

На правах рукописи



КУЛЕШОВ Игорь Валерьевич

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Оренбург – 2025 г.

Работа выполнена на кафедре управления и информатики в технических системах федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет»

Научный
руководитель:

доктор технических наук, профессор
Пищухин Александр Михайлович

Официальные оппоненты:

Орлов Сергей Павлович

доктор технических наук, профессор
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника»

Жевнерчук Дмитрий Валерьевич

доктор технических наук, доцент
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», заведующий кафедрой «Вычислительные системы и технологии»

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Защита диссертации состоится «28» ноября 2025 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13, зал заседаний специализированного совета, ауд. 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5612/asp/248>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д.И. Парфёнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года главные задачи связаны с формированием высокотехнологичных и конкурентоспособных направлений, как основы для восстановления экономики.

Основополагающими принципами строительства являются индустриализация производства и масштабирование технологических процессов с целью повышения качества строительных конструкций и строительно-монтажных работ, а также уменьшения стоимости и сроков строительства объектов. В связи с этим в современном строительстве наблюдаются тенденции преимущественного производства строительных конструкций и материалов в заводских условиях, а на стройплощадке, как правило, локализуются технологические процессы, перенос которых в заводские условия невозможен (монтаж, сборка, изоляционные и отделочные работы). При этом процессы разобщаются, а для создания сложного цельного продукта необходимо их соединить. Объединение процессов обеспечивает возможность рассмотрения системы в целом (как многопроцессной) с целью выявления общей структуры и обеспечения эффективного функционирования. Такой подход имеет преимущества по сравнению с аналитическим подходом, при котором предполагается улучшение или оптимизация каждой технологической единицы по отдельности, преимущественно без учета взаимодействия между ними. В производственных многопроцессных системах составляющие технологические процессы обычно достаточно отработаны, но «узким местом» остается их согласованное соединение. Важность согласования процессов подчеркивает, например, японская система КАНБАН, использующая философию «точно в срок». При этом, на главном конвейере собирается автомобиль, а параллельно протекает процесс сборки двигателя. К моменту, когда сборка автомобиля потребует установки двигателя он должен быть готов, проверен и доставлен. Любая задержка или опережение одного из процессов (сборки или изготовления двигателя) неминуемо ведет к потерям.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами соединения процессов занимались как зарубежные ученые: Халлэйл Н., Касслер, Э.Л., Моггридж, Г.Д., Эль-Халваги, М. М., Кемп, И.К., Линнхофф, Б., Д. В. Таунсенд, Д. Боланд, Г. Ф. Хьюитт, Б.Э. А. Томас, А. Р. Гай и Р.Х. Марсленд, Шеной, У.В., так и отечественные: Аверьянов О.И., Васильев В.Н., Потехин И.П., Судов, М.А. Михайловский, В.А. Мыльников. Эффективность совместно реализуемой совокупности процессов, обуславливается степенью их координации и синхронизации. Координацией результатов реализуемых процессов занимались Бойчук Л. М., Куш С. П., Галямова Э. Ф. Вопросы системного согласования рассматривались в работах Абдрашитова Р.Т., Пищухина А.М. и др.

На основе исследований, математической постановки и решения соответствующих задач, были предложены схемы взаимной оптимизации протекающих процессов, получено множество важных результатов в этой области. Но несмотря на достигнутые успехи согласованное соединение процессов в любой многопроцессной системе остается недостаточно изученным.

Объект исследования – строительное производство как многопроцессная система.

Предмет исследования – модели, методики, механизмы управления соединениями процессов в многопроцессной системе.

Целью работы является разработка критериев и моделей, повышающих эффективность процедуры соединения процессов в многопроцессной системе, а также постановка и решение задач оптимального управления этой процедурой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать управление процедурой соединения процессов на основе многоуровневой модели;
- выявить структуру процедуры соединения процессов;
- провести системный анализ механизмов соединения процессов в многопроцессной системе;
- определить оптимальные зависимости при реализации различных механизмов соединения процессов в реальной производственной системе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- многоуровневой модели согласования соединяемых процессов, отличающейся тем, что на каждом уровне анализируется свой аспект процедуры соединения со своими ограничениями: компонентными, системными, процессными, экономическими и социальными;
- двухэтапной модели *управления соединением процессов*, при котором на первом этапе оптимизируются готовности процессов к соединению, а на втором осуществляется мониторинг отклонений от проекта и выбор соответствующих реакций на них, отличающемся вероятностным описанием первого этапа;
- в трех механизмах соединения процессов, отличающихся тем, что для снижения негативного влияния колебаний производительности процессов, используется промежуточный процесс, при пространственной разнесённости используется передатчик, а при ограничениях производительности используется сопряжение процессов;
- совокупности выявленных зависимостей для различных механизмов соединения процессов в производственной сфере, отличающихся получением их в результате постановки и решения задач *оптимального управления соединением процессов*.

Теоретическая и практическая значимость. Многоуровневая модель соединения процессов может быть использована при создании систем автоматизированного управления сложными многопроцессными производствами с целью повышения их эффективности.

Выделение двух этапов при соединении процессов позволяет разделить управленческие задачи: на первом этапе повышение готовности процессов к соединению, а на втором реализация соединения и мониторинг их параметрической согласованности.

Выявленные механизмы соединения процессов могут быть использованы в расчетно-проектной практике при моделировании и реализации многопроцессных производственных систем.

Полученные оптимальные зависимости при соединении процессов, повышающие эффективность функционирования многопроцессных систем, имеют перспективы применения в производственных системах и объектах различного назначения и степени автономности.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач применяются

- методы системного и структурного анализа;
- методы теории управления: координатно-параметрическое управление, оптимальное управление, методы теории систем с распределенными параметрами;
- методы математического моделирования.

Соответствие паспорту специальности. Результаты исследования соответствуют пунктам паспорта специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка

информации, статистика»:

п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п. 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п. 11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- пятиуровневая структурная модель соединения процессов, повышает эффективность этой процедуры за счет многоаспектного подхода и снижения многосвязности многопроцессной системы;

- двухэтапный подход к управлению соединением процессов позволяющий на первом этапе оптимизировать уровень готовности к их соединению, а на втором сосредоточиться на контроле и коррекции параметров реального соединения;

- выявленные механизмы соединения процессов, устраняющие несогласованности потоков, нескоординированность пространственного положения и учитывающие взаимосвязь в развитии между ними;

- результаты решения поставленных задач оптимального управления с различными механизмами соединения процессов, являющиеся практически полезными в производственной сфере.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования. Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным использованием математического аппарата, компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями, результаты которых не противоречат известным опубликованным положениям в данной области исследования.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследований докладывались на международной н/т конференции «Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону (Архангельск, 2017)»; Всероссийской научно-методической конференции – «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры (Оренбург, 2017, 2018, 2019)»; на международной конференции «International Scientific Conference Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development (CATPID-2019) (Кисловодск, 2018, 2019)»; на международной конференции «International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2019) dedicated to the 85th anniversary of NI Ibragimov (Грозный, 2019)»; на международной конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (CATPID-2020)».

Внедрение результатов. Разработанные модели, методики и алгоритм прошли экспериментальную проверку и частично внедрены при организации строительства панельных зданий в условиях строительных предприятий Оренбургской области.

Предложенные модели, методы и алгоритмы используются в учебно-методическом материале и применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлению подготовки 08.03.01 – Строительство.

Публикации. По материалам диссертационной работы и результатам исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4

в изданиях, индексированных в международной базе цитирования Scopus, а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. Личный вклад автора включает: постановку задач исследования и выбора методов их решения, разработку программы теоретических и экспериментальных исследований строительных процессов, анализ и научное обобщение результатов, формулировку выводов и защищаемых положений.

