

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДЕРНИЗАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М. А. Долматов, А. М. Плотников, Б. В. Соколов, В. В. Бураков,
А. Н. Павлов (Санкт-Петербург)

Введение

Особенность современных судостроительных предприятий (ССП) состоит в том, что они в условиях острой конкурентной борьбы за заказы на строительства судов вынуждены периодически проводить реконструкцию и модернизацию оборудования и технологий с целью повышения эффективности производственных процессов [1-2]. При этом говоря о научной стороне проблемы реконструкции и модернизации ССП, следует подчеркнуть, что данная проблема относится к сложнейшей проблеме многоструктурного синтеза как облика ССП, так и соответствующих производственными процессами (ПрП), с учетом динамически изменяющейся обстановки, складывающееся на предприятии и вокруг него. Решение рассматриваемой проблемы предполагает получение ответов на следующие основные вопросы (или по-другому, решение следующих важных пяти научно-технических и производственных задач) [1–6]:

- каким должен быть облик нового ССП;
- к какому сроку должна быть завершена реконструкция (модернизация) ССП;
- какова должна быть технология реконструкции (модернизация) ССП без остановки действующего производства;
- какой должен комплексный план реконструкции (модернизация) ССП;
- как должен быть организован мониторинг процесса реконструкции (модернизация) ССП, а также какие управленческие решения должны приниматься, чтобы обеспечить гарантированное выполнение комплексного плана реконструкции (модернизация) ССП без остановки действующего производства и текущих планов производства.

В современных условиях обоснованные и оперативные ответы на перечисленные вопросы можно найти только с использованием интегрированных систем поддержки принятия решений (ИСППР), которые входят в состав существующих и создаваемых автоматизированных систем управления судостроительным предприятием (АСУ ССП).

Важное место в данных ИСППР занимает специальное программно-математическое и информационное обеспечение (СПМИО) комплексного и имитационного моделирования (КИМ) ССП на различных этапах его жизненного цикла (ЖЦ). В представленном докладе будут рассмотрены основные подходы к комплексному моделированию и оптимизации показателей качества функционирования ССП [10–14].

Предлагаемый подход

В целом, создание судов на современных ССП, также как и развитие (реконструкция и модернизация) современных и перспективных ССП, как и любых других сложных организационно-технических систем (СОТС), представляет собой многоэтапный процесс, характеризующийся значительными капиталовложениями, длительным сроком внедрения и реализации, а также существенной неопределенностью, связанной с возможными изменениями как целей проектирования и применения, так и воздействий различного рода возмущений внешней среды.

Анализ зарубежного и отечественного опыта создания и развития СОТС (к которым, в частности, относятся и различные виды существующих и перспективных ССП) показывает, что данные процессы достаточно продолжительны во времени и сопровождаются наряду с повышением эффективности функционирования ССП (за счет совершенствования процессов управления) расходом различных видов ресурсов (фи-

нансовых, материальных, информационных и т.п.). При этом на практике (особенно в условиях рыночных отношений) имеет место экономическая неравномерность и неравнозначность различных программ выделения денежных средств на проектирование, разработку, эксплуатацию и совершенствование основных элементов и подсистем ССП. В указанной ситуации каждому конкретному варианту создания и применения ССП соответствуют различные соотношения между эффектами и затратами, получаемыми в рамках данных систем в каждый момент времени.

Для конструктивного оценивания эффективности функционирования как существующей (либо модернизируемой) ССП, так собственно производственных процессов, связанных с созданием судов, должна быть введена соответствующая система показателей эффективности, включающая [11–14]:

- **показатели результативности деятельности ССП** (например, объем выполненных работ и произведенной продукции, показатель продвижения технической готовности судна, количество сданных заказчику судов, количество реконструированного оборудования, показатели производительности труда, показатели качества выполненных работ и произведенной продукции и т.п.);

- **временные показатели функционирования ССП** (сроки выполнения работ по созданию судов, длительность производственного цикла, ритм и такт выпуска изделий, сроки проведения реконструкции ССП, время нахождения предметов труда в производственных запасах, длительность перерывов в производственном процессе, вызванные вспомогательными процессами, с режимом работы, межоперационные перерывы и т.п.). К показателям, характеризующим временной аспект существования ССП, можно также отнести показатели, характеризующие длительность реализационного периода ССП (время проектирования и создания) и периода полезной жизни предприятия (время эксплуатации, развития, конверсии и т.п.);

