся среды.

Сложность, с которой сталкиваются современные системы, выявляется в различных аспектах. Структурная сложность относится к организации компонентов внутри системы и тому, как они взаимодействуют друг с другом. Сложность функционирования связана с многогранностью процессов и задач, выполнение которых требует наличие множества переменных и условий. Выбор поведения — это аспект, касающийся того, как системы реагируют на различные входные данные и обстоятельства, а также как алгоритмы могут оптимизировать это поведение. Сложность моделирования подразумевает необходимость создания адекватных и точных моделей, которые отражают реальность, при этом учитывая все переменные и взаимодействия. Наконец, сложность развития касается динамики системы, ее способности адаптироваться к изменениям во внешней среде.

Роль цифровых двойников в управлении этой сложностью становится все более важной. Они позволяют создавать виртуальные модели, которые могут быть протестированы и оптимизированы без риска для реального мира. Это приводит к более обоснованным решениям, основанным на данных и аналитике. Как следствие, организации становятся более адаптивными и готовыми к вызовам, которые ставит перед ними современный мир. Таким образом, внедрение цифровых двойников не только улучшает процессы управления, но и открывает новые горизонты для инноваций и эффективности в различных отраслях [5–7].

Одной из важных причин затруднений, часто возникающих у разработчиков цифровых двойников на этапе моделирования цифровой копии объекта, является отсутствие достаточно изученных и адекватных математических моделей, методов и алгоритмов, с максимальной реалистичностью охватывающих не только сам объект, но и этапы работы

с ним — строительство, испытания и применения в любых возможных условиях и ситуациях [3]. Кстати, это относится и к исследованию архитектуры его структурных состояний, параметров, способов функционирования. Сегодня математическое моделирование стало ключевым компонентом цифровых двойников.

Для создания системной модели цифрового двойника действительно применяются разнообразные методы анализа и синтеза, каждый из которых вносит свой уникальный вклад в процесс проектирования и оптимизации.

Метод конечных элементов (*Finite Element Method, FEM*) представляет собой мощный инструмент для решения сложных инженерных задач на микроуровне. Он основывается на разбиении геометрической модели объекта на конечное количество элементов, что позволяет упростить решение сложных уравнений в частных производных. Это разбиение позволяет точно моделировать поведение материалов и конструкций под физическими нагрузками, обеспечивает возможность учета различных краевых условий и предоставляет возможность анализа деформаций, напряжений и других характеристик, существенно улучшая понимание процессов, происходящих в объекте.

Анализ видов и последствий отказов (*Failure Mode and Effects Analysis, FMEA*), в свою очередь, служит важным инструментом для управления качеством и надежностью как продуктов, так и производственных процессов. Эта методология позволяет систематически просматривать возможные способы отказа в системе, анализировать их последствия и определять их вероятность. Такой проактивный подход помогает выявить потенциально слабые места еще на стадии проектирования, что минимизирует риски и способствует созданию более надежных и безопасных продуктов. Таким образом, применяя *FMEA*, компании могут значительно сократить затраты на ремонт, возврат товаров и улучшить свою репутацию среди клиентов.

Методы автоматизированного проектирования (*Computer-Aided Design, CAD*) сыграли революционную роль в области инжиниринга и дизайна, позволяя инженерам и проектировщикам создавать

точные и детализированные модели как в двумерной, так и в трехмерной графике. Использование *CAD-систем* значительно ускоряет процесс проектирования, упрощает внесение изменений и помогает в создании необходимой документации для производства. Технологии *CAD* интегрируются с другими системами, что обеспечивает возможность быстро и эффективно производить коррекции на основе данных, полученных из методов *FEM* и *FMEA*.

В сочетании эти методы образуют мощный комплекс для создания цифровых двойников, который обеспечивает возможность эффективно моделировать, анализировать и оптимизировать сложные системы, позволяя организациям лучше разбираться в их поведении и принимать обоснованные решения на основе данных. Таким образом, современные подходы к моделированию и анализу становятся ключевыми для построения эффективных и надежных систем, способных адаптироваться к изменениям и эксплуатационным условиям.

