

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 005.8:615.478

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЯХ ГАЗО-, ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ*

Д.С. Будаев, В.Б. Ларюхин, Д.С. Косов, Е.В. Симонова

ООО «НПК «Разумные решения»

443013, г. Самара, ул. Московское шоссе, 17, оф. 1201

E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

Описываются принципы и тенденции развития концепции интеллектуальных сетей энергетических ресурсов Smart Grid. В качестве решения задач указанной проблематики предлагается создание интеллектуальной сетевцентрической клиентоориентированной системы газо-, тепло- и электроснабжения, прототипом которой является система имитационного моделирования и адаптивного распределения ресурсов в интегрированных сетях ресурсного снабжения.

Ключевые слова: *Smart Grid, мультиагентные технологии, сетевцентризм, интегрированные сети ресурсного снабжения.*

Введение

Идеология построения интеллектуальных сетей энергообеспечения, называемых Smart Grid (SG) [1] (термин введен Майклом Барром (Michael T. Burr) в 2003 году [2]), является в настоящий момент одним из наиболее существенных и развиваемых направлений модернизации глобальной энергетики. Предпосылки интереса мирового сообщества к идее развития концепции SG очевидны: растут показатели потребления ресурсов, повышается стоимость производства электроэнергии, увеличение количества и мощности площадок производства ресурсов негативно влияет на состояние окружающей среды, существующие сети поставки энергоресурсов резко реагируют на колебания в экономической сфере.

С ростом требований мирового сообщества используемые модели производства и поставки энергетических ресурсов перестают быть удовлетворительными; например, текущий объем потерь электроэнергии в сетях Российской Федерации составля-

* Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ, поддержавшему разработки по созданию интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени по государственному контракту Минобрнауки РФ № 14.514.11.4093.

Денис Сергеевич Будаев, ведущий разработчик.

Владимир Борисович Ларюхин, директор по разработкам.

Даниил Сергеевич Косов, аналитик.

Елена Витальевна Симонова (к.т.н.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета, ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения».

ет более 10 % [3, 4]. Эти и другие причины подталкивают правительства и бизнес-круги различных стран к скорейшей реализации принципов концепции SG.

Стоит отметить, что трактовка термина Smart Grid геоэкономически независима [5-8]. Однако в целом к сетям энергоснабжения, развиваемым в рамках концепции SG, можно выдвинуть следующие требования: адаптивность, эффективность, доступность и возможность обратной связи, надежность, информационная обеспеченность, использование интеллектуальных счетчиков, динамическая тарификация (Demand Response), усложнение и интеграция функций SG, развитие микросетей, объединение идей SG и «умного дома», альтернативные источники энергии [9, 10].

В настоящий момент наиболее остро стоит проблема развития сетей электроснабжения. Правительство РФ в целях экономии энергоресурсов, в частности, проводит в ряде областей России эксперимент по установке норм потребления электроэнергии [11]. Однако не менее актуальной является задача интеграции сетей газо-, тепло- и электроснабжения (ресурсного снабжения) для повышения эффективности использования энергоресурсов и снижения цен для потребителей. Совмещение концепций SG и интеграции сетей ресурсного снабжения позволит сделать их более гибкими, надежными и устойчивыми за счет возможности компенсации одних ресурсов другими.

В данной работе рассматривается система имитационного моделирования и адаптивного распределения ресурсов в интегрированных сетях газо-, тепло- и электроснабжения с использованием принципов сетецентризма и мультиагентных технологий [12].

Мультиагентный подход к разработке интеллектуальной сетецентрической клиентоориентированной системы ресурсного снабжения

В рамках развития концепций SG и интеграции сетей ресурсного снабжения необходимо разработать интеллектуальную сетецентрическую клиентоориентированную систему (ИСКС) газо-, тепло- и электроснабжения, которая позволила бы обеспечить следующие функции:

- полноценный мониторинг сетей электроснабжения;
- эффективное распределение ресурсов в системе электроснабжения;
- соответствие производимого числа ресурсов потребляемому;
- быструю адаптацию сетей к происходящим событиям;
- возможность прогнозирования и работы с планом управления сетями на длительный горизонт.

Данная система должна учитывать тенденции развития SG, быть рассчитанной на работу с современными элементами сетей (в том числе интеллектуальными счетчиками и т. п.) и предусматривать интеграцию с существующими информационными системами.

Для построения подобных систем предпочтительно использование мультиагентных технологий, которые позволят внести элементы самоорганизации на основе принципов конкуренции и кооперации в работу рассматриваемых сетей для оперативной, гибкой и эффективной реакции на изменение потребностей в электроэнергии или предоставляемых сетями ресурсах.

Однако сложность подобного рода систем не позволит создать одну масштабируемую систему, пригодную для использования на всех уровнях: от отдельной квартиры в доме – до целого региона.

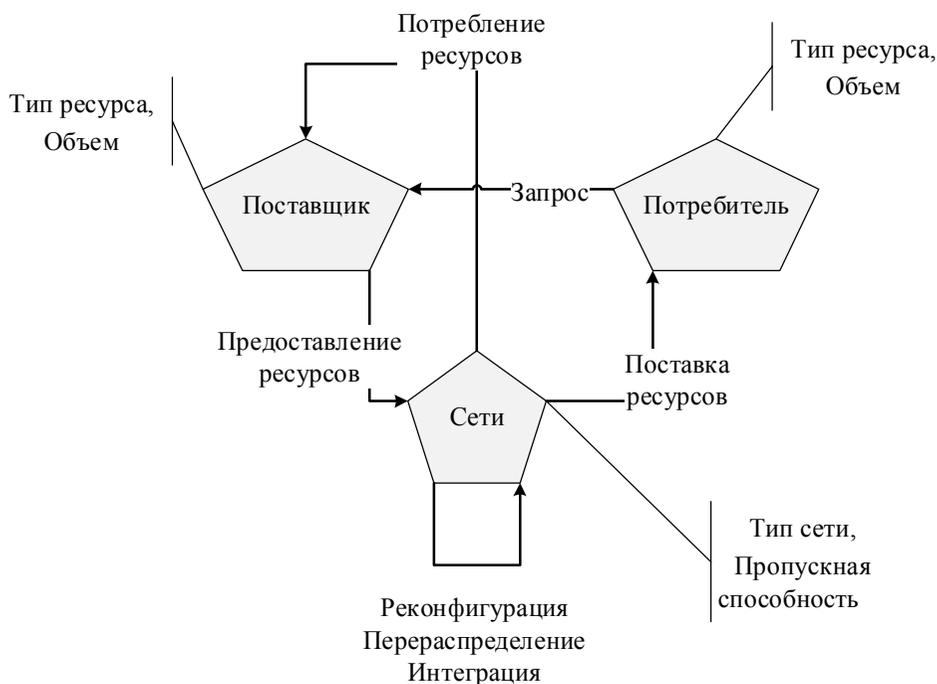
В этой связи в настоящем проекте предлагается изначально создавать такую систему, как сетецентрическая («система систем»), построенная как адаптивная р2р-

сеть планировщиков отдельных ресурсов, причем с рекурсивной вложенностью для развертывания на любом уровне («матрешечная архитектура»).

Сетецентрический подход в разработке ИСКС позволит обеспечить эффективное распределение ресурсов в сетях энергоснабжения и повысить общий уровень удовлетворения запросов потребителей, а также обеспечит адекватность производственных затрат уровню потребления за счет согласованного построения планов производства и поставки ресурсов с учетом всех параметров потребителей и поставщиков. Более подробно принципы и преимущества сетецентрического подхода и мультиагентных технологий описаны в [12]. При разработке ИСКС сети ресурсного снабжения моделируются как динамическая сеть агентов потребностей и возможностей, которые договариваются между собой, достигая баланса интересов (консенсуса). Важным достоинством мультиагентных технологий является их ориентация на работу в режиме реального времени [13].