Структура диссертации. Диссертация изложена на 158 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 207 наименований, содержит 45 рисунков, 1 таблицу, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи исследования, характеризуется научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и достоверность, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса в области соединений процессов и задачи исследования» анализируются различные аспекты соединения процессов в многопроцессной системе.

В современном строительстве наблюдаются тенденции преимущественного производства строительных конструкций и материалов в заводских условиях, а на стройплощадке, как правило, локализуются технологические процессы, перенос которых в заводские условия невозможен (монтаж, сборка, изоляционные и отделочные работы), т.е. процессы разобщаются.

Такие производственные системы можно описать IDEF0 диаграммой, отображённой на рисунке 1.

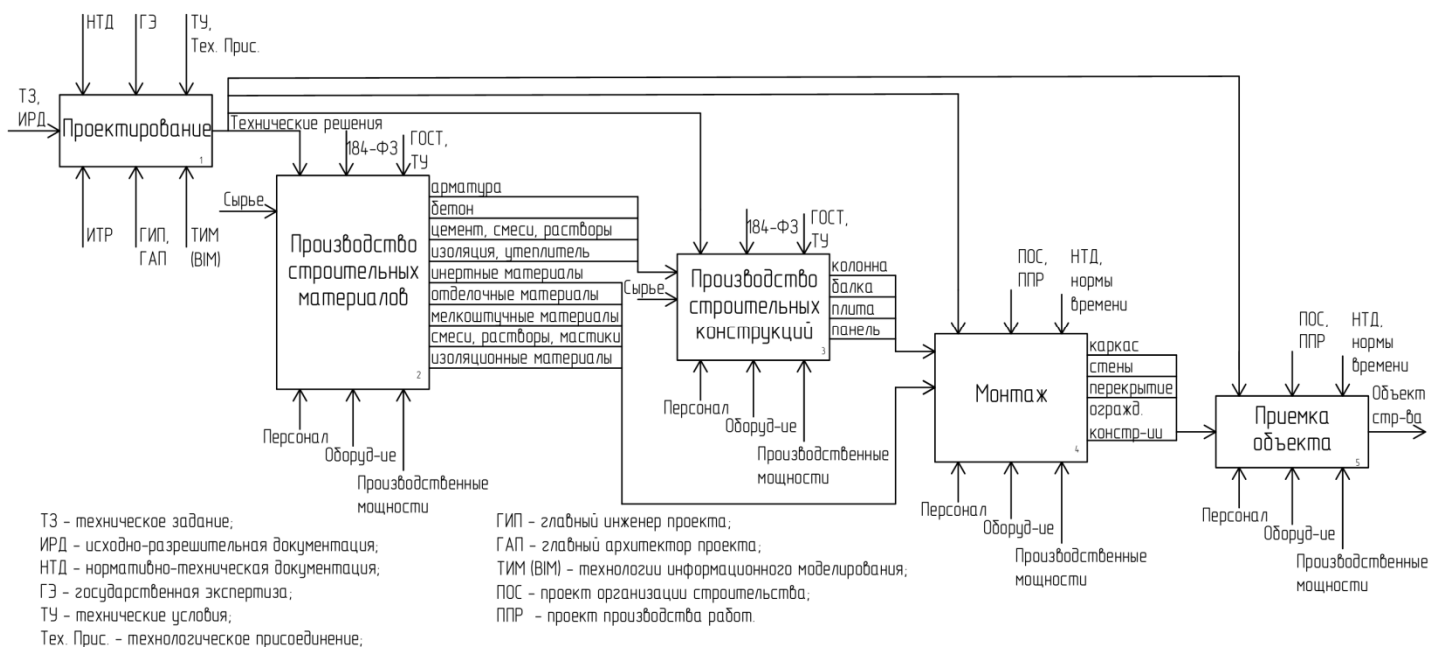


Рисунок 1 - IDEF0 диаграмма модели производственного процесса.

С другой стороны, создание сложного качественного продукта требует соединения этих разорванных процессов с заданным уровнем организационно-технологической надежности. При этом объединение процессов и возможность рассмотрения системы в целом (как многопроцессной системы) позволяет улучшить согласованность взаимодействия процессов, выявить общую структуру и, тем самым, обеспечить её эффективное функционирование. Такой процессный подход имеет преимущества по

сравнению с аналитическим подходом, при котором предполагается улучшение или оптимизация каждой технологической единицы по отдельности, преимущественно без учета взаимодействия между ними.

Эффективность функционирования многопроцессных систем в большой степени зависит от процессной координации, синхронизации, согласования, то есть обуславливается организационно-технологической надежностью этих соединений.

Соединение процессов, как правило, затратная, сложная процедура, требующая глубокого предварительного анализа и обоснования. На практике вопросы, связанные с согласованным соединением процессов, включаются в проектную часть создания продукта. Такой подход позволяет на стадии проектирования технологических процессов предусматривать рациональные показатели, условия, механизмы их соединения. При этом предполагается, что проектные требования будут реализованы без отклонения.

Однако при реализации проекта возникают многочисленные риски и неопределенности в отношении соблюдения проектных требований, что влечет за собой дополнительные организационные действия. Эти действия как правило будут нерациональными, а процессы при этом не готовы к «форс-мажорным» обстоятельствам. Выходом из этой ситуации может быть вероятностное описание процессов и направление больших организационных ресурсов на наиболее вероятный исход событий для повышения этой готовности.

Таким образом, управление соединением процессов в значительной степени зависит от того, проводится оно при проектировании или реализации. Кроме того, управление процедурой соединения должно иметь несколько контуров, направленных на поддержание заданных уровней управляемых величин у каждого из компонентов системы, в качестве которых выступают процессы, а также по каждому из аспектов: системности, процессности, экономики и социальной полезности. В этом случае, лучше всего подходит многоуровневое управление со специализацией в отношении указанных аспектов.

В научной литературе имеются сведения по разработке многоуровневых систем. Например, такая постановка встречалась при выборе критериев оптимизации и включала четыре уровня: параметрический, структурный, технологический и экономический. При этом критерий выбора выявлялся на верхнем уровне и спускался на нижний, то есть для выбора технологии необходим экономический критерий, для выбора структуры – технологический, а для выбора оптимальных параметров необходим структурный критерий. Однако, экономика может быть успешной, но находиться за пределами морали, экологических, правовых, политических и других ограничений. Поэтому над экономическим уровнем должен главенствовать социальный уровень. Применительно к соединению процессов такая схема требует адаптации.

В конце главы сформулирована цель и задачи исследования решение которых устранил указанные выше противоречия.

Во второй главе «Системный подход к управлению соединением процессов» разрабатывается многоуровневая, двухэтапная система управления соединением процессов.

Рассмотрим сложные многопроцессные системы, создающие, как правило, объекты, требующие предварительного проектирования. Исследование направлено на совершенствование процедуры соединения процессов. Для этого используем многоуровневый подход к построению соответствующей модели (см. рисунок 2).