- **показатели экономической эффективности и ресурсосберегаемости**, среди которых можно, в первую очередь, выделить показатели полных затрат на создание и применение ССП на всех этапах жизненного цикла (капитальные затраты, эксплуатационные затраты, затраты на модернизацию и конверсию), время полной окупаемости системы, показатели расхода (сбережения) ресурсов всех видов, полноты использования на всех этапах жизненного цикла, показатели равномерности использования оборудования, показатели технологической трудоемкости строительства судна, показатели, отражающие временной аспект эффективности процессов развития, тесно связаны с показателями экономической эффективности. Изменение длительности жизненного цикла (его сокращение или удлинение) влияет на суммарный расход ресурсов. Связь между этими группами показателей не является однозначной. В одних случаях удлинение различных этапов жизненного цикла приводит к увеличению расхода ресурсов (например, при длительной эксплуатации морально и физически устаревших подсистем ССП), в других может дать значительную экономию;

- **показатели, характеризующие надежность, отказоустойчивость, живучесть, катастрофоустойчивость ССП** на различных этапах его существования. К ним, в первую очередь, можно отнести показатели структурной и функциональной надежности, избыточности, показатели гибкости (адаптируемости) структур ССП, показатели сложности данных структур, показатели критичности отказов, показатели доступности технологического оборудования ССП (суммарное время простоев оборудования по любым причинам, показатели, оценивающие риски возникновения и развития аварий и катастроф, показатели, оценивающие последствия аварий и катастроф для конкретных производственных процессов (продолжительность, масштаб и объем ущерба), показатели, оценивающие, общие затраты времени и полноту выполненных операций, связанных с восстановлением работоспособности оборудования ССП, показатели, оцениваю-

щие капитальные и эксплуатационные затраты на обеспечение требуемого уровня катастрофоустойчивости, затраты других видов ресурсов, показатели, оценивающие, степень критичности операций, выполняемых на ССП, значимость ресурсов и информации, используемой для обеспечения требуемого уровня катастрофоустойчивости;

• **показатели эффективности управления жизненным циклом ССП.** К указанным показателям могут быть отнесены показатели, характеризующие качество реализации основных функций управления развитием ССП (функций целеполагания, планирования, управления, контроля, анализа, координации), показатели, характеризующие оперативность (своевременность) и полноту реализации технологических циклов управления (ТЦУ) соответствующими элементами и подсистемами ССП.

Говоря о концептуальном и формальном моделировании жизненных циклов ССП необходимо отметить следующий важный аспект данной проблемы, связанный с существенной априорной неопределенностью исходной информации, особенно на ранних стадиях жизненного цикла рассматриваемой системы. Так, рациональные требования к облику модернизируемого ССП на стадии внешнего проектирования приходится выбирать в условиях большой степени неопределенности, так как период использования проектируемой системы по назначению отдален по времени иногда на довольно большой срок; система предпочтений заказчика на стадии внешнего проектирования еще недостаточно четко выявлена; кроме того, слабо структурировано множество целей и задач, а множество допустимых стратегий (управлений) на каждом этапе жизненного цикла достаточно велико, а сами стратегии разнообразны [12]. По мере реализации макроопераций, описывающих этапы жизненного цикла ССП, степень неопределенности рассматриваемых ситуаций несколько уменьшается из-за того, что часть ранее неопределенных факторов становится известной. Например, на завершающей фазе внешнего проектирования становится известным перечень требований к ССП, так как уже выбран вариант системы из множества допустимых вариантов.

Введем следующие обозначения:

– $J_{00}^{(i)}(\bar{\mathbf{u}}(i))$, $J_{00}^{*(i)}$ – обобщенный показатель эффективности ССП на i -м этапе жизненного цикла ССП и его экстремальное значение;

– $\bar{\mathbf{u}}(i) \in \Delta(i)$ – вектор и множество допустимой стратегии управления ССП на i -м этапе жизненного цикла;

– $\bar{\xi} \in \Xi(i)$ – вектор и множество неопределенных факторов (возмущающих воздействий) на i -м этапе жизненного цикла.

Тогда по мере выполнения этапов жизненного цикла мощности множеств $\Delta(i)$, $\Xi(i)$ сокращаются, так как часть управляющих возмущающих воздействий на каждом предыдущем (i -м этапе) становится на следующем этапе определенными факторами, формирующими условие для реализации нового этапа обобщенной операции.

На рисунке 1 приведена схема реализации рассматриваемых обобщенных макроопераций, на которой показано постепенное сужение множества допустимых стратегий при переходе от одного этапа жизненного цикла к другому. В этом случае множество определенных факторов расширяется вследствие поступления информации о решениях, принимаемых на каждом этапе жизненного цикла системы [7, 12–14].