Указанные подходы нашли достойное применение при создании цифровых двойников 1-го, 2-го и иногда 3-го уровня, обладающего адаптивными возможностями. Традиционно при проектировании двойников данных уровней полагались на знание об идеальных и возможных наихудших условиях их эксплуатации. Однако при разработке интеллектуальных (прогнозных) цифровых двойников (4-го уровня) следует учитывать тот факт, что их физический близнец взаимодействует с неопределенной, частично наблюдаемой средой [4].

Немонотонный мир многорежимных объектов

Изменение параметров и структур современных СЛО вызваны не только изменением содержания целей и задач, стоящих перед объектом, но и воздействием деструктивных факторов на функциональные элементы (ФЭ) объекта, под которыми будем понимать элементы (подсистемы) СЛО, взаимодействующие с внешней средой и выполняющие функции для реализации алгоритмов управления объектом.

При этом отметим, что одним из важных условий исследования возможностей СЛО с учетом

указанных возмущающих воздействий является проведение структурно-функционального анализа и синтеза его облика.

Исследование свойств однородности, равноценности, монотонности, надежности и живучести необходимо при изучении архитектуры структурных (особенно функциональных и технологических) состояний системы [8]. Однако применение графовых (сетевых) моделей для формализации взаимосвязей ФЭ СЛО может отражать поведение только монотонных систем и их параллельно-последовательных (П-структуры) и сложных (Н-структуры) структур [9]. Поэтому для исследования как монотонных, так и в особенности немонотонных функциональных структур объекта требуется принять в расчет логически сложные и противоречивые связи и отношения между ФЭ. Для чего понадобилось разработать метод с привлечением полной группы логических операций («И», «ИЛИ», «НЕ»). Несмотря на более чем 60-летние усилия по разработке указанного подхода, с решением данной задачи успешно справился к концу 2000 года А. С. Можаяев (один из учеников научной школы И. А. Рябинина), создав и реализовав на практике общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [10].

Для исследования указанных выше свойств структурных состояний СЛО в условиях стохастической и нечетко-возможностной неопределенности от авторов статьи потребовалось обосновать концепцию генома структуры (представление структуры объекта в виде вектора коэффициентов полинома структурной функции надежности) и разработать модельно-алгоритмическую надстройку над ОЛВМ [8]. Поясним, какой практический эффект от использования данного подхода имеется к настоящему времени.

Предложенная концепция позволила, помимо исследования структурно-топологических свойств монотонных объектов, осуществить классификацию структур на монотонные и немонотонные первого и второго типа, а также реализовать оперативный прогноз значений показателей структурной надежности и живучести однородных и неоднородных, монотонных и немонотонных объектов [8]. Разработаны концептуальная и ма-

тематическая постановки задачи многокритериального синтеза структуры СЛО на этапе его проектирования с учетом кратного и комбинаторного резервирования ФЭ объекта, а также метод и реализующий его алгоритм решения данной оптимизационной задачи [11].

Дальнейшее развитие концепции генома структуры при исследовании функциональной и технологической структур (технологических циклов управления) СЛО было связано с отражением факторов функциональной сложности и потенциальной эффективности СЛО, предполагающих наличие в системе множественности режимов (видов) функционирования. Предложенная А. С. Можаявым технология схем функциональной целостности (СФЦ) при разработке ОЛВМ позволила графически представить не только логические условия реализации собственных функций ФЭ и подсистем, но и цели моделирования с учетом интенсивности,

характера (совместное и/или несовместное взаимодействие), сложных взаимосвязей задействования тех или иных режимов функционирования СЛО [12]. Для этого при построении СФЦ СЛО наряду с функциональными вершинами, отвечающими за работоспособность ее ФЭ, были включены вершины для режимов функционирования.