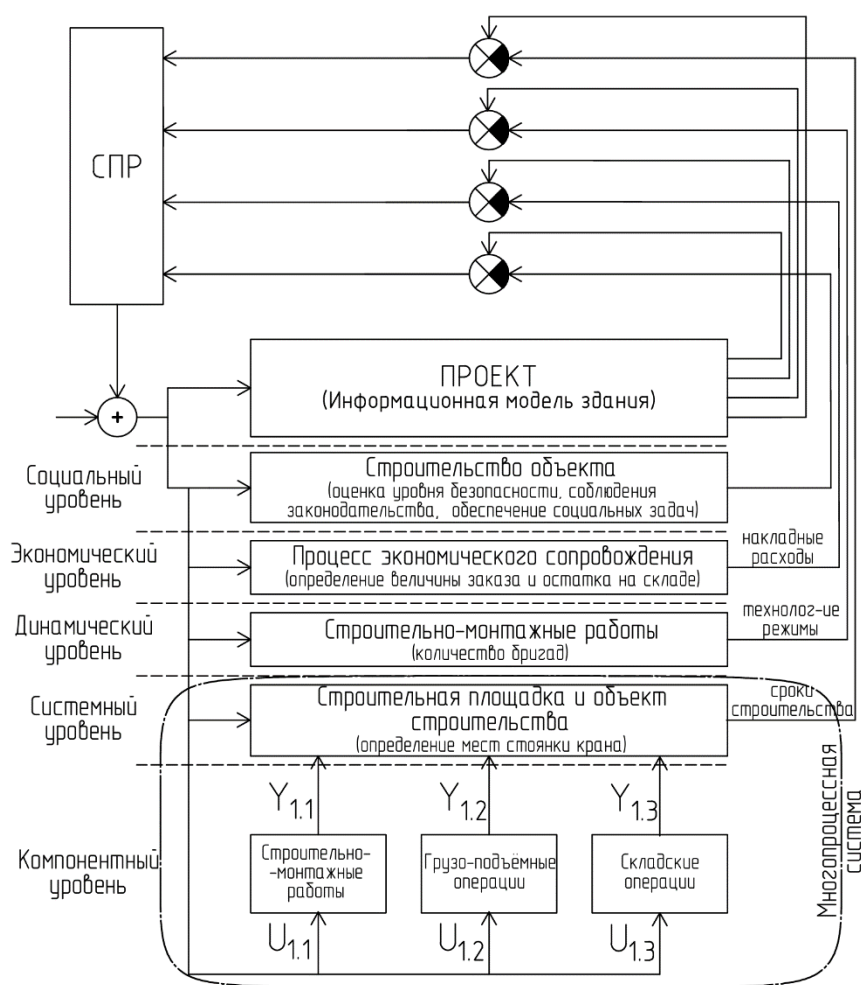


Рисунок 2 – Многоуровневое моделирование соединений процессов в многопроцессной системе.

На четвёртом уровне согласование процессов рационализируется, выбираются оптимальные решения. Самыми лучшими критериями при этом являются время и финансы. Целесообразно проводить такое согласование экономическими методами и инструментами (экономическое сопровождение).

На пятом уровне функционирование многопроцессной системы согласуется с социальными потребностями, выражаемыми рынком, актуальными тенденциями, модой и т.д. (социальный уровень), выбираются только социально приемлемые решения.

В качестве главного показателя, оценивающего соединение процессов в многопроцессной системе целесообразно принять эффективность. При этом под эффективностью понимается комплексный показатель, отражающий три аспекта: целерезультативность, ресурсозатратность, оперативность.

Такой подход может не учитывать некоторые важные практические аспекты, например, требуемый при достижении цели уровень безопасности, качества получаемого продукта и др. Количественно указанные недостатки можно формировать в виде ограничений, введением коэффициента «вето».

Анализ многоуровневой модели процедуры соединения процессов показывает ее сложность и многоаспектность. Эта процедура требует рассмотрения как организационного, так и технологического, экономического и даже социального аспектов.

Эффективность процедуры соединения процессов в многопроцессной системы

На самом нижнем уровне (компонентном) располагаются процессы-компоненты. Основной задачей на этом уровне является выбор таких процессов-компонентов, потенциал которых максимально согласуется с целью функционирования многопроцессной системы.

На втором (системном) уровне целью процессного согласования является организация необходимых взаимосвязей (структуры) между процессами-компонентами (статический синтез многопроцессной системы).

На третьем (динамическом) уровне функционирующие компоненты-процессы согласуются по объёму и скорости производства продуктов (по интенсивности потоков – динамический синтез).

(ЭПСП) - $K_{ЭПСП}$ предлагается определять по формуле:

$$\begin{cases} K_{ЭПСП} = \nu \cdot K_{\text{ц}}^{\alpha_1} \cdot K_{\text{р}}^{\alpha_2} \cdot K_{\text{о}}^{\alpha_3} \\ \nu = 0 \text{ при } K_{\text{б}} < K_{\text{б}}^{\text{lim}}, S_{\text{т}} \neq S_{\text{т}}^{\text{зад}} \\ \nu = 1 \text{ при } K_{\text{б}}, S_{\text{т}} \rightarrow \text{проект.} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $K_{\text{ц}}$, $K_{\text{р}}$, $K_{\text{о}}$ – коэффициенты, целерезультативности, ресурсозатратности и оперативности;

ν – коэффициент вето;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты; $K_{\text{б}}, K_{\text{б}}^{\text{lim}}$ – коэффициенты текущего уровня безопасности;

$S_{\text{т}}, S_{\text{т}}^{\text{зад}}$ – структура операционных взаимосвязей, заданная в используемой технологии.

Формула запрещает какие-либо изменения последовательности операций и проведении процесса в случае невыполнения требований техники безопасности.

Управление соединением процессов целесообразно разбить на два этапа (см. рисунок 3). На первом этапе необходимо создавать условия согласованного соединения процессов (повышать готовность процессов к соединению). На втором – целью управления становится контроль показателей процессов при их непосредственной реализации (соединении). На рисунке 3 представлены взаимосвязи процессов, отвечающих за подготовку к соединению и контроль реального соединения.

