

УДК 65.011.56

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И ВЫБОРА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

И.Т. Кимяев (Москва)

Введение

Решение проблемы поддержания жизнеспособного (ЖС) состояния для объектов хозяйственной деятельности (ОХД), связанных с промышленным производством, заключается в обеспечении нахождения их производственно-технологических показателей в установленных пределах, не выходящих в зону невозвратного (НВ) состояния. Решение данной комплексной задачи возлагается на информационные управляющие системы (ИУС), которые укомплектованы унифицированными, взаимоувязанными функциональными компонентами, т.н. видами обеспечения (ВО), сгруппированные в иерархические контуры (подсистемы) управления.

Существующих на рынке современные программные, математические, технические и прочие инструменты (виды обеспечения) позволяют выполнять сбор и обработку огромных массивов данных различного типа и категорий, а также позволяют моделировать процессы планирования и управления на базе методик, наилучшим образом описывающих исследуемые объекты. Вместе с тем, отметим, что актуальные подходы к решению задач планирования и управления ОХД невозможны без предварительного формального описания и многокритериального синтеза структуры ИУС как на этапе его проектирования, так и при последующих реконфигурациях (модернизациях). Также отметим, что способы формального, количественного и/или качественного описания ключевых метрик для выбора наилучших (наиболее предпочтительных) структур и способов/технологий решения задач наблюдения и управления для ИУС находятся в настоящее время на начальных этапах развития [1, 2].

В настоящей работе предлагается научно обоснованный подход к количественной оценке динамических характеристик, потенциально применимых в качестве нормативных требований к функционированию контуров управления (КУ) в составе ИУС. Указанные характеристики обеспечивают комплексное описание как границ технической устойчивости систем, включая их работоспособность в регламентированных режимах эксплуатации, так и ключевых технико-экономических показателей (ТЭП). Обоснованное согласование данных параметров в условиях многокритериального синтеза структуры ИУС играет определяющую роль в обеспечении формирования и поддержания ЖС – состояния ОХД в целом.

Поддержание жизнеспособности ОХД как задача синтеза контуров управления

Анализ работы большинства действующих и проектируемых ОХД показывает, что их устойчивость и работоспособность в долгосрочной перспективе обусловлены эффективным взаимодействием материально-энергетических и организационно-информационных подсистем [3]. Эти подсистемы формируют сложную интегрированную структуру, включающую многоуровневые вертикальные и горизонтальные потоки материальных, энергетических, информационных, финансовых и др. ресурсов, характеризующихся наличием многочисленных механизмов рециркуляции, включая разветвлённые контуры обратных связей.

Для целенаправленного системного описания ИУС, рассматриваемой в

настоящей статье, используется её интерпретация в рамках системно-кибернетического подхода. Согласно данному подходу, эта система представляется как совокупность иерархически упорядоченных функциональных и управляющих подсистем, взаимодействующих с элементами ОХД и образующих единое управленческое пространство исследуемой предметной области (ПрО) [1,3]. На Рис. 5 представлена обобщённая стратифицированная (иерархическая) модель взаимодействия ключевых компонентов ПрО в рамках КУ, интегрированных в состав ОХД.