И вот тут оказалось, что СЛО в большинстве случаев обладают немонотонной структурной функцией (вероятностным полиномом). В то же время многим исследователям интуитивно понятно, что сложные объекты обладают свойством природной монотонности (отказ ФЭ ведет к ухудшению надежности системы), а немонотонность встречается, как правило, в системах с противоборством. В связи с проведенными исследованиями таких немонотонных объектов намного больше, чем предполагалось. Этот факт можно подтвердить следующим обстоятельством (рис. 1). Событие

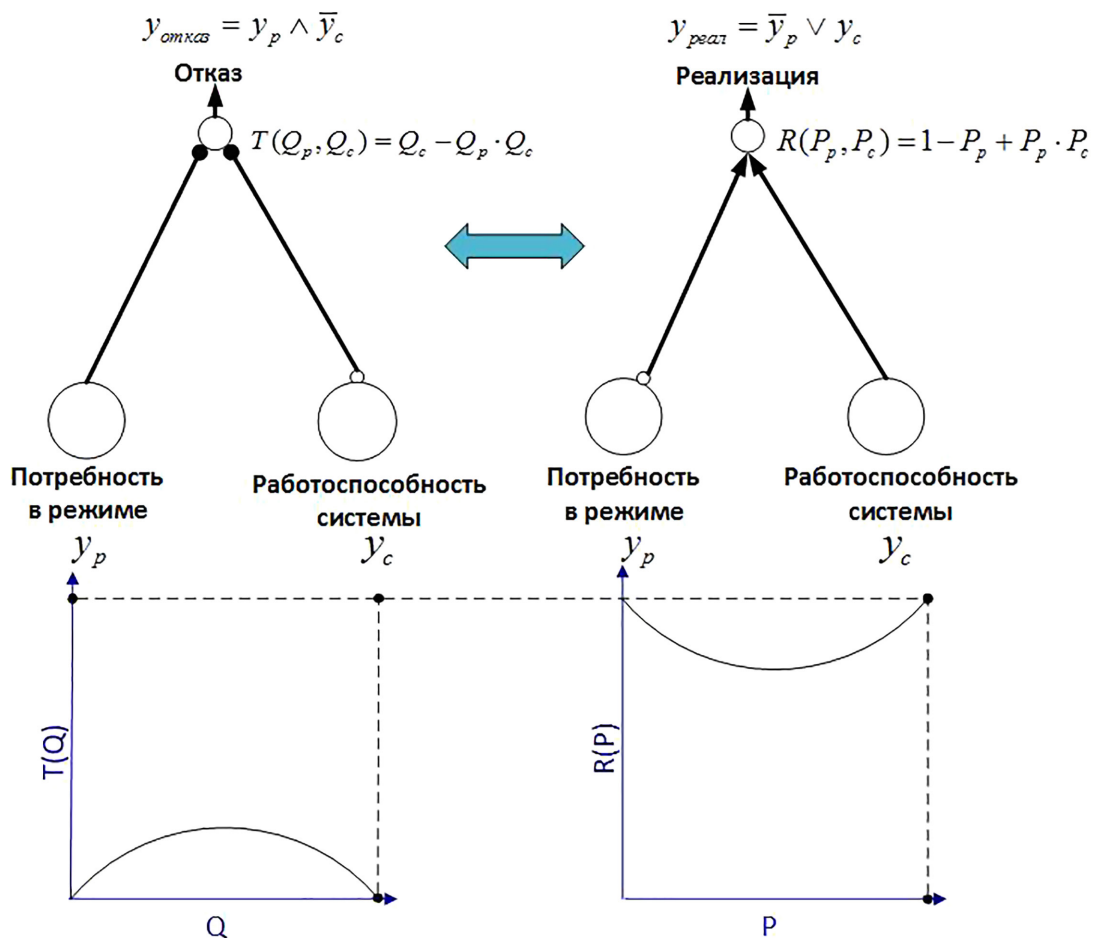


Рис. 1. Немонотонная структура объекта

«отказа» происходит в результате совместного наступления событий «есть потребность в режиме» и «объект не работоспособен». Тогда структурная логическая функция этого события представляет собой $y_{\text{отказ}} = y_p \wedge \bar{y}_c$, полином отказа имеет вид $T(Q_p, Q_c) = P_p \cdot Q_c = Q_c - Q_p \cdot Q_c$.