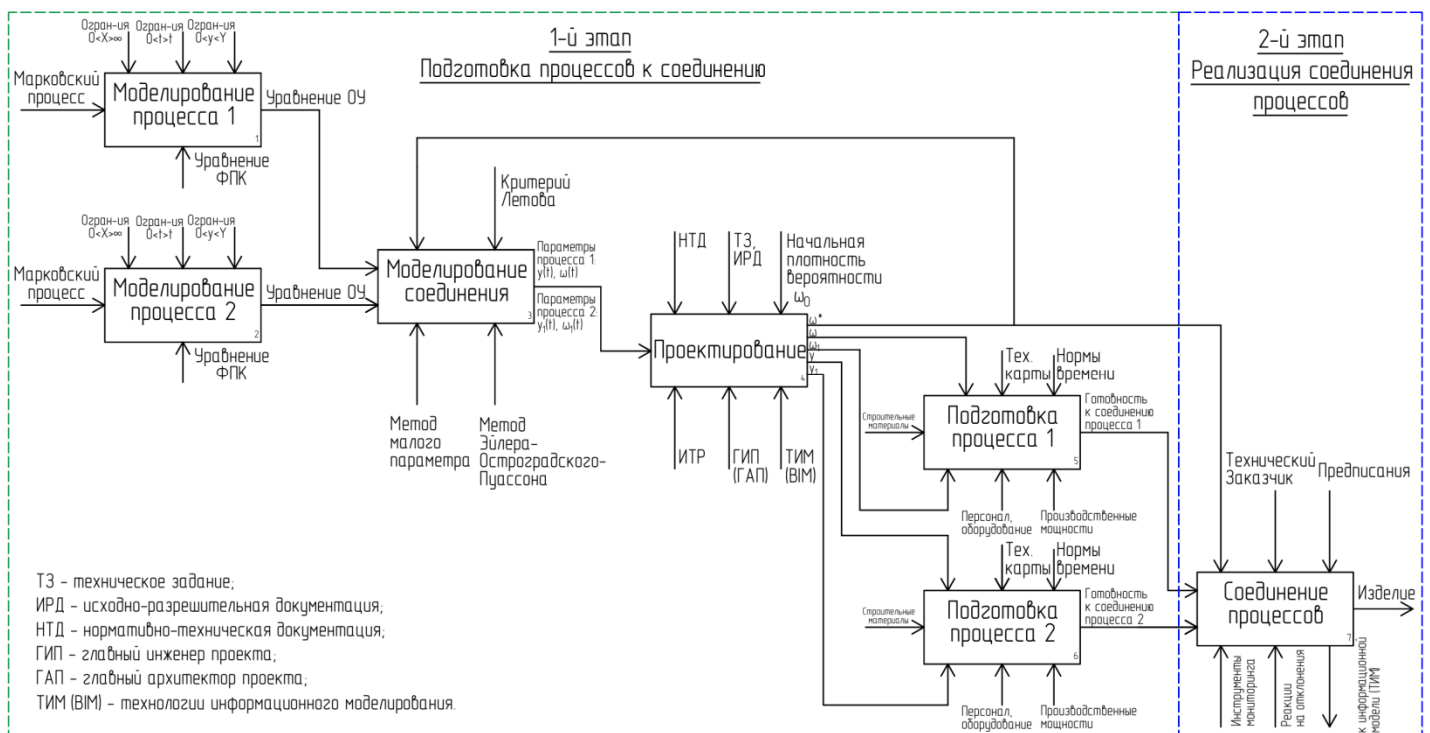


Рисунок 3 – IDEF0-диаграмма двухэтапного соединения процессов.

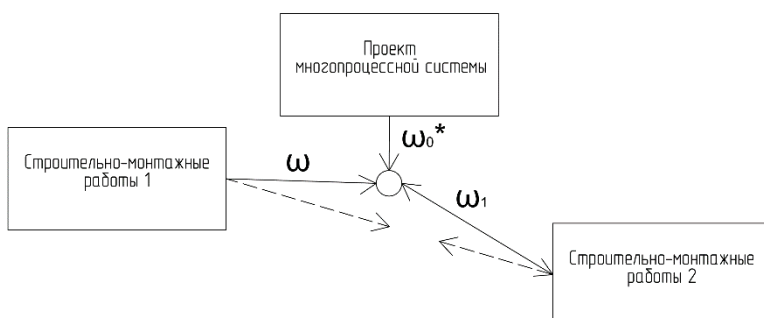


Рисунок 4 – Схемы вероятностного соединения процессов.

В работе ставится и решается задача соединения процессов, в которой управление первым процессом организуется, как в следящей (за поведением второго процесса) системе (см. рисунок 4). В то же время второй процесс готовится к встрече. При таком управлении поведение процессов

усложняет задачу.

Для математического описания задачи выбран аппарат теории вероятности и считается, что рассматриваемые процессы являются Марковскими.

Симметризация задачи осуществляется введением проектной плотности вероятности ω_0^* «успешного» соединения, обусловленной некоторым показателем, например, интенсивностью потока. К этой плотности вероятности должны стремиться плотность вероятности готовности к соединению первого процесса ω и второго процесса ω_1 .

Введенные величины зависят от переменной x (мощность процесса), изменяющейся во времени t . При заданных требованиях процессы должны подчиняться уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial \omega_0^*}{\partial t} = -a_0 \frac{\partial \omega_0^*}{\partial x} + \frac{b_0}{2} \frac{\partial^2 \omega_0^*}{\partial x^2} \quad (2)$$

где a_0 – коэффициент сноса, b_0 – коэффициент диффузии.

Уравнение (2) – параболическое и с помощью подстановки Тихонова-Самарского

$$\omega_0^* = e^{\mu x + \lambda t} \cdot \omega^*(x, t), \quad \mu = a_0/b_0 \quad \lambda = -a_0^2/2b_0 \quad (3)$$

приводится к каноническому виду

$$\frac{\partial \omega^*}{\partial t} = b^* \frac{\partial^2 \omega^*}{\partial x^2} \quad (4)$$

Далее будем использовать преобразованную вероятность, описываемую этим уравнением.

Похожему уравнению подчиняется и первый и второй соединяемые процессы, но коэффициенты сноса и диффузии будут другими. Тогда первый процесс в канонической форме описывается уравнением

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_1^* \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (5)$$

где ω – плотность вероятности того, что этот процесс достигнет заданного показателя x в заданный же момент времени t_f . Как видим из уравнения (5), возможно только мультипликативное параметрическое управление таким объектом и затруднено координатное. Вводя управляющее воздействие y преобразуем уравнение (5) к виду

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (6)$$

Аналогично выводится уравнение для второго процесса

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial t} = b_1 y_1 \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} \quad (7)$$

Задача оптимального управления в данном случае сведена к минимизации различия плотностей вероятностей, подчиняющихся уравнениям (6, 7) по отношению к проектной, точно также, как и управленческие затраты, направленные на приближение коэффициентов диффузии к задаваемому проектом.

Применим метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) профессора Летова А.М. В соответствии с ним в минимизируемый функционал включается критерий качества управления в виде суммы квадрата потерь от недостаточности управления, описываемый разностью плотностей вероятностей, введенных выше, и квадрата затрат на управление, снижающее эти потери.

$$F = \int_0^{t_f} \int_0^\infty (q(\omega^* - \omega)^2 + q(\omega^* - \omega_1)^2 + (b^* - by)^2 + (b^* - b_1 y_1)^2) dx dt \rightarrow \min \quad (8)$$

где q – постоянный коэффициент, t_f – время окончания управления.

Составим лагранжиан, в который входит как подинтегральная функция из (8), так и уравнения состояния объектов управления в виде уравнений ФПК с использованием двух коэффициентов Лагранжа ψ и ψ_1

$$L = q(\omega^* - \omega)^2 + q(\omega^* - \omega_1)^2 + (b^* - by)^2 + (b^* - b_1y_1)^2 + \psi \left(by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) + \psi_1 \left(b_1y_1 \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega_1}{\partial t} \right) \rightarrow \min \quad (9)$$

Уравнения Эйлера-Остроградского-Пуассона для оптимального управления будут следующими:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \omega} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} \right) - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega'_x} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega''_x} \right) = \\ -2q(\omega^* - \omega) + \dot{\psi} + by \frac{d^2 \psi}{dx^2} + 2b \frac{dy}{dx} \frac{d\psi}{dx} + b\psi \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \\ -2q(\omega^* - \omega_1) + \dot{\psi}_1 + b_1y_1 \frac{d^2 \psi_1}{dx^2} + 2b_1 \frac{dy_1}{dx} \frac{d\psi_1}{dx} + b_1\psi_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \psi} = by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0 \\ b_1y_1 \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega_1}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial y} = -2b(b^* - by) + b\psi \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \\ -2b_1(b^* - b_1y_1) + b_1\psi_1 \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Полученные нелинейные уравнения решены с помощью метода малого параметра. Решения второго приближения для переменных первого процесса имеют вид:

$$\begin{aligned} \psi'' &= C_1 \exp(Mt) \sin \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + \exp(3Mt) [A \sin \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \cos \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + \\ &B \sin^2 \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + D \cos^2 \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right)] + F \exp(Mt) \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + 2q\omega^* t \\ \omega'' &= C_2 \exp(Mt) \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + \exp(3Mt) [G \sin \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{sh}^2 \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + \\ &H \cos \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) + J \sin \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right) \operatorname{ch}^2 \left(\sqrt{\frac{M}{b^*}} x \right)] \end{aligned} \quad (11)$$

где C_1, C_2 – константа интегрирования, M – константа Фурье.