После каждого этапа жизненного цикла постепенно сокращается и объем системы, реализующей обобщенную операцию (системы управления жизненным циклом ССП). Системы управления жизненным циклом ССП на каждом из этапов, которые мы обозначим символами $S(i)$, $i = 1, 2, 3, 4$, на рисунке 1 изображены частично перекрывающимися прямоугольниками [12]. Высота таких прямоугольников условно показывает глубину проработки вопросов создания ССП на соответствующем этапе, а сторона основания прямоугольника – широту охвата вопросов. Огибающая кривая в нижней части

рисунка 1 показывает, как увеличивается глубина проработки и сокращается ширина охвата вопросов с течением времени.

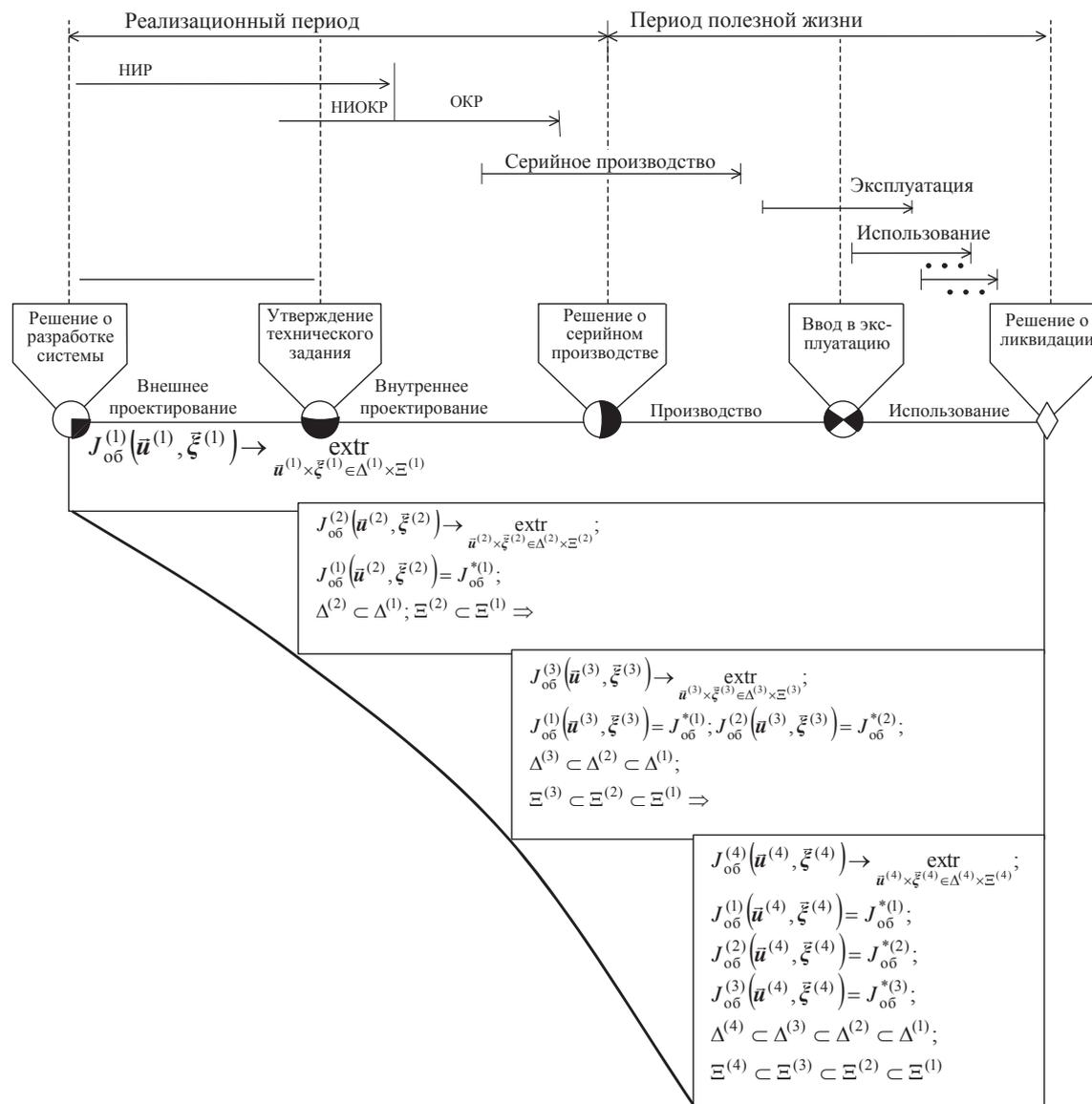


Рис. 1. Схема взаимосвязи обобщенных макроопераций при реализации жизненного цикла ССП

Проведенные исследования показали, что одна из основных особенностей функционирования ССП состоит в том, что на практике наблюдается ее структурная динамика, вызываемая различными внешними, внутренними, объективными субъективными причинами и/или их комбинациями. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей ССП, либо обеспечения наилучших условий функционирования при возможной деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе управление реконfigurацией структур ССП).