Для однородной структуры (т. е. $Q_p = Q_c = Q$) полином отказа равен $T(Q) = Q - Q^2$, $0 \leq Q \leq 1$ и является немонотонной функцией. Соответственно, наступление противоположного события «Режим реализуется» можно описать логической функцией $y_{\text{реализ}} = \bar{y}_{\text{отказ}} = \bar{y}_p \vee y_c$, а полином успешной реализации имеет вид $R(P_p, P_c) = 1 - P_p + P_p \cdot P_c$.

Следует указать, что если режим постоянно востребован (его интенсивность равна 1), то вероятность реализации режима зависит только от вероятности безотказной работы (ВБР) ФЭ СЛО, так как $P_p = 1$ и $R(P_p, P_c) = P_c \geq 0$. При стремлении интенсивности задействования режима к 0 ($P_p \rightarrow 0$) будет наблюдаться подобная зависимость, вместе с тем нижнее значение вероятности успешной реализации режима равна Q_p и стремится к 1 (так как $R(P_p, P_c) = 1 - P_p + P_p \cdot P_c \geq 1 - P_p = Q_p$). Данный факт требуется учитывать при исследовании свойств многорежимных объектов.

Построив СФЦ многорежимного СЛО, можно определить вероятностный полином успешной реализации задействования различных режимов функционирования. Для чего следует применить программный комплекс логико-вероятностного моделирования «Арбитр» [10].

$$\mathfrak{X}(P_1, P_2, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m), \quad (1)$$

где $P_i, i = 1, \dots, n$ — ВБР ФЭ СЛО, а $\alpha_i, i = 1, \dots, m$ — интенсивность реализации режимов функционирования СЛО.

Предположив, что все ФЭ СЛО однородные по ВБР (т. е. $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$), рассчитанный вероятностный полином (1) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} \mathfrak{X}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) &= \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \\ &+ \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \\ &+ \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n. \end{aligned}$$

Вектор-функцию от параметров $\alpha_i, i = 1, \dots, m$

$$\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^{\hat{O}}$$

было предложено назвать параметрическим геномом структуры многорежимного СЛО [13, 14]. Данная концепция параметрического генома структуры многорежимного СЛО позволила оценить показатели структурно-функциональной надежности и живучести таких объектов с учетом характера реализации режимов их функционирования и отсутствия знаний о циклограммах их задействования [13, 14].

Кроме того, анализ проведенных исследований [13, 14] показал, что при решении задач многокритериального структурно-параметрического синтеза сложных многорежимных объектов с перестраиваемой структурой на этапах разработки и создания следует принимать во внимание различные варианты задействования динамических режимов функционирования, влияющих на надежность и живучесть рассматриваемых объектов.

Наиболее заметные и удачные применения разработанных концепций выполнены в области управления производством, транспортной логистики, аэрокосмических приложений [8, 13, 14].

Заключение

Таким образом, в данной статье затрагивается весьма интересная и актуальная тема, касающаяся моделирования прогнозных цифровых двойников многорежимных сложных объектов как с монотонной, так и с немонотонной структурной функцией. Действительно, немонотонная природа таких систем подразумевает, что их поведение под воздействием различных режимов функционирования может быть совершенно непредсказуемым, что, в свою очередь, затрудняет процесс моделирования и верификации.

Предложенный подход, основанный на концепции параметрического генома функциональной структуры, выглядит многообещающе. Он может обеспечить более глубокое понимание внутренней динамики системы, благодаря чему возможно более точное предсказание ее поведения в условиях изменяющихся параметров и режимов работы.

В отсутствие циклограмм, которые обычно помогают контролировать и анализировать режимы функционирования, необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие учесть все возможные сценарии взаимодействия различных режимов. Это, в свою очередь, подчеркивает важность гибкости и адаптивности в моделировании таких систем. Дальнейшие исследования по влиянию характера и интенсивности задействования режимов на надежность и живучесть системы также являются крайне важными. Понимание того, как различные режимы взаимодействуют и влияют друг на друга, поможет не только в улучшении

характеристик надежности, но и в разработке более эффективных методов диагностики и защиты от деструктивных воздействий. Это будет способствовать созданию более устойчивых и жизнеспособных систем, что крайне актуально в современных условиях, когда операционные среды становятся все более сложными и непредсказуемыми.