Аналогичный вид имеют решения для переменных второго процесса. Теперь управляющие воздействия можно определить по формулам:

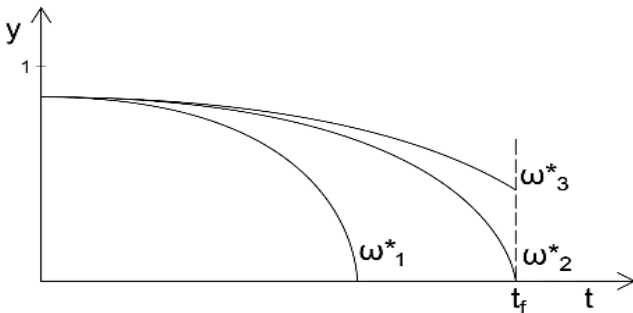
$$\left\{ \begin{array}{l} y = \frac{b^*}{b} - \frac{\psi}{2b} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ y_1 = \frac{b^*}{b_1} - \frac{\psi_1}{2b_1} \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad (12)$$

В формулу (11) входит величина ω^* , которая будучи подставленной в формулу (12) по мере роста уменьшает управляющие воздействия. Представление такой структуры в виде следующей формулы иллюстрирует этот момент:

$$y(t) = \frac{b^*}{b} - J(x)e^{\alpha t} - K(x)e^{\beta t} \omega^* t \quad (13)$$

Качественно это отражается графиками на рисунке 5.

В зависимости от величины ω^* оптимальное управление может заканчиваться досрочно, точно в срок или быть неоконченным. При увеличении ω^* уменьшается ее дисперсия в силу сохранения площади под ее графиком. Это означает возрастание определённости всех параметров протекания процесса и при высокой детерминированности площадь под



$\omega^*_1, \omega^*_2, \omega^*_3$ – прогнозные значения ω^*

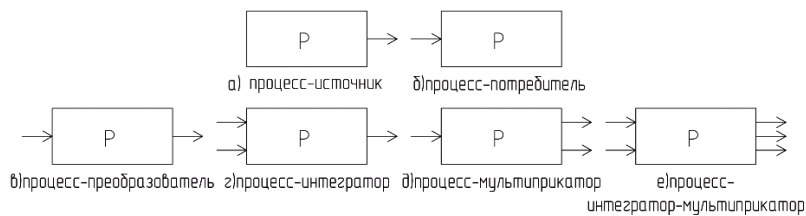
Рисунок 5 - Графики зависимостей величины управляющего воздействия от ω^* при $\omega^*_1 > \omega^*_2 > \omega^*_3$.

кривой управляющих воздействий будет стремиться к нулю, т.е. необходимость готовить процессы к соединению отпадает.

Таким образом, исследование задачи оптимального управления согласованием процессов по вероятностным критериям качества показывает важность проектной симметризации, позволяющей определить оптимальный расход ресурсов на управление готовностью процессов к соединению.

В третьей главе «Моделирование механизмов соединения процессов»

В производственных многопроцессных системах элементами являются технологические процессы, и они обычно достаточно отработаны, «узким местом» остается их согласованное соединение. Для детализированного системного анализа структуры многопроцессной системы необходимо разбить процессы на классы. Классификация зависит от признака, положенного в ее основу. Выберем в качестве такого признака отношение процессов к порождаемым потокам: перерабатываемого сырья, материалов, энергии, информации. Выявленные классы представлены на рисунке 6. В начале и в конце сложного процесса находятся процесс-источник и процесс-потребитель (схемы а, б). Подпроцессы находящиеся в середине сложного процесса



могут преобразовывать поток, принимая его от одного или многих предыдущих, либо передавая его одному или многим подпроцессам (схемы в, г, д, е).

Рисунок 6 -- Типовые элементы потоковых схем.

Соответственно параллельное, последовательное, встречно-

параллельное соединение подпроцессов будут образовывать структуру многопроцессной системы. Рассмотрим в качестве примера такой структуры и применения описанных обозначений строительное производство (см. рисунок 7).

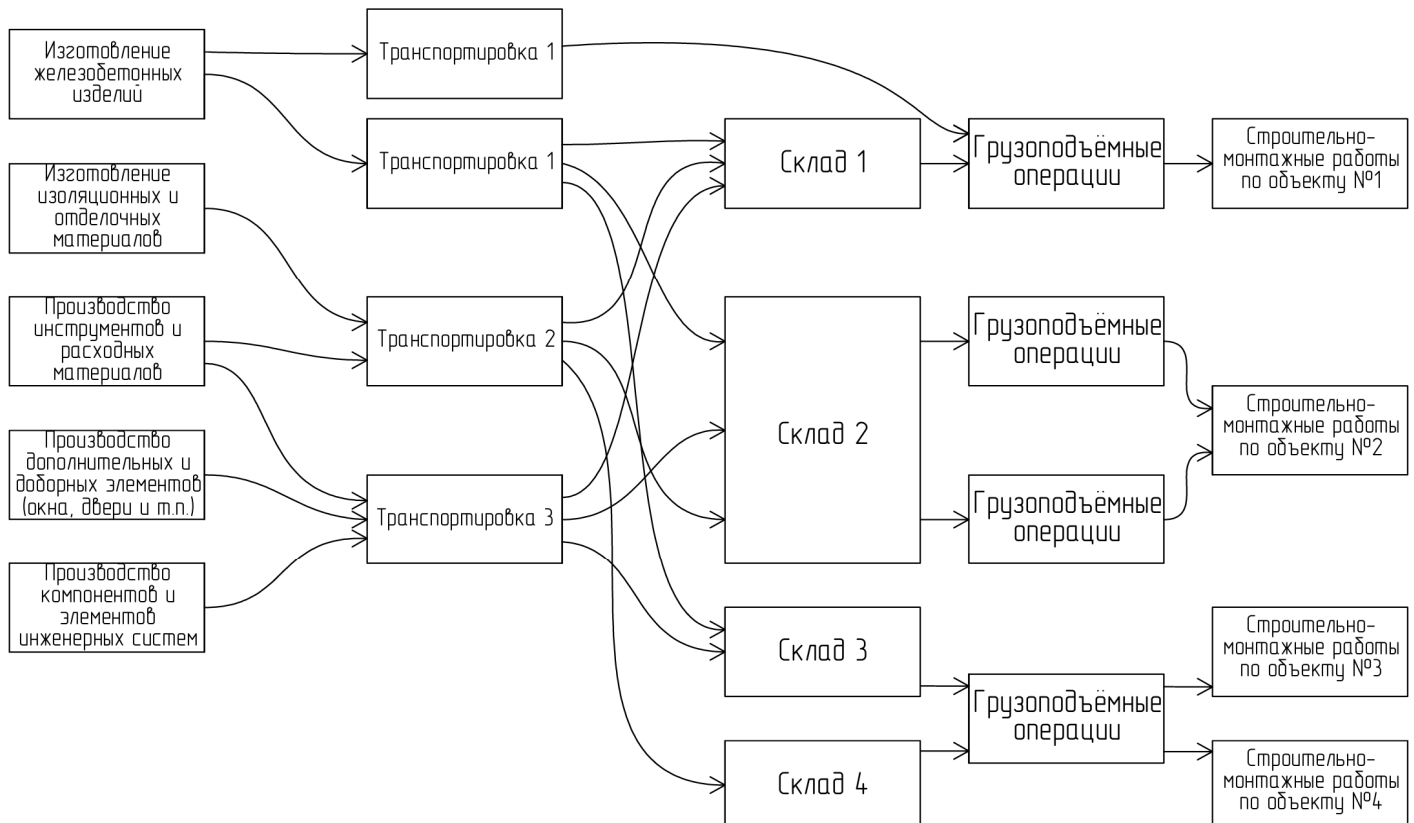


Рисунок 7 -- Структурная схема строительного производства.