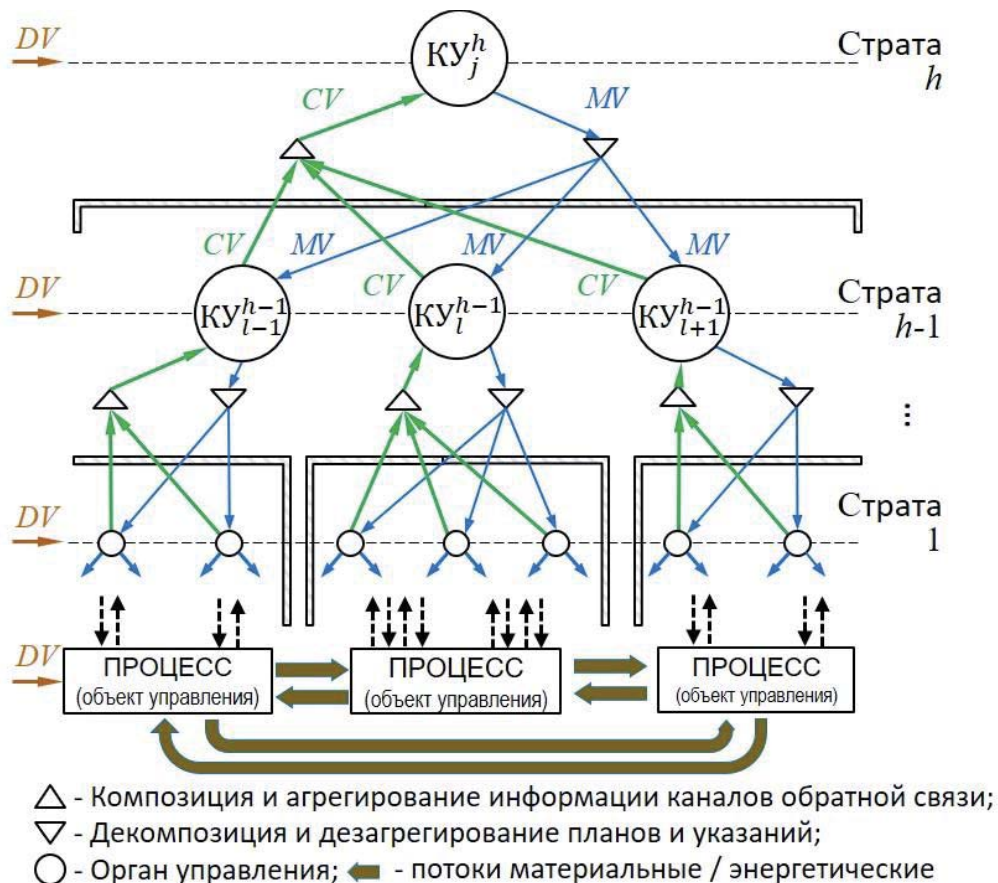


Рис. 5. Иерархия контуров управления в составе комплекса ОХД ↔ ИУС

Каждый КУ включен в два смежных контура: координации и самоуправления. При этом контур самоуправления j -го КУ является контуром координации для l -го КУ в нижестоящем $(h-1)$ -м уровне иерархии и т. д. Оценка состояния подчинённого компонента осуществляется на основе кортежа контролируемых переменных (CV). Управление этими компонентами реализуется через управляющие переменные (MV), обеспечивающие прямое воздействие. На компоненты объекта хозяйственной деятельности (ОХД) оказывают влияние внешние факторы, формализуемые как переменные внешней среды (DV), которые могут носить деструктивный характер.

Создание ИУС в соответствии с типовой структурой (Рис. 5) имеет обширную инженерную практику. Вместе с тем, синтезированные таким образом структуры зачастую не обладают набором таких свойств, которые могут предотвратить переход ОХД, как бизнес- или производственной единицы, в НВ-состояния под деструктивным воздействием внешней среды. Данное обстоятельство связано, в т.ч., с тем, что реализация управляющих воздействий как в рамках контура координации, так и контура самоуправления зачастую носит эвристический, субъективный характер и на практике предполагает изменение настроек и/или структуры алгоритмов их работы.

Как отмечено выше, на современном этапе развития подходов к системному проектированию ИУС не решена и формально не описана проблема многокритериального синтеза структуры ИУС как на стадии первоначального проектирования, так и на последующих этапах её целенаправленной реконфигурации. В свою очередь, недостаточно проработанное методологическое обеспечение данных процессов затрудняет создание таких архитектур ИУС, которые бы обеспечивали поддержание требуемого уровня ЖС ОХД в условиях неопределенности. Ниже рассмотрим некоторые показательные примеры.