Онтология для описания сетей ресурсного снабжения

Для описания базовых понятий предметной области и связей между ними разработана онтология. Онтология позволяет описывать объекты и процессы, законы поставки, формирования спроса и производства ресурсов, учитывая структуру сетей, а также детализировать и накапливать информацию о конкретных объектах сетей. На рис. 1 показан верхний уровень онтологии управления сетями ресурсного снабжения, который включает три базовых концепта, соответствующих объектам потребления, производства и распределения ресурсов («Потребитель», «Поставщик» и «Сеть» соответственно). Принципы проектирования и использования онтологии в информационных системах описаны в [14].



Р и с. 1. Верхний уровень онтологии управления сетями ресурсного снабжения

На основе использования простейших базовых онтологических сущностей в совокупности с практически неограниченными возможностями онтологии к расширению [14] создан конструктор топологии сетей, позволяющий учесть все их необходимые параметры.

Архитектура ИСКС

ИСКС реализована в виде следующих программных модулей:

- мультиагентная платформа, включающая подсистему передачи сообщений, диспетчер агентов, подсистему формирования и доступа к сцене (модели конкретной ситуации), инспектор агентов, журнал переговоров агентов;
- модуль задания начальной конфигурации сети;
- модуль интеграции;
- модуль адаптивного планирования заказов и ресурсов;
- модуль построения отчетов;
- модуль разграничения прав доступа.

Укрупненная архитектура системы, включающая основные модули и компоненты, представлена на рис. 2.



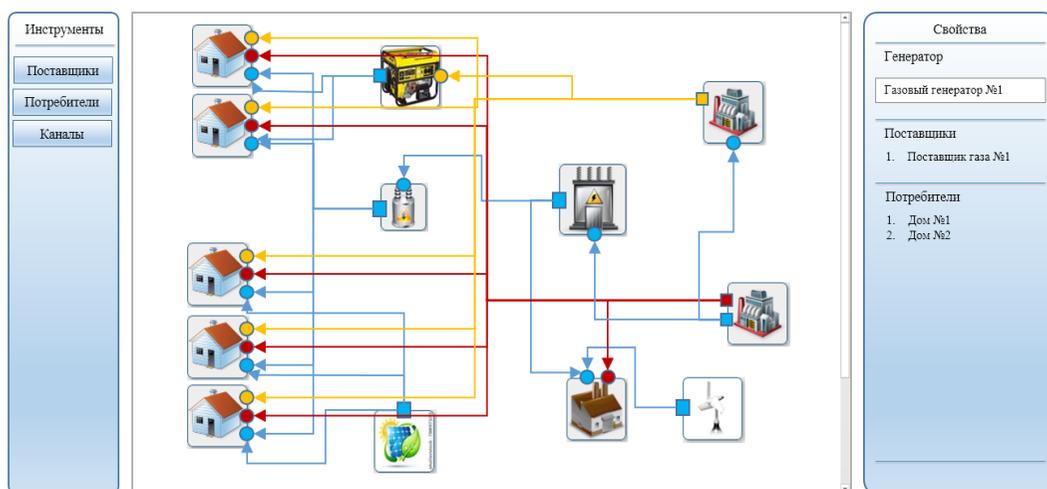
Р и с. 2. Архитектура ИСКС

Первоначально администратор сети задает общую конфигурацию сетей ресурсного снабжения через автоматизированное рабочее место (АРМ). Данная конфигурация загружается в мультиагентную платформу, где при помощи диспетчера агентов каждому объекту сетей сопоставляется программный агент, представляющий

интересы этого объекта. С использованием модуля интеграции осуществляется сбор реальных данных с оборудования сетей ресурсного снабжения, а также из существующих информационных систем, выполняющих сетевой мониторинг.

Потребители и поставщики через соответствующие АРМы указывают свои параметры потребления и производства ресурсов. После этого при помощи модуля передачи сообщений агенты, представляющие объекты сети, начинают переговоры, которые путем торгов и уступок завершаются достижением консенсуса – решения, устраивающего все стороны. Если такое решение невозможно, программные агенты вырабатывают рекомендации потребителям об изменении объемов спроса или предложения поставщикам, которые отправляются пользователям системы через АРМы. В такой диалоговой форме общение системы с пользователем продолжается до тех пор, пока не будут сгенерированы предложения, устраивающие всех «игроков». В ходе работы с системой ее пользователи могут получать доступ к различным статистическим данным. Доступ пользователя к функциям системы и данным определяется модулем разграничения прав доступа.

Пользователям ИСКС предоставляется удаленный доступ к системе с любого устройства, обладающего связью с Интернет и допускающего использование браузера (ПК, ноутбуки, планшеты, мобильные телефоны). Для этого разработан пользовательский интерфейс ИСКС на языке HTML 5 с ориентацией на web- и облачные технологии. На рис. 3 представлено окно конструктора сетей ресурсного снабжения, доступного администратору сети через соответствующий АРМ.



Р и с. 3. Окно конструктора сетей ресурсного снабжения

Основные функции ИСКС

Интеллектуальная сетевая клиентоориентированная система газо-, тепло- и электроснабжения должна выполнять следующие функции.

Создание конфигурации сетей. Система должна обеспечивать возможность полноценного описания архитектуры действующих сетей ресурсного снабжения. Каждый элемент этих сетей должен описываться достаточным и достоверным набором характеристик.

Формирование спроса. Система должна позволять потребителям выстраивать индивидуальный план потребления ресурсов на длительный горизонт. При этом, учитывая тенденцию интеграции концепций SG и «умного дома», система должна

быть ориентирована на детализированное формирование спроса по каждому объекту потребления.

Адаптивное планирование в реальном времени. Исходя из агрегированных данных спроса и прогноза потребления поставщики ресурсов должны планировать свои графики предоставления ресурсов, что позволит выровнять нагрузку сети и избежать пиков.

Управление топологией и интеграция сетей. Система должна объединить существующие программные и аппаратные механизмы мониторинга и управления сетями ресурсного снабжения. Интеграция должна включать сбор телеметрии и управление топологией сетей, в том числе с целью замещения ресурсов.

Прогнозирование. Интеграция с системами сбора данных с интеллектуальных счетчиков должна позволить строить прогнозы на основе сохраняемой истории и внешних факторов.

Интерактивность, выработка предложений. Система должна работать в режиме диалога и двусторонней связи с пользователем. Существующие графики фактического потребления или поставки должны корректироваться пользователем «на лету», отражая его потребности. Если запрос пользователя невозможно или крайне трудно обработать, система должна формировать предложение, помогающее пользователю принять решение.

Аналитика. Система должна производить анализ агрегируемых данных, предоставляя статистические отчеты, а также вырабатывая заключения и рекомендации по наиболее эффективному использованию ресурсов.

Разграничение прав доступа, роли. Система должна предоставлять доступ трем типам пользователей – потребитель, поставщик, администратор сети. Каждый из этих пользователей должен иметь возможность описывать характеристики подотчетных ему объектов и строить планы потребления, производства и поставки ресурсов. Здесь администратор сети – пользователь, осуществляющий мониторинг и управление интегрированными сетями газо-, тепло- и электроснабжения.

Масштабирование. Благодаря использованию сетевцентрической архитектуры и возможности масштабирования онтологии система должна быть пригодной для использования как в рамках всех трех интегрированных типов сетей, так и в рамках одного не крупного объекта – фабрики, многоквартирного или даже частного дома.