В качестве процессов-источников, расположенных слева на рисунке, фигурируют

процессы подготовки строительных материалов и изготовления элементов строительных конструкций, а именно: железобетонных изделий, изоляционных и отделочных материалов, инструментов и расходных материалов, дополнительных и доборных элементов (окна, двери, ограждения и т.п.), элементов инженерных систем и коммуникаций. Целью представления этих процессов в качестве источников является стремление изготавливать ответственные элементы в заводских условиях. Соответственно возникает необходимость транспортировки этих элементов к месту проведения строительно-монтажных работ. Для этого в схеме предусматривается разветвленная сеть транспортных процессов-преобразователей, интеграторов, мультипликаторов и интеграторов/мультипликаторов. Окончательная транспортировка со складов к месту монтажа осуществляется с помощью грузоподъемных операций или даже прямая траспортировка крупноразмерных компонентов, в обход склада. В общем случае схема может включать случаи применения как одного крана с одним складом, крана и нескольких складов, нескольких кранов и одного склада, а также случай с несколькими кранами и складами.

Далее выявлено три конкретных механизма соединения процессов: соединение с помощью промежуточного процесса (рисунок 8), соединение с помощью процесса-передатчика (рисунок 9), а также сопряжение двух процессов (рисунок 10).

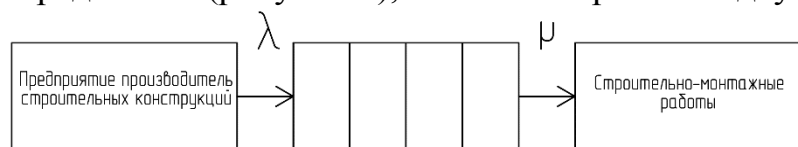
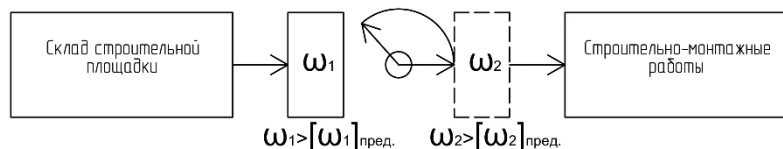


Рисунок 8 - Соединение двух процессов посредством промежуточного процесса.



ω_1 и ω_2 - плотности вероятности соединения процессов.

Рисунок 9 - Соединение процессов посредством передатчика.

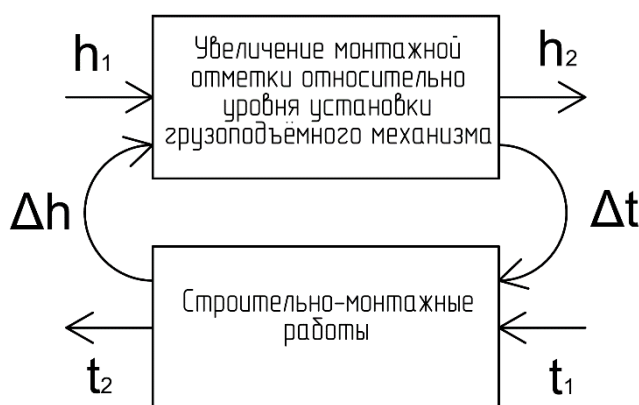


Рисунок 10 – Соединение процессов путем сопряжения.

Первый механизм применяется в случае различия интенсивностей появления продукции на выходе одного процесса и приема на входе второго. Второй механизм соединения позволяет преодолеть разность координат выхода первого процесса и входа второго. Наконец, третий механизм устраняет различие в развитии одного процесса и производительности другого процесса.

В результате выделено семь

механизмов соединения процессов:

- последовательное соединение с введением промежуточного процесса;
- последовательное соединение дискретных процессов с помощью механизма передатчика;
- параллельное соединение непрерывных процессов с механизмом интеграции;
- параллельное соединение дискретных процессов с механизмом передачи и интеграции;
- параллельное соединение непрерывных процессов с механизмом дифференциации;
- параллельное соединение дискретных

процессов с механизмом передачи и дифференциации;

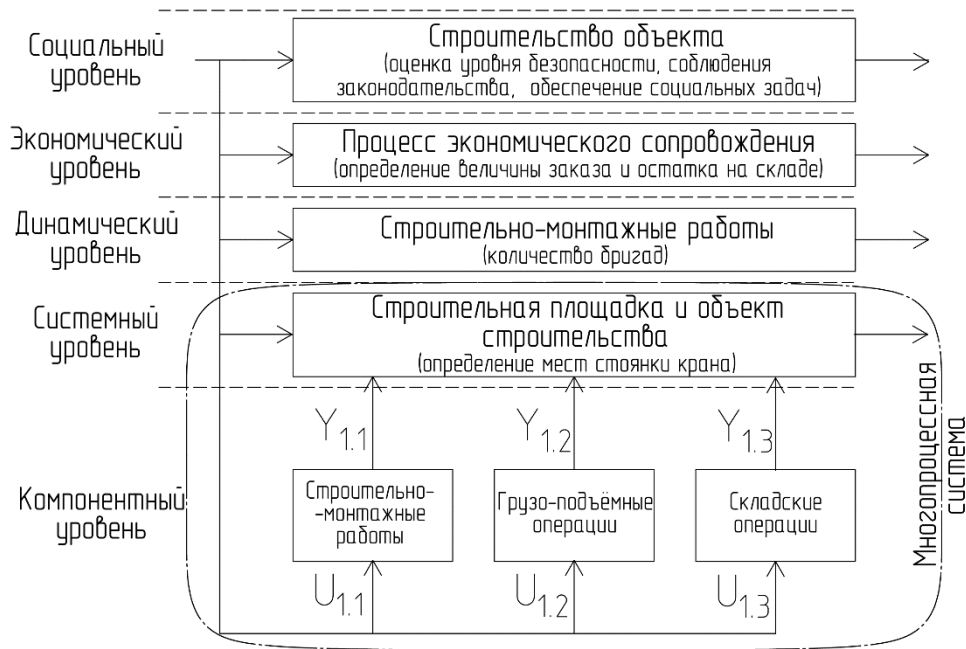
- соединение процессов путем сопряжения.

Кроме того, к выделенным классам соединений можно добавить различные

комбинации таких механизмов.

В четвертой главе «Разработка методики повышения эффективности строительных процессов» рассмотрены вопросы применения полученных теоретических результатов в строительном производстве.

На основе обобщенной модели разработана пятиуровневая модель процедуры соединения основных процессов при панельном домостроении (см. рисунок 11).



Компонентный уровень в этой схеме представлен всеми процессами, выполняемыми на строительной площадке: транспортировки, устройства фундамента, складскими операциями, грузоподъемными операциями, строительно-монтажными работами, гидроизоляционными работами, отделочными работами и т.д. Все работы сопровождаются действиями персонала. В качестве основных процессов,

Рисунок 11 - Многоуровневая модель организации строительной площадки.

представляющих все уровни в пятиуровневой модели, выберем складские операции, грузоподъемные операции, строительно-монтажные работы.

На системном уровне в качестве примера реализации пространственного соединения процессов складирования и строительно-монтажных работ становится определение оптимального места стоянки крана.

На динамическом уровне примером реализации динамического соединения является сопряжение процессов увеличения монтажной отметки здания и изменения количества звеньев монтажной бригады.

На уровне экономического сопровождения рассматривается соединение процесса заказа и расхода панелей.