Современная практика создания ОХД с возможностями по противодействию деструктивным факторам любой природы показывает, что к ключевым его свойствам следует отнести надежность и живучесть [4]. Данные свойства носят комплексный характер, а их характеристики закладываются, как правило, еще на стадии исходного проектирования производства и административно- организационных мероприятий, типа: дублирование производственных цепочек, оборудования и средств контроля и управления; создание гибких (адаптивных) алгоритмов для контуров стабилизации, защиты и блокировки; разработка планов ликвидации аварий и пр. Интеграция приведенных мер в рамках ИУС позволяет ОХД, как технологическому комплексу, поддерживать на требуемом уровне многофакторное состояние гомеостаза (динамического равновесия) [2]. В работах [5, 6] показано, что данные свойства ОХД, наряду с другими, могут быть инкапсулированы в свойство ЖС как в свойство более универсальное.

Исследование ЖС в контексте свойств сложных объектов до настоящего времени не получило широкого распространения, вследствие чего оно не имеет до конца формализованного описания. Определение ЖС, предложенное в работе [1] как свойство ОХД, предполагает, что при нахождении его ключевых показателей в диапазонах, предусмотренных исходным проектом, работа предприятия будет безопасна в части промышленной безопасности и эффективна в части ТЭП. К ТЭП как эффективности ОХД можно отнести: производственная маржинальность, ресурсо- и энергоэффективность, оборачиваемость капиталов, время вывода продукта на рынок и пр.

Особо отметим, что реальных условиях эксплуатации технические показатели ОХД характеризуют различные, зачастую противоречивые группы свойств. Например, повышение ТЭП, связанное с интенсификацией работы оборудования, снижает его надёжность; аналогично, увеличение живучести за счёт дополнительной защиты удорожает производство и ухудшает ТЭП. Таким образом, несогласованное изменение показателей приводит к их взаимному конфликту.

Учитывая сказанное, а также опираясь на предыдущие исследования [1, 7], в рамках многокритериального выбора показателей высокоэффективной работы комплекса ОХД ↔ ИУС, в качестве интегральных метрик целесообразно принять уровень ЖС ОХД и его ИУС. Отметим также, что предложенное методическое обеспечение будет иметь и существенную прикладную ценность, поскольку разработанные с его помощью артефакты и их взаимосвязи позволят сформировать требования и ограничения, например, к динамическим характеристикам ВО, входящим в состав ИУС.

Задача оценки уровня дискретизации переменных комплекса ОХД ↔ ИУС

В работе [8] отмечается, что нормальное функционирование подсистем управления любого уровня – в соответствии с базовым проектом создания ОХД как производственной или бизнес-системы – требует регулярного получения информации о её состоянии в фиксированные моменты времени. Для количественной оценки интервалов работу КУ в составе ИУС, с учётом последующего формирования и

реализации управляющих воздействий, рассмотрен подход к формализации задачи определения периодичности контроля её состояния и ключевых подсистем. В основу положена модель из [8], предназначенная для расчёта числа контрольных точек при планировании взаимодействия между планово-учётными единицами (ПУЕ). Под ПУЕ понимаются материальные, энергетические и информационные потоки производственно-технологического процесса, позволяющие количественно оценивать его динамику.

Расширим результаты, полученные в [8], применительно к задачам расчёта и оптимизации частных показателей ЖС комплекса ОХД↔ИУС. Представленные ПУЭ, функционирующие на различных уровнях иерархической структуры предприятия, образуют контуры самоуправления и координации и по своим функциональным характеристикам соответствуют компонентам управляющих устройств (КУ), показанным на Рис. 5.

Выбор пространственно-временных соотношений при взаимодействии ПУЕ/КУ между собой выполняется итеративно, с самого верхнего уровня иерархии, для каждого КУ. В связи с этим возникает задача определения для каждого КУ некоторого оптимального числа точек контроля, при следующих допущениях:

- ОХД имеет некоторый ограниченный запас по производительности работы основного производственно-технологического цикла;
- ОХД может быть переведен в любой режим работы в рамках доступной производительности, включая предельный;
- вероятность полного отказа в работе КУ как функционального компонента между смежными точками контроля состояния должна быть близкой к нулю.