Пример работы метода адаптивного планирования в ИСКС

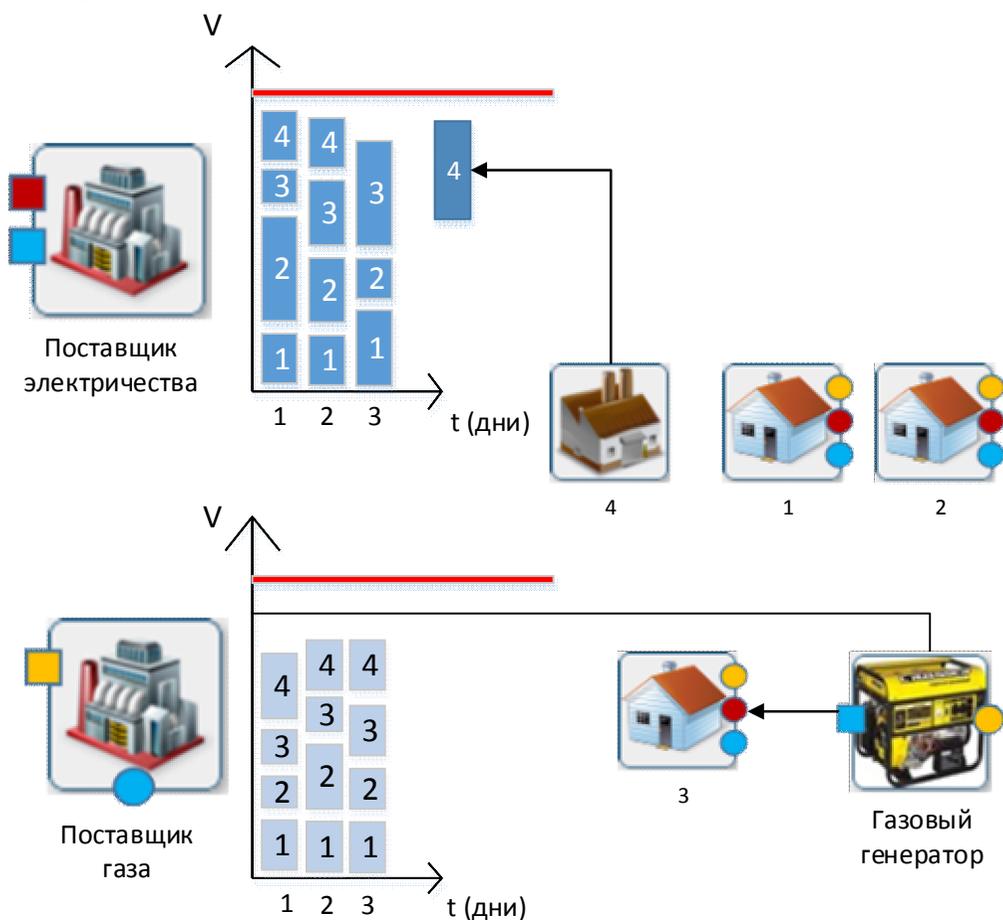
На рис. 4 продемонстрированы графики производства ресурсов поставщиками электричества (ПЭ) и газа (ПГ).

На каждом из графиков отмечен максимальный уровень производства ресурса, а также объемы их потребления различными объектами сети в каждый из дней. Рассмотрим событие, когда фабрика (потребитель № 4) выдвигает заявку на потребление в третий день. При стартовых условиях удовлетворение заявки фабрики невозможно из-за ограничений в объемах производства, тем не менее необходимо удовлетворение спроса всех объектов потребления. Рассмотрим переговоры агентов для решения этой задачи.

В начальной ситуации пробуждаются (создаются) агенты ПЭ и фабрики – потребитель № 4 (П № 4). Агент фабрики запрашивает производство определенного объема ресурса в третий день. Получив запрос на размещение в графике, агент ПЭ производит анализ графика. Процесс анализа расписания заключается в поиске мест размещения, которые удовлетворяют интересам и поставщика, и фабрики. По итогу

анализа агент ПЭ дает негативный ответ на запрос агента П № 4, указывая причины возникновения конфликта: высокие объемы спроса других потребителей.

Агент П № 4 рассылает агентам потребителей 1, 2 и 3 предложения о снижении спроса в третий день с указанием возможной компенсации такого решения, а также величины, на которую необходимо снизить потребление. Агенты всех потребителей не заинтересованы в снижении уровня потребления электроэнергии. Однако агент потребителя 3 (П № 3) в отличие от остальных имеет в своем распоряжении газовый электрогенератор. Агент П № 3, зная о возможности замещения одного ресурса другим, запрашивает агента ПГ о возможности и стоимости обеспечения необходимого количества газа с учетом курса конвертации одного ресурса в другой. Агент ПГ дает положительный ответ с указанием стоимости. Агент П № 3 рассчитывает конечную стоимость перехода на газовое электрообеспечение (с учетом амортизации генератора и прочих факторов) и отправляет ответ агенту П № 4. П № 4, зная, что от получения должного объема электричества в третий день зависит выполнение крупного заказа, соглашается на условия агента П № 3, после чего последний меняет текущие заявки к ПЭ и ПГ, а агент фабрики повторяет запрос к ПЭ, который теперь может его удовлетворить.



Р и с. 4. Графики адаптивного перепланирования производства ресурсов в ответ на появление новой заявки

В рамках тестирования системы был разработан сценарий минимизации стоимости электроэнергии для потребителя за счет подключения газового электрогенератора и распределения потребления электричества во времени. В сценарии описан ряд отличающихся по характеристикам потребителей и поставщиков газо-, тепло- и электроснабжения. Смоделированы спрос и предложение ресурсов на месячный горизонт, воссоздана ситуация пиковой нагрузки на сеть за счет увеличения среднего значения спроса потребителей. Система, проведя анализ ситуации, приняла два взаимодополняющих решения:

– в автоматическом порядке подключить альтернативный источник энергии (газовый электрогенератор) для удовлетворения повышенных запросов потребителей, задействовав газовый ресурс;

– разослать потребителям в их АРМы рекомендации по снижению нагрузки на сеть в обозначенный пиковый период потребления, подкрепленные мотивационными мерами: предложением скидок на потребление в периоды помимо пикового, а также штрафами за потребление сверх допустимого уровня в период повышенной нагрузки.

Благодаря принятым системой решениям удалось снизить конечную стоимость ресурсов для потребителей (согласно схеме расчета цены Demand Response), а также сохранить безопасный режим работы сетей.

Выводы

На текущий момент разработан прототип интеллектуальной сетевцентрической клиентоориентированной системы газо-, тепло- и электроснабжения. Эксперименты, проведенные с прототипом ИСКС, продемонстрировали высокую пригодность мультиагентного подхода к решению задач управления ресурсами в интегрированных сетях ресурсного снабжения для повышения эффективности использования первичных и конечных энергоносителей, а также для демонстрации модели межотраслевой интеграции на основе сетевцентрического подхода. Необходимо отметить высокий уровень конкурентоспособности мультиагентных систем в области реализации подхода Demand Response за счет обеспечения двусторонней связи системы управления с ее пользователями в реальном времени.

Разрабатываемая система за счет широких возможностей масштабирования и интеграции имеет возможность развертывания в различных сферах сетей газо-, тепло- и электроснабжения на любом уровне – от промышленного до бытового.