Задачи управления структурной динамикой ССП по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика ССП и формирования соответствующих программ управления их развитием. Главная трудность и особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем. Определение оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами ССП может быть выполнено лишь после того, как будет известен перечень функций и алгорит-

мов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам ССП зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется еще и тем, что под действием различных причин во времени изменяется состав и структура ССП.

К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием ССП исследован недостаточно глубоко. Получены новые научные и практические результаты в рамках следующих направлений исследований:

- синтез технической структуры ССП при известных законах функционирования основных элементов и подсистем ССП (1 направление);
- синтез функциональной структуры ССП или, по-другому, синтез программ управления основными элементами и подсистемами ССП при известной технической структуре ССП (2 направление);
- синтез программ создания и развития новых поколений ССП без учета этапа совместного функционирования существующей ССП и внедряемой ССП.

Известен ряд итерационных процедур получения совместного решения задач, исследования которых проводятся в рамках 1 и 2 направлений. В целом все существующие модели и методы структурно-функционального синтеза облика ССП и формирования программ их развития используются на этапах внешнего и внутреннего проектирования облика ССП, т.е. тогда, когда фактор времени не является существенным. Однако, как показывают исследования, на этапах эксплуатации и развития (совершенствования) наблюдается существенная структурная динамика ССП.

Следует отметить, что в ходе реализации указанных этапов жизненного цикла ССП очень часто наблюдаются ситуации, при которых на довольно длительных интервалах времени (определяемых внешней рыночной конъюнктурой, финансовыми возможностями организации и т.п.) одновременно существуют и взаимодействуют как элементы и подсистемы «старого» (функционирующего) ССП, так и «нового» (реконструируемого) ССП. Для таких ситуаций очень важно разработать такие планы и программы управления развитием структур ССП, при которых не происходило бы ухудшение показателей качества деятельности предприятия.

Исходя из вышеизложенного и руководствуясь основополагающими концепциями и принципами системного подхода, целесообразно исследуемую проблему комплексного и имитационного моделирования функционирования ССП в штатных и заданных условиях рассматривать не изолированно, а в рамках более общей проблемы управления структурной динамикой ССП на различных этапах ее жизненного цикла.

При таком подходе, базируясь на разрабатываемых авторами доклада технологиях комплексного моделирования, удастся одновременно решить все пять перечисленных во введении задач.

В соответствии с разработанной авторами обобщенной процедурой решения данных задач на первой фазе должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний ССП или, говоря другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового (модернизируемого) облика предприятия, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке. В указанной ситуации задачи, решаемые на первой фазе, сводятся к задачам динамического структурно-функционального синтеза ССП.

На второй фазе исследования задачи выбора оптимальных программ управления структурной динамикой (УСД) предприятия приходится решать целую совокупность частных задач многоуровневой и многоэтапной оптимизации, в ходе которых

определяется срок, к которому должна быть завершена реконструкция (модернизация) ССП; технология реконструкции (модернизация) ССП без остановки действующего производства; формируется комплексный план (либо многовариантный план) реконструкции (модернизация) ССП, а также разработан перечень организационно-технических мероприятий, обеспечивающих успешную реализацию данного плана (планов) в динамически изменяющейся обстановке.

Одно из главных достоинств предлагаемого метода поиска оптимальных программ УСД ССП состоит в том, что в ходе формирования вектора программных управлений в финальный момент времени проектировщики, наряду с оптимальным планом, одновременно получают и то искомое многоструктурное макросостояние, находясь в котором ССП сможет выполнять поставленные перед ним задачи в складывающейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости.

В результате проведенных исследований были разработаны комбинированные методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных программ УСД ССП в централизованном и децентрализованном режимах её функционирования. В качестве базового комбинированного метода предложено использовать сочетание метода ветвей и границ и метода последовательных приближений. Теоретическое обоснование данного метода основано на доказанной теореме о свойствах релаксированной задачи выбора оптимальной программы УСД ССП. Особенности реализации предлагаемого комбинированного метода проиллюстрированы при решении примера.