На социальном уровне рассматривается процедура соединения производственных процессов, выполняемых персоналом, и процессов, обеспечивающих безопасность. На социальном уровне также отсекаются социально неприемлемые решения.

Системный уровень представлен соединением процессов *посредством передатчика* (см. рисунок 9) на примере работы грузоподъемного крана. Модельное представление

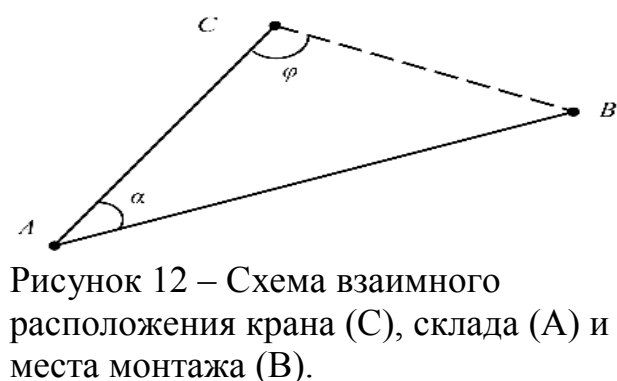


Рисунок 12 – Схема взаимного расположения крана (C), склада (A) и места монтажа (B).

крана включает два движения: поворот стрелы и окончательное доведение груза с помощью перемещения крановой тележки вдоль стрелы. Исследуем взаиморасположение крана, склада и места монтажа, представленное на рисунке 12, не учитывая вертикальное перемещение груза, т.к. это не влияет на выбор места стоянки крана.

Кран, расположенный в точке С, перемещает груз со склада (точка А) к месту монтажа (точка В). При этом ни АС ни ВС не могут быть больше, чем вылет стрелы крана.

При этих условиях можно сформулировать следующий минимизируемый критерий, а также ограничение на переменные:

$$t = \min_{\alpha, AC} \left\{ \frac{\varphi}{\omega} + \frac{|BC-AC|}{V} \right\}; \quad (14)$$

$$0 \leq \alpha \leq \arccos\left(\frac{AB}{2L}\right); AB - L \leq AC \leq L$$

Здесь ω – угловая скорость поворота стрелы крана, V – скорость движения крановой тележки, φ – угол поворота стрелы крана, α – угол между АС и АВ.

Первое слагаемое в формуле (14) отражает время поворота стрелы, второе – время движения тележки. Причем в последнем случае направление движения тележки не важно, поэтому в числителе второго слагаемого взята абсолютная величина расстояния, проходимого тележкой.

Дальнейшее моделирование проводилось с помощью компьютерной программы с целью выявления зависимостей минимального времени перемещения груза от расстояния между складом и местом монтажа (АВ), а также технических характеристик крана.

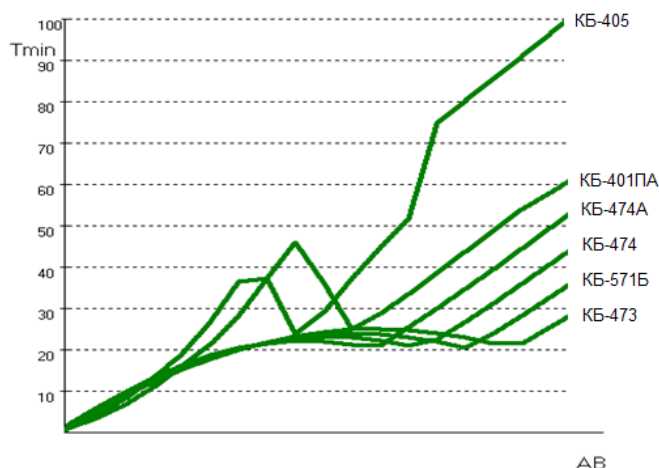


Рисунок 13 – Пошаговые зависимости минимального времени от расстояния между складом и местом монтажа для разных моделей кранов.

Результаты представляются графиками на рисунке 13.

Анализ зависимостей позволяет сделать вывод, что в самом оперативном варианте движение крановой тележки должно быть сведено к минимуму, т.е. перемещение груза рационально осуществлять только поворотом стрелы крана.

Динамический уровень представлен соединением сопряженных процессов (см. рисунок 10) на примере монтажа панельного здания. При монтаже здания из «осредненных» панелей коэффициент загрузки крана можно определить по формуле:

$$k_{\text{загр}} = \frac{\sum_1^N P t_{\text{зан}}^n}{t_{\text{общ}}} \rightarrow \max \quad (15),$$

где $t_{\text{зан}}^n$ – время занятости крана на подаче одной панели для монтажа на n -ый этаж; $t_{\text{общ}}$ – общее рабочее время; n – порядковый номер монтируемого этажа (выходная величина первого процесса); N – количество этажей в монтируемом здании; P – количество «осредненных» панелей необходимых для монтажа одного этажа. Под «осреднённой» панелью мы понимаем панели со средним временем монтажа по их типоразмерам.

Как видно из формулы (15) для увеличения коэффициента загрузки достаточно максимизировать его числитель за счет увеличения времени занятости крана. Время занятости крана на подаче одной панели для монтажа на n -ый этаж определяется суммой следующих слагаемых:

$$t_{\text{зан}}^n = t_{\text{гор}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{верт}}(n - 1) + t_{\text{уд}} \quad (16),$$

где $t_{\text{гор}}$ – среднее время перемещения панели по горизонтали от места складирования до места монтажа (строповка, перемещение, удержание на время монтажа, расстроповка,

возврат крана); $t_{\text{верт}}$ – время перемещения панели по вертикали в пределах одного этажа; $t_{\text{тр}}$ – время торможения и разгона; $t_{\text{уд}}$ – время занятости крана на монтаж и расстроповку панели.

Количество звеньев K в бригаде, на каждом этаже, монтирующих P панелей определяется из условия минимума затрат в двух случаях: ожидания звеном момента освобождения крана или простоя крана, ожидающего конца монтажа.

$$K = \arg \left\{ \min_{n \in N} \left[C_1 P (K t_{\text{зан}}^n - t_{\text{норм}}); C_2 \frac{P}{K-1} (t_{\text{норм}} - (K-1) t_{\text{зан}}^n) \right] \right\}; K \geq 1 \quad (17),$$

где C_1 – стоимость единицы времени ожидания крана для звена; C_2 – стоимость единицы времени простоя крана; $t_{\text{норм}}$ – нормативное время монтажа одной панели одним звеном.

Поставленная задача относится к классу задач целочисленного программирования (ЦП). Результаты решения представляются графиками на рисунке 14.

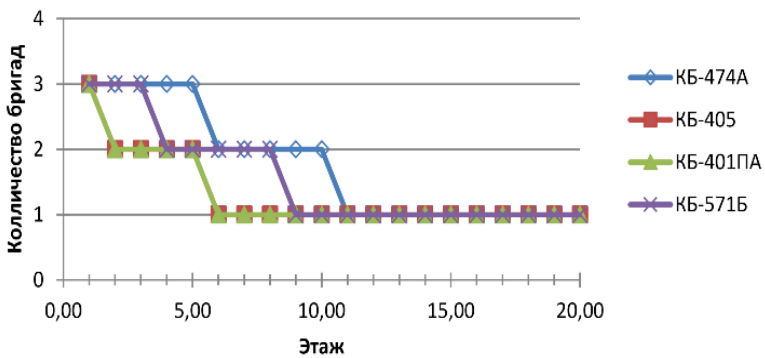


Рисунок 14 – Зависимость количества звеньев в бригаде от этажности здания для разных моделей крана при монтаже основных

Изменение скорости монтажа (скорость расходования панелей), определенное выше при расчете предыдущего механизма соединения процессов (рисунок 15), аппроксимируем экспонентой:

$$R(t) = A \exp(-\lambda t), \quad -\frac{dR}{dt} = \lambda A e^{-\lambda t}, \quad (19)$$

где A, λ – константы аппроксимации.