При поддержке экспертов возможно подробное описание онтологии сетей газо-, тепло- и электроснабжения, а также перенос в систему существующих карт сетей всех трех типов, что позволит перейти от прототипа к реальной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Smart grid// Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation // Fortnightly Magazine. 2003. – November 1. – Режим доступа: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0>
3. *Воротницкий В.Э., Туркина О.В.* Сравнительный анализ потерь электрической энергии в электрических сетях Российской Федерации и стран дальнего зарубежья // Режим доступа: http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Prezentation_Vorotnitskiy_Turkina.pdf
4. *Быкова О., Аблязов П.* Куда движется электроэнергетика? // Режим доступа: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671.phtml?1&q=0JrQo9CU0JAg0JTQktCY0JbQldCi0KNQryDQrdCb0JXQmtCi0KDQntCt0J3QldCg0JPQldCi0JjQmtCQPw==>
5. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future // Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

6. *Дорофеев В.В., Макаров А.А.* Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энерго-эксперт. – 2009. – № 4 (15).
7. Концепция энергетической стратегии России на период до 2030 года (проект) // Прил. к журналу «Энергетическая политика». – М.: ГУ ИЭС, 2007.
8. *Ледин С.С.* Интеллектуальные сети SG – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. – Ноябрь 2010. – № 11(16).
9. 10 трендов рынка SMART Grid в 2012 году. – Режим доступа: http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha
10. Перспективы развития технологий Smart Grid в России. – Режим доступа: http://www.cleandex.ru/opinion/2010/05/28/smart_grid_perspectives_in_russia
11. Простой стимул экономить электричество появится в нескольких российских регионах. – Режим доступа: <http://www.itv.ru/news/other/238598>
12. *Иващенко А.В., Карсаев О.В., Скобелев П.О., Царев А.В., Юсупов Р.М.* Мультиагентные технологии для разработки сетевых систем управления // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», 4-6 апреля 2011 г. Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). – С. 11-23.
13. *Скобелев П.О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1-32.
14. *Скобелев П.О.* Онтология деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. – № 1(3). – С. 6-38.

Статья поступила в редакцию 17 июля 2013 г.

THE DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL NETWORK-CENTRIC SYSTEM (SMART GRID) OF ADAPTIVE RESOURCE ALLOCATION IN INTEGRATED NETWORKS OF GAS, HEAT AND ELECTRICITY

D.S. Budaev, V.B. Larukhin, D.S. Kosov, E.V. Simonova

SEC «Smart Solutions»
17 Moscovskoe Shosse, office center «Vertikal», Samara, 443013

The current trends of the Smart Grid concept are described. The creation of an intellectual customer-centric system of gas, heat and electricity supply is described as a solution to the corresponding problems the creation of the intellectual customer-centric system of gas, heat and electricity supply is proposed. As a prototype of such a simulation modeling and the adaptive resource allocation in integrated networks of resource supply system is given.

Keywords: *Smart grid, multi-agent technology, network-centric, integrated network of resource supply.*

*Denis S. Budaev, Leading Developer.
Vladimir B. Larukhin, Director of Engineering.
Daniil S. Kosov, analyst.
Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Senior Analyst.*

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ ЛИНЕЙНЫХ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ С ПОЛНОЙ ИНВАРИАНТНОСТЬЮ СТАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПРИ ПОСТОЯННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В.Е. Вохрышев

Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: vohr3@yandex.ru

Исследованы динамические свойства самонастраивающихся линейных и нелинейных систем стабилизации с компенсацией статических ошибок от постоянных воздействий.

Ключевые слова: самонастраивающийся алгоритм, релейная система управления, статическая ошибка.

Качество любой системы автоматического управления динамическими объектами оценивается определенной совокупностью инженерных требований к ее свойствам – величиной ошибки в переходном процессе и в установившемся режиме работы (при $t \rightarrow \infty$), запасом устойчивости и эффективностью, которая определяется соотношением полезности результатов применения системы по назначению с затратами и потерями, обусловленными ее созданием и эксплуатацией.

Ошибка определяется величиной, равной разности между требуемым $x_0(t)$ и действительными значениями регулируемой величины: $e(t) = x_0(t) - x(t)$. Знание ее мгновенного значения в течение всего времени работы объекта позволяет наиболее полно судить о свойствах системы его управления. Конкретные величины ошибок при типовых воздействиях в установившемся и переходном режимах определяются динамическими свойствами системы и могут быть определены аналитически [1] или методом цифрового моделирования по ее математическому описанию.

В работе [2] для получения полной инвариантности статических ошибок при постоянных задающих и возмущающих воздействиях рассмотрены самонастраивающиеся алгоритмы их устранения в линейных и нелинейных автоколебательных системах путем использования интегрирующих звеньев не в прямой цепи управления, а в контуре самонастройки. Инвариантность достигается автоматическим масштабированием задающего воздействия.

Представляется целесообразным исследовать динамические свойства подобных систем в условиях действующих на объект как сигнальных, так и параметрических возмущений.

Линейные системы

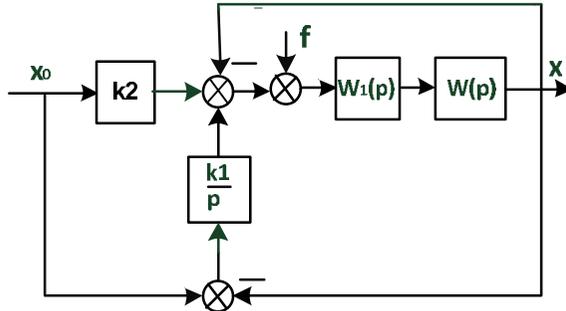
Решение задачи обеспечения полной инвариантности статической ошибки при задающих и возмущающих воздействиях в статическом режиме предложено в работе [2]. Оно осуществляется введением в замкнутую систему дополнительной (параллельно единичной) обратной связи:

Валерий Евгеньевич Вохрышев (д.т.н., доцент), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

$$U_{oc} = k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x(t)) dt, \quad (1)$$

где $x(t)$ – текущее значение регулируемой координаты, k_1 – постоянный коэффициент.

Дополнительная обратная связь вместе с входящим в систему исполнительным устройством в виде интегрирующего звена выполняет функцию контура самонастройки. На рис. 1 представлена структурная схема самонастраивающейся системы (СНС).



Р и с. 1. Структурная схема самонастраивающейся системы:
 $W(s)$ – передаточная функция объекта; $W_1(p)=k$ – пропорциональный регулятор;
 k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты, $k_2 \leq 1$

Динамические свойства данной структуры определяются передаточными функциями, которые в замкнутом и разомкнутом состояниях имеют вид (2) и (3) (без потери общности коэффициент $k_2 = 1$):

$$W_{zc}(p) = \frac{(1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)}{1 + (1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)} = \frac{x(p)}{x_0(p)}; \quad (2)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{(1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)}{1 + \frac{k_1}{p} \cdot W_1(p) \cdot W(p)} = \frac{x(p)}{x_0(p)}. \quad (3)$$

Положив $p = \frac{d}{dt}$, легко показать, используя теорему о предельном переходе, что $x_0 = x(t)$ как в замкнутой, так и в разомкнутой системе при $x_0 = Const$.

Передаточная функция разомкнутой системы без контура самонастройки имеет вид

$$W(p) = W_1(p) \cdot W(p). \quad (4)$$

В линейной системе предельное значение коэффициента усиления, при котором система еще сохраняет устойчивость, определяется в соответствии с критерием Найквиста [1] из соотношения (5) путем составления уравнений для мнимых и действительных его частей:

$$A(j\omega) = -k_{np}, \quad (5)$$

где $A(j\omega)$ – характеристический полином частотной передаточной функции (2); k_{np} – предельное значение коэффициента усиления, равное $k_{np} = k \cdot k_o$; k_o – коэффициент усиления объекта.