В качестве основных показателей и характеристик, принимающих участие в расчетах числа точек контроля для исследуемых ОХД, приняты:

$[0, T]$ – горизонт планирования;

$A_0(T)$ – объем работ, заданный на горизонте планирования;

$P = (A_0(T), T)$ – плановое производственное задание с установленным объемом работ;

$V_0(t)$ – средняя производительность ОХД, при этом $V_{\min}(t) \leq V_0(t) \leq V_{\max}(t)$;

τ – продолжительность интервала между контрольными точками (шаг дискретизации);

N – число интервалов между контрольными точками;

$A_1(T), A_2(T)$ – максимальный и минимальный допустимые объемы работ, которые может выполнять ОХД;

ΔA – доступный резерв мощности ОХД;

$\Delta A = (A_1 - A_0) = T(V_{\max} - C)$ – потери ОХД, вызванные невыполнением планового задания на единицу продукции в конце периода автономного функционирования;

C – показатель, отражающий снижение производительности ОХД¹, вызванное воздействием возмущающих факторов;

q_1 и q_2 – затраты на обеспечение, соответственно, контроля и управления производственной деятельностью в целях компенсации единицы фактического отклонения от планового задания.

Функция $f_1(N)$ определяет возможные под влиянием деструктивных факторов потери ОХД как бизнес-системы от невыполнения планового задания к моменту T , при допущении, что потери постоянны и равномерны на всем $[0, T]$. Функция $f_1(N)$ – убывающая (при увеличении числа интервалов возможные потери системы от

¹ В работе [8] не определен.

невыполнения задания понижаются) и имеет вид

$$f_1(N) = \frac{\Delta A}{N} C.$$

Следует отметить, что показатель C (в общем виде) предполагает оценку влияния на материальные, энергетические и информационные потоки целого ряда деструктивных внутренних и внешних факторов, которые для каждой ПрО индивидуальны: флуктуации состава сырья, изменения температуры среды, снижение квалификации персонала и пр.

Функция $f_2(N)$ определяет затраты на контроль и управление, является возрастающей (при увлечении числа интервалов данные затраты повышаются) и имеет вид

$$f_2(N) = \left(q_1 + q_2 \frac{\Delta A}{N} \right) (N - 1).$$

Отметим, что для конкретных ПрО существуют объективные ограничения к повышению числа N , связанные с текущим уровнем развития технологий проактивного мониторинга и управления ИУС ОХД. Например, современные технологии измерения качества продуктов в металлургии, нефтехимии и т. д. предполагают физическое перемещение материала проб, его подготовку (гомогенизацию), воздействие реагентов и пр., существенно сократить время выполнения которых ниже определенного предела не представляется возможным¹.

Тогда, с учетом результатов работы [8], значение N должно быть таким, чтобы достигался минимум функции вида:

$$F(N) = f_1(N) + f_2(N) = \frac{\Delta A}{N} C + \left(q_1 + q_2 \frac{\Delta A}{N} \right) (N - 1) \rightarrow \min.$$

В первом приближении оценку числа интервалов контроля можно получить путем поиска экстремума для $F(N)$, без учета актуальных ограничений, связанных с характеристиками материальных, энергетических и информационных потоков. Тогда:

$$N = \left[\left(\frac{1}{q_1} \right) \Delta A (C - q_2) \right]^{1/2}. \quad (1)$$

К основным ограничениям, которые должны быть учтены при окончательном выборе τ , относятся [8]:

- ограничения на длину интервала $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, в рамках которого выполняются условия адекватности разработанных моделей управления материальными и/или энергетическими потоками как компонентами ОХД;
- исследуемые системы (ИУС, ОХД) должны быть управляемы, т. е. их состояния должны незначительно отличаться от состояний, полученных для реальных объектов ОХД и управляющих подсистем (в данном случае – ИУС) при реализации одних и тех же сценариев неопределенности. Для повышения управляемости шаг дискретизации нужно выбирать как можно меньше, но не меньше $\tau_{\min}$, определенного из требований, связанных с обеспечением адекватности моделей [8];
- стабилизируемость плановой траектории отражает способность компонентов

¹ Подразумеваются системы и способы измерений, приемлемые для массового промышленного производства.

ОХД реализовывать заданную траекторию функционирования.