Управлять складом можно двумя параметрами Q и S . При этом и увеличение запаса (остаток на складе Q), и объема заказа (S) ведет к снижению экономической эффективности, а, следовательно, необходимо минимизировать каждый из них. Воспользовавшись методом аналитического конструирования регуляторов профессора А.М. Летова, выберем следующий функционал оптимального управления в этой задаче:

$$\int (Q^2 + \alpha S^2) dt \rightarrow \min \quad (20)$$

где α – размерный коэффициент, изменяющий относительное влияние объема заказа.

Используя уравнение объекта (19) и функционал (20), можно составить классический Лагранжиан:

$$L = Q^2 + \alpha S^2 + \psi \left(\frac{dQ}{dt} - S + R \right) \rightarrow \min \quad (21)$$

где ψ – множитель Лагранжа.

Полученные результаты решения уравнений Эйлера представляются

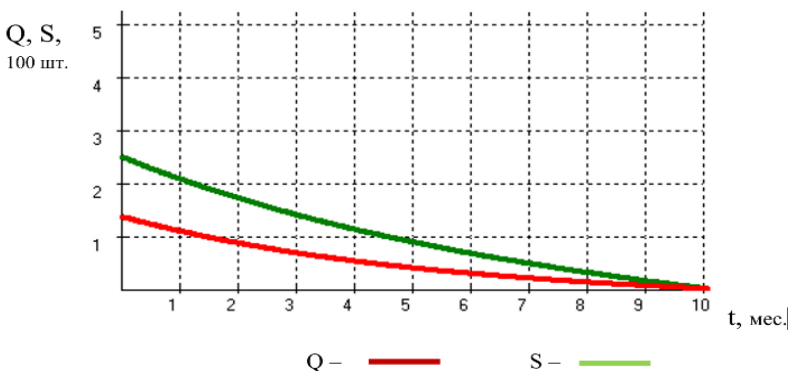


Рисунок 15 – Графики изменения запаса на складе и объема заказа при изменениях коэффициентов A, ψ, α .

графиками на рисунке 15.

Таким образом, применение на практике, выявленных теоретических положений относительно соединений процессов методами сопряжения, промежуточного процесса и передатчика доказало их состоятельность и позволило повысить эффективность указанных процедур в отношении оперативности и ресурсозатратности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана многоуровневая модель соединения процессов, позволяющая оценивать и оптимизировать это соединение с точки зрения пяти аспектов: компонентного, системного, процессного, экономического и социального. Такой подход детализирует анализ процедуры соединения и позволяет контролировать вклады каждого уровня.

2. Структура процедуры соединения процессов должна быть двухэтапной. На первом этапе оптимизируется готовность процессов к соединению, а на втором контролируются и корректируются параметры реального соединения.

3. Марковская модель оценки и управления готовностью, совместно с проектной симметризацией, позволяют поставить задачу оптимального управления готовностью на первом этапе. В результате её решения выявлено, что увеличение проектной плотности вероятности уменьшает управленческие затраты на повышение готовности процессов. Это означает, что чем выше предварительная упорядоченность условий соединения, тем ниже будут затраты на подготовку процессов к соединению.

4. Проведена классификация механизмов соединения процессов в зависимости от параллельной, последовательной или встречно-параллельной схем, дискретности или непрерывности, а также от наличия несогласованности в производительности. Показано, что инструментами соединения могут быть: промежуточный процесс, процесс-передатчик или процесс сопряжения.

5. Полученное оптимальное решение в механизме соединения сопряженных процессов в совокупности с выявленным графиком заказов панелей показывает теоретическую оценку экономии времени на монтаж при строительстве 20-ти этажного панельного здания с применением крана КБ 474-А до 31%.

6. Решение задачи по выбору места установки крана и минимизации времени перемещения грузов показывает выгодность: использования крана с большим вылетом стрелы, симметрично расположенного относительно склада и места монтажа. В совокупности может быть достигнута экономия общего времени занятости при строительстве 20-ти этажного панельного здания применяемого крана КБ 474-А до 5%.

7. Разработанные модели и методики прежде всего направлены на экономию времени и управленческих ресурсов при соединении процессов, что способствует повышению эффективности при реализации этой процедуры и одновременно достижению цели диссертационного исследования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК

1. Кулешов, И. В. Оптимизация количества звеньев в строительной бригаде при панельном домостроении [Электронный ресурс] / Кулешов И. В., Пищухин А. М. // Фундаментальные исследования, 2017. - № 11-1. - С. 87-91. - 5 с.

2. Кулешов, И. В. Согласование процессов по вероятностным критериям качества с проектной симметризацией [Электронный ресурс] / И. В. Кулешов, Г. Ф. Ахмедьянова, А. М. Пищухин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2024. - Т. 12, № 1 (44). - С. 33. - 10 с.

3. Кулешов, И.В. Проектирование многопроцессных систем / Кулешов И. В., Пищухин А. М. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2024. №9 2024г. – С. 44-47. - 4 с.

4. Кулешов, И.В. Информационно-алгоритмическое обеспечение многопроцессной системы / Кулешов И. В., Трохов А.А., Пищухин А. М. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2024. №10 2024г. – С. 58-61. - 4 с.

Публикации в международных изданиях, индексируемых в МБЦ

1. Kuleshov, I. V. Optimum order management of building structures in panel building [Электронный ресурс] / Kuleshov I. V., Pishchukhin A. M. // Materials Science Forum : International Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice of Industry Development, CATPID 2018, 2018. - Vol. 931. - P. 1255-1260. . - 6 с.

2. Kuleshov, I. Optimal organization of lifting operations at the construction site [Электронный ресурс] / I. Kuleshov, A. Pishchukhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. - Vol. 698: Proceedings of the International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, 1-5 October 2019, Kislovodsk, Russian Federation. - Electronic data. - P. 1-7. . - 7 с.

3. Kuleshov, I. V. The Parameter's Study of the Optimal Location of the Tower Crane Parking Place / Kuleshov I. V., Pishchukhin A. M. // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)

4. Kuleshov, I. V. Assessment and quality management of construction and installation works // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 913(4), 042029

Публикации в других изданиях

1. Пищухин, А. М. Постановка задачи оптимизации грузоподъемных операций в строительстве / Пищухин А. М., Кулешов И. В. // Строительная наука - XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону : сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-лет. со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В. А. Лебедева, В. А., Трулля, Е. И. Светозаровой, 28-30 июня 2016 г., Архангельск / Федер. гос. авт. образоват. учреждение высш. образования "Северный (Арктический) Федер. ун-т" [и др.]; под ред. Б. В. Лабудина. - Архангельск: Агентство рекламы РАД, 2016. - . - С. 232-237. . - 6 с.

2. Кулешов И. В. Анализ задач информационного моделирования в строительстве / Мохнаткин Р.В. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры, Оренбург, 26–27 января 2022 года, Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский гос. ун-т". - Электрон. дан. - Оренбург : ОГУ, 2022. - . - С. 2608-2613. . - 15 с.

Регистрация программных средств

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668489 / Программа расширения В1М-технологии // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2021 г

КУЛЕШОВ Игорь Валерьевич

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «17» сентября 2025 г.
Формат 60×90/16. Объем – 1,0 усл. печ. л
Тираж 100 экз. Заказ № 128369
Отпечатано на ризографе в типографии «Цифра»
460018, г. Оренбург, пр. Победы 11, офис 1