Предельное значение коэффициента усиления характеризует запас устойчивости системы к действию параметрических возмущений на объект.

Пример. Пусть передаточная функция разомкнутой системы без контура самонастройки имеет вид

$$W_{pc}(p) = \frac{k \cdot k_o}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (6)$$

Тогда предельное значение коэффициента усиления системы как произведение коэффициентов усиления регулятора и объекта получим из решения соотношения (5) с учетом постоянных времени уравнения (6) для системы без самонастройки [1]:

$$k_{np} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) - 1,$$

а для сравнения – в самонастраивающейся системе

$$k_{np1} = \left[\frac{T_1 + T_2 + T_3}{T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3} - \frac{T_1 T_2 T_3}{(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3)^2} \right] \cdot \frac{1}{k_1}.$$

Для определенности положим $T_1 = 2 \text{ сек}$, $T_2 = 0.5 \text{ сек}$, $T_3 = 0.1 \text{ сек}$. Тогда $k_{np} = 31.5$, а $k_{np1} = 2.02 \cdot \frac{1}{k_1}$.

Коэффициент k_1 , обеспечивающий сходимость процессов самонастройки в замкнутой системе, всегда намного меньше единицы. Поэтому для того чтобы переходные процессы в самонастраивающейся системе при типовых задающих воздействиях были не хуже, чем в системе без самонастройки, необходимо, чтобы коэффициент k_1 для данного примера был не больше, чем $\frac{k_{np1}}{k_{np}} = \frac{2.02}{31.5} = 0.064$.

Таким образом, самонастраивающийся алгоритм помимо устранения статической ошибки в системе обеспечивает при прочих равных условиях запас устойчивости системы не меньше, чем в системе без самонастройки.

Эффект устранения статической ошибки может обеспечиваться и путем включения в прямой контур системы (4) интегрирующих звеньев, например ПИ-регулятора. Однако достичь полной инвариантности статических ошибок при возмущающих воздействиях и в этом случае оказывается невозможным [1], если возмущения действуют до места включения интегрирующего звена в системе. При этом динамические свойства СНС оказываются не хуже динамических свойств системы, содержащей в основном контуре ПИ-регулятор. Действительно, передаточная функция замкнутой системы с ПИ-регулятором имеет вид

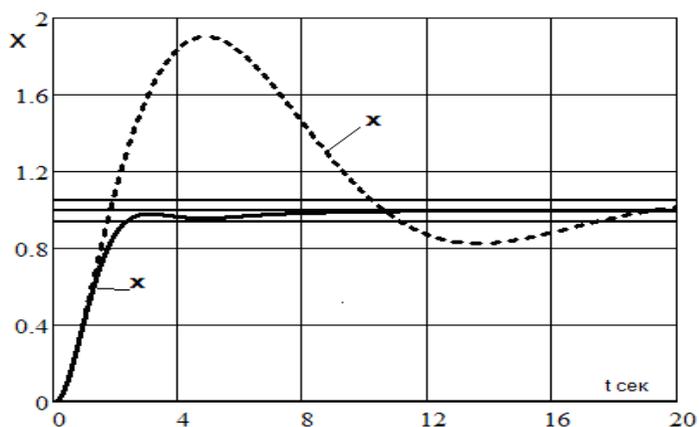
$$W_{sc}(p) = \frac{(k_3 + \frac{k_4}{p}) \cdot W(p)}{1 + (k_3 + \frac{k_4}{p}) \cdot W(p)}. \quad (7)$$

Если приравнять уравнения (2) и (7), то при $k_3 = k$ и $k_4 = k_1 k$ они совпадают.

Самонастраивающаяся система проще в эксплуатации по сравнению с системой, содержащей ПИ-регулятор, поскольку коэффициенты k_1 и k в СНС расположены в разных, невзаимосвязанных контурах и могут настраиваться отдельно с обеспечением равноценных качественных показателей переходных процессов.

Следовательно, управление, представленное в системе на рис. 1, оказывается предпочтительнее во всех смыслах – отсутствия статических ошибок, запаса устойчивости, затрат на реализацию и обслуживание. Следует также обратить внимание и на то, что структура СНС будет решать задачу стабилизации регулируемой координаты с устранением статической ошибки в условиях обрыва отрицательной обратной связи в основном контуре, то есть она обладает большей «живучестью».

На рис. 2 показаны переходные процессы в самонастраивающейся системе с включенной (сплошная линия) и отключенной (пунктирная линия) обратной связью.



Р и с. 2. Переходные процессы в самонастраивающейся системе

Нелинейные автоколебательные системы

Качество работы релейных автоколебательных систем обычно оценивается величиной амплитуды автоколебаний в установившемся режиме работы, а в переходном – временем затухания колебательных процессов, перерегулированием и числом колебаний, превышающих амплитуду автоколебаний в установившемся режиме работы.

Ранее (в работе [2]) автором предложен и исследован алгоритм устранения статической ошибки в релейных автоколебательных системах, понимаемой как разность между заданным значением регулируемой координаты (уставки) и средним значением автоколебаний в установившемся режиме работы в условиях асимметричности управления и действия внешних возмущений. Среднее значение автоколебаний x_{cp} в предлагаемом алгоритме определяется как полуразность экстремальных значений регулируемой координаты (на каждом полупериоде автоколебаний). Задача решается с помощью самонастраивающегося алгоритма структуры (см. рис. 1), обеспечивающего автоматическое смещение уставки по результатам сравнения x_{cp} с задающим воздействием.

В настоящей статье рассматривается динамика системы управления линейным

объектом (4), в которой пропорциональный регулятор $W_1(p)$ заменен релейным регулятором, закон управления которого имеет вид

$$U = \begin{cases} B, & \text{при } M(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M(x) \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

где $M(x)$ – функция переключения:

$$M(x) = x_0 + a(t) - x;$$

$$a(t) = k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x_{cp}) dt,$$

x_{cp} – среднее значение амплитуды автоколебаний

$$x_{cp} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2},$$

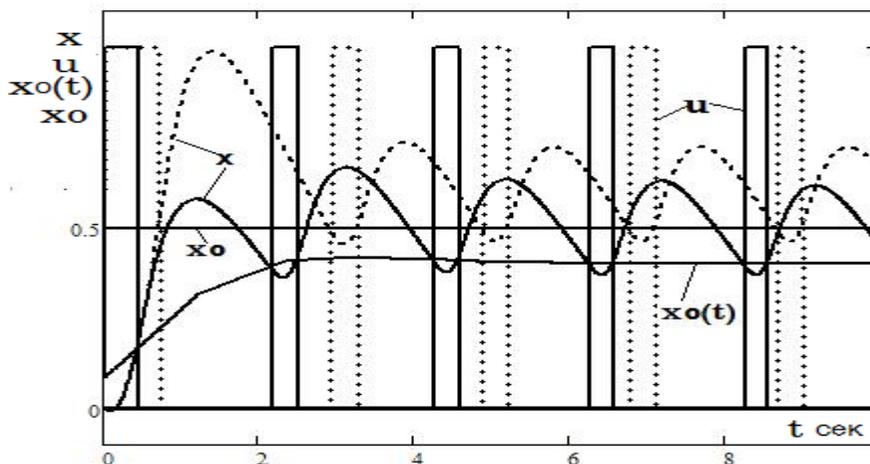
где x_{\max} и x_{\min} – экстремальные значения регулируемой координаты;

B – величина управляющего воздействия.

Гармоническая линеаризация нелинейности (8) при симметричных автоколебаниях приводит к выражению

$$W(A) = \frac{2 \cdot B}{\pi \cdot A},$$

где A – амплитуда автоколебаний.