Соотношения вида (1) выявляют ключевые факторы повышения ТЭП ОХД, связанные с ростом производительности и выбором технологии контроля состояния ОХД и его ИУС. Однако прикладное применение методики затруднено из-за недостаточной определённости оценок показателей q_1 , q_2 и C . Кроме того, в рамках рассмотренной методики не учитываются требования к необходимости обеспечивать ЖС в условиях неопределённостей, возникающих под воздействием случайных событий среды.

Последнее обстоятельство вытекает из того, что принятый горизонт планирования $[0, T]$ может состоять из различных отчетных периодов $t \in T$. Данные периоды могут быть отделены друг от друга возникновением случайных событий внешней / внутренней среды, следствием которых может стать реализация сценариев неопределенности $\omega \in \Omega$. Данные неопределенности, как для компонентов, так и ОХД в целом, может привести к деструктивным последствиям. Например, переходу в НВ-состояние. В свою очередь, НВ-состояние характеризуется утратой способности ОХД восстанавливать устойчивость и возвращаться к динамическому равновесию.

Проведенные исследования [9] показывают, что поддержание работы ОХД вне зоны НВ-состояния позволяет оценить уровень его ЖС как соответствующий требуемому уровню.

Учитывая сказанное, к ключевым критериям выбора N и τ целесообразно отнести интервал, в котором объект управления – в нашем случае ОХД и/или его компоненты – при реализации сценариев неопределенности ω не перейдет в НВ-состояние.

На Рис. 6 представлен пример формирования семейства зависимостей $F(N)$ (штриховые линии) от τ при различных сценариях неопределенности $\omega \in \Omega$, которые возникают при воздействии среды в течение различных отчетных периодов $t \in T$.

Для повышения наглядности, зависимость $f_2(N)$ принята неизменной (зеленая сплошная линия), а $f_1(N)$ представлена в виде семейства кривых для различных сценариев неопределенности состояний комплекса ИУС $\leftrightarrow$ ОХД (синие сплошные линии).

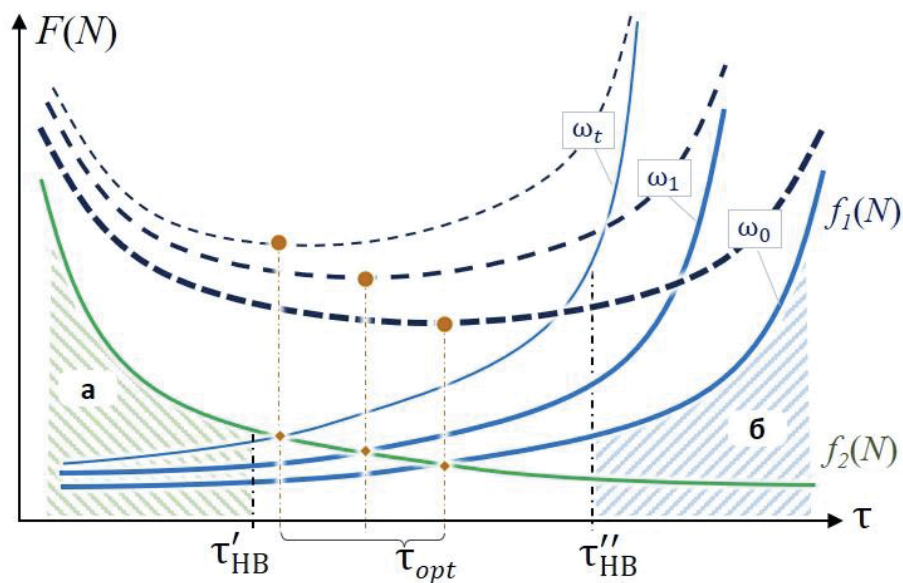


Рис. 6. Интервалы оценки состояния и формирования управляющего воздействия на компонент ОХД при различных сценариях неопределенности

а) – затраты завышены; б) – потери завышены, $\omega_{0...t}$ – сценарии неопределенности

Из графиков на Рис. 6 следует, что минимум результирующей функции $F(N)$, определяющий значение τ_{opt} с точки зрения выбранных критериев оптимизации, может иметь различные значения, при этом должно соблюдаться неравенство:

$$\tau'_{HB}(\omega_t) \leq \tau_{opt} \leq \tau''_{HB}(\omega_t), \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega, \quad (2)$$

В условиях реальной эксплуатации аналитическая оценка влияния неопределённых факторов внешней среды, описываемых множеством сценариев $\omega \in \Omega$, на соблюдение условий неравенства (2) затруднена вследствие высокой сложности и вычислительной трудоёмкости моделирования вероятностных характеристик стохастических процессов, обусловленных внешними возмущениями.