В ходе выполненных исследований была проведена классификация и анализ возмущающих факторов, оказывающих влияние на функционирование сложной технической системы, предложены пути учёта возмущающих факторов в моделях УСД. Наиболее перспективным путём учёта факторов неопределённости (возмущающих факторов) в моделях УСД ССП является путь, в котором комплексно используются все адекватные способы и формы представления данных факторов. При этом комплексное исследование возможностей по управлению ССП, при достаточно широком их толковании, включает в себя как оценивание функционирования ССП в нормальных режимах, так и оценивание возможного поведения системы в экстремальных ситуациях, в том числе, и оценивание «возможностей» возникновения возмущающих воздействий, разрушающих систему. В этом случае исследование функционирования ССП должно включать в себя следующие этапы [4, 12, 14]:

а) выявление всех возможных вариантов сценариев изменения внешней обстановки, в которых может применяться ССП, включая экстремальные ситуации и воздействия, могущие вызвать катастрофические последствия, связанные с ними;

б) анализ поведения ССП в обычных условиях функционирования на основе априорной вероятностной информации (если такая имеется), проведение имитационного моделирования, обработки экспертной информации с использованием теории субъективной информации и теории нечётких множеств;

в) те же действия, что и в «б» для всех основных экстремальных ситуаций, нахождение гарантированных оценок результатов функционирования ССП в этих ситуациях;

г) нахождение обобщённых (интегральных) оценок эффективности управления структурной динамикой ССП.

При исследовании задачи б) были предложены алгоритмы параметрической и структурной адаптации моделей УСД ССП, основанные на методах нечёткой кластеризации и анализа иерархий, методах аналитико-имитационного моделирования.

Кроме того, при решении данной задачи осуществлялась разработка прототипа программного обеспечения решения задачи поиска программ управления структурной динамикой ССП. На рисунке 2 представлена обобщенная архитектура созданного

имитационно-моделирующего стенда, на котором удалось реализовать отдельные этапы предложенной обобщенной процедуры структурно-функционального синтеза облика ССП. В основу архитектура положены перспективные технологии создания и эксплуатации сервис-ориентированных систем. В перспективе данный стенд будет сопряжен с реальными производственными процессами через соответствующую систему мониторинга, с помощью которой в моделирующую систему будут поступать реальные данные, на основе которых можно будет проводить упреждающее (предсказательное) моделирование хода выполнения производственного плана.



Рис. 2. Обобщенная архитектура создаваемого экспериментального образца имитационно-моделирующего стенда

Заключение

В статье предложена обобщенная процедура решения задач комплексного моделирования и оптимизации показателей качества функционирования ССП. При этом предлагаемая в рамках данного проекта интерпретация процессов функционирования ССП как процессов управления его структурной динамикой открывает как перед проектировщиками, так и людьми, осуществляющими непосредственную эксплуатацию указанных систем широкую перспективу. Данный подход и соответствующая интерпретация, позволяют: во-первых, непосредственно связать те общие цели, на достижение которых ориентировано функционирование ССП, с теми целями, которые реализуются в ходе управления структурами ССП; во-вторых, обоснованно определять и выбирать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций (действий), связанных со структурной динамикой; и, в третьих, осознанно находить компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой ССП.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 16-07-00925, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетных тем №№0073-2014-0009, 0073-2015-0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-

Литература

1. Технология судостроения: уч. для вузов/Александров В.Л. и др.: под общ. Ред. А.Д. Гармашева – СПб.:профессия, 2003. –342 с., ил.
2. **Васильев А. А., Долматов М. А., Плотников А. М., Попов В. И.** Разработка организационно-технологических проектов технического перевооружения и реконструкции судостроительных предприятий Санкт-Петербурга с применением методов имитационного моделирования // Морской вестник. СПб., 2007. № 3 (6).
3. **Савин Г. И.** Системное моделирование сложных процессов. – М.:Фазис, 2000.
4. Технология системного моделирования/ Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов и др.; Под общ. ред. С. В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988.
5. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001.
6. **Павловский Ю. А.** Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000.
7. Имитационное моделирование производственных систем / А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев, В. И. Плескунин и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983.
8. **Пешель М.** Моделирование сигналов и систем. – М.: Мир, 1981.
9. **Поляк Ю. Г.** Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. – М.: Сов. радио, 1971.
10. **Лескин А. А.** Алгебраические модели гибких производственных систем. – Л.: Наука, 1986.
11. **Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.** Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.
12. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988, т.3. Эффективность технических систем/ Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова.
13. **Калинин В. Н., Резников Б. А.** Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1987.
14. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.