Р и с. 3. Процессы в замкнутых релейных системах

(объект (6): сплошные линии – самонастраивающаяся система, пунктирные – релейная система с управлением (8), но с функцией переключения $M(x) = x_0 - x$; $k_2 = 0.1$)

Значения амплитуды и частоты автоколебаний для заданного объекта определяются из уравнения гармонического баланса

$$W(j\omega) = -1/W(A)$$

путем составления уравнений для мнимых и действительных его частей.

Понятно, что амплитуда автоколебаний в самонастраивающейся системе при прочих равных условиях в установившемся режиме работы будет не больше, чем в

системе без самонастройки. Однако качественные показатели и их особенности в переходном режиме в подобных системах проще выявить методом цифрового моделирования с использованием модели одного и того же объекта (см. рис. 3).

Из рис. 3 видно, что переключения управления в самонастраивающейся системе происходят в переходном процессе с опережением по отношению к уставке, поэтому в системе нет перерегулирования, отсутствует статическая ошибка, а время затухания переходных процессов не превышает длительности переходного процесса в релейной системе без самонастройки.

Выводы

1. Исследованы динамические свойства самонастраивающихся линейных и автоколебательных нелинейных систем, алгоритмы управления которых обеспечивают полную инвариантность статических ошибок при постоянных задающих и возмущающих воздействиях без использования интегрирующих элементов в основном контуре.

2. Линейная система с исследованным алгоритмом проще в настройке, обладает большей «живучестью», и ее управление не превосходит по сложности реализации стандартный ПИ-регулятор.

3. Показано, что качественные характеристики переходных процессов в самонастраивающихся системах с исследованными алгоритмами в условиях параметрических и сигнальных возмущений оказываются не хуже, чем в системах, использующих стандартные управляющие устройства, а по некоторым показателям существенно их превосходят.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекецкий В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
2. *Вохрышев В.Е.* Самонастраивающиеся алгоритмы устранения статических ошибок в автоматических линейных и нелинейных автоколебательных системах стабилизации динамических объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – С. 19-24.

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2013 г.

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STABILIZING SELF-ADAPTING LINEAR AND AUTO-OSCILLATION NON-LINEAR SYSTEMS WITH AUTOMATIC COMPENSATION OF STATIC MISTAKES

V.E. Vokryshev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Self-adapting direction algorithms, providing for the elimination of static mistakes in linear systems and symmetry of automatic oscillations in accord with demanded points in non-linear auto-oscillation systems having unsymmetrical directing limits and with constant additional revolts are worked out. Dynamic characteristics of the processes are also researched.

Keywords: *Self-adapting algorithm, relay direction system, static mistake.*

Valeriy E. Vokryshev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ*

Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sashka2105@mail.ru

Предложена обобщенная структура выбора альтернатив, которая позволяет на этапах концептуального и формального моделирования сложных технических систем и ее объектно-ориентированной спецификации обоснованно определить состав и структуру задач, решаемых в создаваемой информационной системе поддержки принятия решений, и определять состав и структуру запросов к соответствующей базе моделей и полимодельных комплексов.

Ключевые слова: системы принятия решений, информационные системы управления, сложные технические системы.

Введение

Транспортной системе (ТС) присущи свойства сложных систем, однако она имеет ряд особенностей: комплексная, а не отраслевая поддержка промышленных объектов; инерционность, связанная с крайне высокими затратами на коренное изменение структуры и направленность на развитие, реконструкцию и модернизацию существующих схем, и т. д. В данных условиях информационные системы управления такими системами должны включать системы поддержки принятия решения (СППР). Это обусловлено усложнением технических систем, когда эффективное формирование и отбор технических и организационных решений требуют анализа десятков тысяч параметров. При комплексном моделировании сложных технических систем (СТС) требуется проводить разработку и реализацию в рамках каждой конкретной СППР своих принципов принятия решений, методов, моделей и алгоритмов согласования разнородных моделей и критериальных функций, ориентированных на заданную предметную область.

Концепция информационной системы управления сложными техническими системами

Общая постановка задачи управления СТС может быть сформулирована следующим образом. Имеется некоторый динамический объект, поведение которого описывается вектором выходов $y = (y_1, y_2, \dots, y_p)^T$ и вектором переменных состояния $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, где T – символ операции транспонирования (рис. 1).

Требуется перевести данный объект из начального состояния $x(t_0)$, в котором он находился в момент времени $t = t_0$, в заданное конечное состояние x^* , которому со-

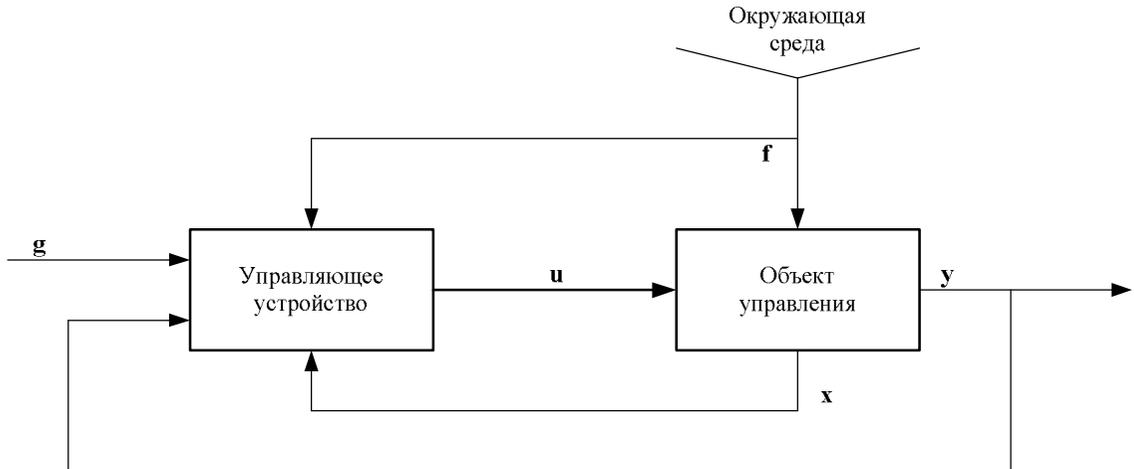
* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт 14.В37.21.0304.

Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Александр Владимирович Чуваков (к.х.н.), доцент кафедры «Вычислительная техника».

ответствует определенное значение вектора выходов y^* [1].

Для решения этой задачи, т. е. для управления состоянием объекта, используется специальное управляющее устройство, в функции которого входит формирование вектора управляющих воздействий $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ в соответствии с заданной программой, определяемой значениями вектора задающих воздействий $g = (g_1, g_2, \dots, g_r)^T$ и текущими значениями компонент вектора выходов y , вектора состояния x объекта и вектора внешних возмущений $f = (f_1, f_2, \dots, f_s)^T$.



Р и с. 1. Общая структура системы управления

Классическая процедура синтеза управляющего устройства, как правило, включает в себя следующие этапы:

- построение или получение математической модели объекта управления;
- задание требований к качеству процессов управления в целом;
- определение структуры и параметров управляющего устройства (в виде некоторой аналитической зависимости, выражающей вектор u через векторы g , x , y , f).