Таким образом, данный подход может сыграть ключевую роль в развитии теории и практики моделирования многорежимных немонотонных систем, предлагая новые подходы к их оптимизации и управлению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Industry 4 and Industry 5.0 — Inception, Conception and Perception / X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, L. Wang // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 61. Pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
2. de Souza R. O., Ferenhof H. A., Forcellini F.A. Industry 4 and Industry 5 from the Lean Perspective // *International Journal of Management, Knowledge and Learning*. 2022. Vol. 11. Pp. 145–155. DOI: 10.53615/2232-5697.11.145-155.
3. What is a Digital Twin? — Definitions and Insights from an Industrial Case Study in Technical Product Development / J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel [et al.] // *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. 2020. Pp. 757–766. DOI: 10.1017/dsd.2020.15.
4. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконфигурацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов / В. Н. Калинин, А. Ю. Кулаков, А. Н. Павлов [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20, № 2. С. 236–269. DOI: 10.15622/ia.2021.20.2.1.
7. Городецкий В. И., Скобелев П. О. Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива // *Труды СПИИРАН*. 2017. Вып. 6 (55). С. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1.
8. Павлов А. Н. Классификация монотонных и немонотонных информационных систем на основе генома структуры // *Труды СПИИРАН*. 2012. Вып. 2 (21). С. 238–248. DOI: 10.15622/sp.21.15.
9. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 384 с.
10. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можаяева. СПб.: Санкт-Петербургское региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.
11. Ivanov D. A., Pavlov A. N., Sokolov B. V. Optimal Distribution (Re)planning in a Centralized Multi-Stage Supply Network Under Conditions of the Ripple Effect and Structure Dynamics // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 237, Iss. 2. Pp. 758–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.02.023.
12. Проектирование надежных спутников связи / под ред. М. Ф. Решетнева. Томск: Раско, 1993. 221 с.
13. Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта / А. Н. Павлов, Д. А. Павлов, А. Б. Умаров, А. В. Гордеев // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21, № 4. С. 812–845. DOI: 10.15622/ia.21.4.7.

14. Study of Technology for the Reliability and Survivability Modelling of Onboard Control System of Small Spacecraft Operating in Complex Modes / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, A. Yu. Kulakov, V. V. Zakharov // Journal of Applied Engineering Science. 2024. Vol. 22, No. 3. Pp. 612–620. DOI: 10.5937/jaes0-50149.

Дата поступления: 17.02.2025

Решение о публикации: 02.03.2025

An Approach to Predictive Digital Twin Modelling of Complex Multimode Objects

Alexander N. Pavlov^{1,2} — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems Space Complexes, Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling. Research interests: systems analysis and operations research by conditions of substantial uncertainty, the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. E-mail: pavlov62@list.ru

Valentin N. Vorotyagin¹ — PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Technologies and Automation of Information Processing and Analysis of Space Assets. Research interests: development of scientific foundations of the theory of control of structural dynamics of complex organizational and technical systems. E-mail: vorotyagin@rambler.ru

¹Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line V. O., Saint Petersburg, 199178, Russia

For citation: Pavlov A. N., Vorotyagin V. N. An Approach to Predictive Digital Twin Modelling of Complex Multimode Objects. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 37–45. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-37-45. (In Russian)

Abstract. *The development of modelling tools is a key factor in the creation and implementation of intelligent (predictive) digital twins. As a rule, many complex objects (CO) are multi-mode, i.e. a priori they have the property of non-monotony. Changes in the content of the goals and tasks required from the object, as well as the destructive effects of the external environment, lead to uncertainty in the CO functioning, which is associated with the intensity and nature of their various modes of operation. **Purpose:** the stated above situation requires a new approach to the study of multimode non-monotonic systems in conditions of significant uncertainty. **Results:** the object operation modes in the form of vertices of functional integrity schemes of the general logical-probabilistic method (GLPM) of calculus shows that the functional structure of a multi-mode object becomes non-monotonic. This situation, as well as lack of knowledge about the intensity and nature of these modes' use, required the authors to develop a model-algorithmic superstructure over the GLPM. It is based on the concept of a parametric genome of functional structures of multi-mode CO. **Practical significance:** the proposed approach made it possible to evaluate the indicators of structural and functional reliability and sustainability of such objects in the absence of knowledge about their operating mode cyclograms. Based on the approach outlined in the article, it is necessary to develop new methods that allow monitoring and management of CO operating modes.*