В связи с этим, для определения значения параметра τ_{opt} при выполнении заданных ограничений (2) целесообразно применить интегрированный подход, объединяющий различные методы имитационного моделирования (ИМ) и системно-кибернетический анализ, основанный на декомпозиции этапов работы КУ на этапы наблюдения и управления. Такой подход обеспечивает возможность обоснованного выбора периода временной дискретизации $\tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ процессов контроля и управления с учётом характерных динамических свойств системы, включая временные задержки, погрешности измерений, а также инерционность управляющих воздействий.

Заключение

В работе показано, что обеспечение требуемого уровня ЖС для ОХД представляет собой сложную научно-техническую проблему. Трудность данной проблемы обусловлена необходимостью оперативного и обоснованного выбора управляющих воздействий в рамках ОХД и ИУС, критерии качества работы которых зачастую являются противоречивыми и требуют компромиссных решений. Дополнительные трудности связаны с отсутствием современных, целостных и непротиворечивых методологических и прикладных подходов к формализованному описанию и исследованию задач многокритериального синтеза структуры ИУС на всех этапах её жизненного цикла.

Для решения поставленной задачи предложено применение концептуально-методологической базы на основе современного системно-кибернетического подхода, разрабатываемого в рамках междисциплинарной системы знаний. На её основе реализуются модели и методы проактивного наблюдения и управления взаимодействием ОХД и ИУС как сложным объектом. Используемые подходы основаны на принципах комплексного моделирования, интеллектуализации управления и расширенного принципа необходимого разнообразия, направленных на эффективное управление сложностью.

С помощью разработанного методологического обеспечения выделены ключевые факторы, определяющие структуру ИУС и связи между её элементами. Эти факторы позволяют формализовать требования и ограничения к количественно-качественным и динамическим параметрам типовых видов обеспечения, необходимых для комплектования ИУС.

В качестве практической реализации МАО предложена модель оценки динамических характеристик компонентов ИУС, включающая показатель качества – время периодизации выполнения задач наблюдения и управления на различных уровнях иерархии. Обеспечение функционирования ИУС в установленные временные интервалы способствует устойчивому поддержанию жизнеспособности ОХД и самой ИУС, а также повышает её адаптивность к изменениям внутренних и внешних условий.

Литература

1. **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Методология обеспечения жизнеспособности сложного объекта на основе управления его структурной динамикой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Vol. 25, № 4. P. 167-176.
2. **Regev Gil, Hayard Olivier, Wegmann Alain.** What we can learn about business modeling from Homeostasis // Lecture Notes in Business Information Processing. Berlin: Heidelberg, 2013. Vol. 142. P. 1-15.
3. **Поспелов Г.С.** Введение в теорию системно- программного планирования и управления: Лекции / МинВуз РСФСР. М.: МФТИ, 1974.
4. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами // Труды СПИИРАН. 2010. Vol. 15, № 4. P. 7-52.
5. **Beer S.** Cybernetics and Management. United Kingdom: English Universities Press, 1970. 240 p.
6. **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Модельно-алгоритмическое обеспечение для решения задач синтеза контуров и технологий проактивного управления жизнеспособностью сложных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Vol. 26, № 7. P. 335-346.
7. **Зимин И.Н.** К вопросу о долговечности проектов и формировании жизнеспособных систем // Труды ИСА РАН. 2013. Vol. 63. P. 16-29.
8. **Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В.** Адаптивные системы управления машиностроительным производством. М.: Машиностроение, 1989. 208 p.
9. **Linkov I. et al.** Resilience stress testing for critical infrastructure // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2022. Vol. 82. P. 103323.