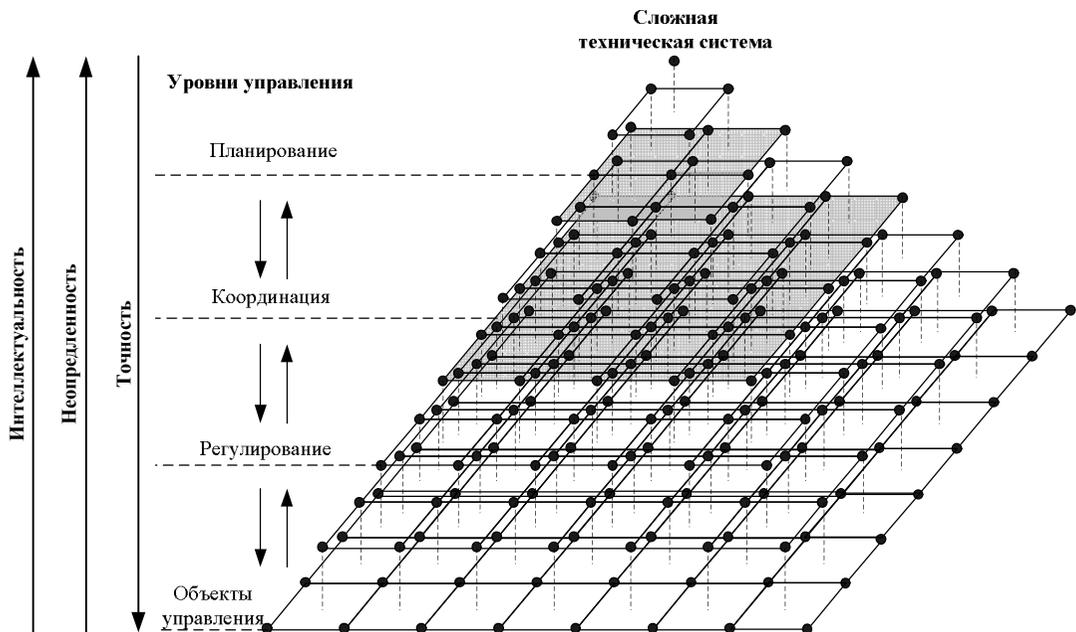
Вместе с тем применение данного подхода на практике встречается с рядом серьезных затруднений. Так, точная математическая модель реального объекта часто оказывается слишком сложной или совсем неизвестной. Изменения окружающей среды приводят к действию на объект различного рода возмущений – сигнальных, параметрических и структурных, представляющих собой дополнительный источник неопределенности о характеристиках объекта. Сложность решения данной задачи обусловлена и тем, что сами требования к системе зачастую могут быть заданы лишь приближенно. Более того, некоторые из них вообще могут оказаться взаимно противоречивыми.

Попытки построения адаптивных регуляторов, параметры которых автоматически перестраиваются при изменении параметров объекта, также имеют весьма ограниченную область применения. Причины здесь примерно те же: трудно подобрать простой и надежный алгоритм адаптации, работоспособный в случае широкого диапазона изменения параметров объекта. Если объект управления относится к категории *сложных динамических объектов*, то выбор алгоритма адаптации резко усложняется, поскольку возникает проблема сходимости процессов адаптации в системе; трудно подобрать оптимальные значения параметров устройства адаптации; многие

из существующих методик анализа и синтеза адаптивных информационных систем управления (ИСУ) связаны с чрезмерным упрощением задачи. Выход из сложившейся ситуации – использование алгоритмов *интеллектуального управления*, предполагающих отказ от необходимости получения точной математической модели объекта, стремления воспользоваться известными разработчику методами синтеза, ранее положительно зарекомендовавшими себя для других, более простых классов объектов. В основе интеллектуального управления лежит идея построения высокоорганизованных ИСУ с выполнением таких традиционно присущих человеку функций, как *принятие решений*, планирование поведения, обучение и самообучение в условиях изменяющейся внешней среды [2].

Отличительными признаками системы управления, интеллектуальной «в целом», являются [3]:

- непрерывный контроль и слежение за выполнением цели управления и ее коррекция, что приближает систему к процессу интеллектуального «понимания» ее предназначения;
- подчиненность друг другу задач регулирования планирования тактических действий и выбора стратегии поведения;
- расширение информационных каналов и усложнение задач классификации по результатам контроля состояния как объекта, так и внешней среды, влияющей на мотивацию цели и выбор программы действий системы;
- использование при решении трудно формализуемых задач интеллектуального типа процедур манипуляции со *знаниями*, учитывающих ограничения на располагаемые ресурсы.



Р и с. 2. Обобщенная структурная схема ИСУ сложными техническими системами

Иерархическая (многоуровневая) организация управления является непереносимым свойством любой информационной системы управления СТС. На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема интеллектуальной системы, включающей в себя три уровня управления [4]:

- уровень планирования (организации);
- уровень координации (адаптации);
- уровень регулирования (исполнительный уровень).

Как видно из рис. 2, чем ниже уровень управления, тем меньше знаний требуется для решения; чем выше уровень, тем интеллектуальнее становится ИСУ, но возрастает неопределенность и, следовательно, точность принимаемых решений. В свою очередь, именно на верхних уровнях управления выполняются такие функции, как обучение, распознавание и прогноз развития ситуации, адаптация по отношению к разного рода возмущениям.

Согласование моделей в ИСУ

Проведенный анализ показывает, что математическую основу интеграции различных моделей и методов как между собой, так и с моделями и методами, традиционно используемыми в классической теории управления, целесообразно проводить, базируясь на концепция структурно-математического и категорийно-функторного подходов. Символьный характер задания базовых множеств и отношений позволяет формально описать и исследовать различные классы задач анализа и синтеза технологий, задачи их интеграции с существующими технологиями комплексного моделирования СТС [5].

При формулировке и решении задач выбора управляющих воздействий в АСУ СТС в условиях неопределенности возьмем за основу концепцию системного (комплексного) моделирования, под которой понимается полимодельное многокритериальное описание и исследование заданной предметной области с использованием комбинированных методов, алгоритмов и методик, позволяющих на конструктивной основе обеспечить эффект взаимного усиления достоинств каждой из применяемых моделей, принадлежащих заданным классам.

Исходя из принятой классификации математических структур [6] различается выбор на полностью определенных математических структурах и на математических структурах с неопределенностью (вероятностные, статистические, нечеткие неслучайные, нечеткие вероятностные и нечеткие статистические структуры и их комбинации). Исходя из анализа предложенной структуры принятия решений в СТС следует, что центральную роль в решении соответствующих задач выбора играют вопросы организации и проведения комплексного моделирования рассматриваемой предметной области (транспортные системы). При этом можно выделить следующие особенности комплексного моделирования. Первая особенность комплексного моделирования состоит в необходимости в процессе моделирования постоянно проводить согласование разнородных моделей, полученных в результате формальной либо неформальной декомпозиции решаемых задач. При этом в общем случае наряду с собственно модельным согласованием при решении задач анализа и оптимизации должно проводиться межмодельное и (или) внутримодельное согласование *критериальных функций*, с помощью которых проводится сравнение рассматриваемых альтернатив.

В рассматриваемой задаче межмодельное согласование проводится на концептуальном, также и на алгоритмическом, информационном, программном уровнях. Многоуровневое модельное иерархическое построение имитационных систем пре-

доставляет возможность исследователю с различной степенью детализации формализовать происходящие в системе процессы, оперативно перестраивать структуру каждой модели, механизм взаимодействия моделей в зависимости от складывающейся ситуации. Кроме того, при такой структуре комплекса моделей удобно в ходе решения конкретной задачи проводить необходимые операции, связанные с декомпозицией и агрегированием моделей, описывающих заданную предметную область.