Keywords: *digital twin, multimode object, functional integrity scheme, non-monotonic system, parametric genome*

REFERENCES

1. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4 and Industry 5.0 — Inception, Conception and Perception, *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, Vol. 61, Pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
2. de Souza R. O., Ferenhof H. A., Forcellini F.A. Industry 4 and Industry 5 from the Lean Perspective, *International Journal of Management, Knowledge and Learning*, 2022, Vol. 11, Pp. 145–155. DOI: 10.53615/2232-5697.11.145-155.
3. Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., et al. What is a Digital Twin? — Definitions and Insights from an Industrial Case Study in Technical Product Development, *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 2020, Pp. 757–766. DOI: 10.1017/dsd.2020.15.
4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, Pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
5. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intellektualnye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh obektov [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publishers, 2006, 410 p. (In Russian)
6. Kalinin V. N., Kulakov A. Yu., Pavlov A. N., et al. Metody i algoritmy sinteza tekhnologiy i programm upravleniya rekonfiguratsiy bortovykh sistem malomassorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Methods and Algorithms for the Synthesis of Technologies and Programs for Controlling the Reconfiguration of On-board Systems of Small-Sized Spacecrafts], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2021, Vol. 20, No. 2, Pp. 236–269. DOI: 10.15622/ia.2021.20.2.1. (In Russian)
7. Gorodetsky V. I., Skobelev P. O. Mnogoagentnye tekhnologii dlya industrialnykh prilozheniy: realnost i perspektiva [Industrial Applications of Multi-Agent Technology: Reality and Perspectives], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2017, Iss. 6 (55), Pp. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1. (In Russian)
8. Pavlov A. N. Klassifikatsiya monotonykh i nemonotonykh informatsionnykh sistem na osnove genoma struktury [The Classification of Monotonous and Nonmonotonous Information Systems Based on Genome of Structure], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2012, Iss. 2 (21), Pp. 238–248. DOI: 10.15622/sp.21.15. (In Russian)
9. Yablonsky S. V. Vvedenie v diskretnuyu matematiku [Introduction to discrete mathematics]. Moscow: Nauka Publishers, 1986, 384 p. (In Russian)
10. Polenin V. I., Ryabinin I. A., Svirin S. K., Gladkova I. A. Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsionalnykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: monografiya [Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational-functional systems and armed confrontation: Monograph]. Saint Petersburg, Russian Academy of Natural Science, 2011, 416 p. (In Russian)
11. Ivanov D. A., Pavlov A. N., Sokolov B. V. Optimal Distribution (Re)planning in a Centralized Multi-Stage Supply Network Under Conditions of the Ripple Effect and Structure Dynamics, *European Journal of Operational Research*, 2014, Vol. 237, Iss. 2, Pp. 758–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.02.023.
12. Reshetnev M. F. (ed.) Proektirovanie nadezhnykh sputnikov svyazi [Design of reliable communication satellites]. Tomsk, Rasko Publishing House, 1993, 221 p. (In Russian)
13. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Umarov A. B., Gordeev A. V. Metod strukturno-parametricheskogo sinteza konfiguratsiy mnogorezhimnogo obekta [Method of Structural-Parametric Synthesis of Configuration Multi-Mode Object], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2022, Vol. 21, No. 4, Pp. 812–845. DOI: 10.15622/ia.21.4.7. (In Russian)
14. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Kulakov A. Yu., Zakharov V. V. Study of Technology for the Reliability and Survivability Modelling of Onboard Control System of Small Spacecraft Operating in Complex Modes, *Journal of Applied Engineering Science*, 2024, Vol. 22, No. 3, Pp. 612–620. DOI: 10.5937/jaes0-50149.

Received: 17.02.2025

Accepted: 02.03.2025