Переходя к рассмотрению вопроса согласования аналитических и имитационных моделей, следует прежде всего подчеркнуть, что выбор принципов, методов, моделей и алгоритмов согласования указанных моделей в каждом конкретном случае определяется целями проводимых исследований. Так, например, при решении одних задач аналитические модели целесообразно использовать (на алгоритмическом уровне) внутри имитационных моделей для поиска допустимых вариантов изменения экзогенных переменных. В другом случае, наоборот, имитационные модели используют для уточнения релаксированных решений, полученных на аналитических моделях. Указанное включение одного класса моделей в качестве блока в состав другого класса моделей можно использовать при большой частоте численных реализаций сравнительно малоразмерных решаемых задач, которые ввиду отлаженности процедур не требуют участия лица, принимающего решения (ЛПР), и осуществляются в автоматическом режиме.

Вопросы согласования данных классов моделей на информационном и программном уровне должны решаться каждый раз с учетом конкретно выбранной для моделирования схемы базы данных, соответствующих программных средств. Данные вопросы подробно изложены в литературе [7, 8, 9].

Наиболее удачным, на наш взгляд, вариантом согласования математических (аналитико-имитационных) моделей принятия решений с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями) является использование метода концептуального программирования [10], где используется технология недоопределенных моделей (Н-моделей) [11] или, как наиболее общий случай, обобщенных вычислительных моделей [12]. Базовым понятием обобщенных вычислений является понятие недоопределенной переменной. Суть ее отличия от классически понимаемой переменной состоит в следующем. Каждой классической переменной сопоставляется элемент из некоторого множества. Причем значение этой переменной отражает некоторую конкретную, заданную условиями задачи, сущность, или денотат [13], представляемую в задаче именем данной переменной. В рамках одной задачи значение-денотат переменной не может меняться – оно либо известно, либо неизвестно. Недоопределенная переменная принимает значения из непустого подмножества универсума, включающего в себя как точное значение (аналог классической переменной), так и неопределенные значения (интервалы, перечень возможных альтернативных значений – вплоть до полностью неопределенного, неизвестного значения). В процессе уточнения (при поступлении более точных данных) неопределенное значение становится все более определенным (например, интервалы сужаются) и в пределе может стать равным денотату данной переменной. Если говорить более конкретно, то универсумом является любая конечная система его подмножеств, замкнутая относительно операции пересечения, а также пустое множество.

Для реализации всех возможностей должно быть введено множество ограничений (вычислимых отношений), в которых для соответствующих функциональных отношений необходимо наличие явного выражения одних объектов (переменных), входящих в эти отношения, через другие. Это свойство поможет довести и оценить

качество моделей на этапах проведения моделирования, экспериментирования и испытаний (модельных, стендовых, летно-конструкторских и пр.). Однако, когда речь идет только об оценивании качества, как правило, штатных систем, подсистем, блоков, процесс наполнения знаниями подобной интеллектуальной системы может неоправданно затянуться и потребовать дополнительного вложения больших ресурсов (особенно временных и человеческих).

С этой целью авторами были разработаны методологические и методические основы для реализации новой интеллектуальной информационной технологии и инструментальные средства, ее поддерживающие и предназначенные для автоматизированного проектирования систем мониторинга и управления СТС в различных условиях изменения обстановки.

Концепция управления и принятия решений в СТС

Центральным в теории управления является понятие «решение». Обычно под решением понимается выбор линий поведения в конкретной проблемной ситуации, которая соотносится с определенным критерием или совокупностью критериев [14, 15, 16]. Такая достаточно узкая трактовка, характерная для операционных исследований и теории ожидаемой полезности, становится неприемлемой при управлении СТС.

В системном понимании решение – это неотъемлемая составная часть контура управления, которая представляет собой многослойный итеративный информационный процесс, инициируемый проблемной ситуацией, предшествующий действию и завершающийся выбором одной из альтернативных линий поведения. Известно, что выбор альтернативы есть только часть решения, которой предшествует ряд операций, зачастую решающим образом определяющих характер выбора. Можно выделить, по крайней мере, три типа таких операций [16]: формулировка задачи (концептуализация); генерация альтернатив; анализ альтернатив.

По своей структуре решения будем разделять на элементарные и системные. Элементарными в структурном отношении назовем решения, состав которых не раскрывается или не может быть раскрыт в силу различных причин. Они задаются только своими «входами» и «выходами». Из этих решений формируются системные решения, представляющие собой совокупность элементарных решений, связанных различными отношениями. Не следует, однако, считать, что элементарные решения просты и всегда легко принимаются. Приведенное деление отражает только тот факт, что решения, названные элементарными, выступают компонентами более общей системы. Элементарные решения могут оказаться очень ответственными в смысле влияния на конечный результат управления, и напротив, сложное решение может практически не влиять на управляемый процесс. Кроме того, любое системное решение может быть «свернуто» в элементарное и, в свою очередь, рассматриваться как составная часть некоторой надсистемы решений.

В зависимости от типа отношений между ними все решения разделяются на управляющие, согласующие и координирующие [17]. По своему содержанию подразделяются на информационные, оперативные и организационные [18]. Информационные решения определяют, какие данные, необходимые для управления, следует считать истинными в данной ситуации. Оперативные решения устанавливают рациональные управления в конкретных условиях. Организационные решения соответствуют вопросу «каким быть» и предопределяют состав и структуру управляющей и исполнительной подсистем в контуре управления. В зависимости от внутренних механизмов решения разделим на рефлексные, интеллектуальные и интуитив-

ные. Рефлексные, или ситуационные, решения основываются на связках «ситуация – альтернатива» [19]. В процессе обучения у субъекта, осуществляющего управление, происходит формирование эталонных (типовых) ситуаций и связанных с ними решений. Такие связки постепенно накапливаются, сортируются и обобщаются, образуя своеобразный банк знаний. Получая информацию о ситуации, субъект обращается в этот банк, отождествляет ее с наиболее близкой эталонной и сразу выбирает альтернативу.

Интеллектуальные решения основываются на некоторой исходной аксиоматике, правилах логического вывода (дедуктивных, индуктивных, абдуктивных) и подкрепляются математическими расчетами. Для интуитивных решений характерно то, что они принимаются без каких-либо обоснований.

В зависимости от состояния выделяют генерирующие, анализирующие и выбирающие решения. Генерирующие решения предполагают выполнение операций по идентификации проблемной ситуации, оценке имеющихся ресурсов, определению ограничений и допустимых целей управления, а также потенциальных способов их достижения, в совокупности позволяющих сформировать по возможности полный перечень возможных линий поведения. Анализирующие решения включают операции по определению критериев и показателей эффективности, моделированию предстоящих действий, а также оценку возможных исходов и последствий реализации той или иной альтернативы. Выбирающие решения включают операции по обсуждению оснований, говорящих «за» или «против» той или иной линии поведения, и собственно акт выбора. В результате принятия этих решений должен быть получен однозначный ответ на вопрос, «какую линию поведения следует признать наиболее рациональной».

Обобщенная схема рассмотренной классификации решений представлена на рис. 3.

Рассмотрим концепцию управления СТС как целостного объекта, для которого характерны следующие свойства [16]:

1) *слабая предсказуемость*, что трактуется как принципиальная невозможность точно предвидеть и однозначно спрогнозировать результаты управления СТС;

2) *открытость*, под которой в данном случае понимается способность СТС осуществлять обмен информацией с внешним окружением;

3) *самоорганизуемость*, трактуемая применительно к СТС как ее способность приобретать в процессе эксплуатации новые функции, качества и структуру, то есть расширять (наращивать) свои функциональные возможности;

4) *крупномасштабность*, под которой в рамках данного исследования понимается наличие в управляемом объекте достаточно большого количества разнородных компонентов;

5) *многоуровневость*, предполагающая наличие в СТС множества разнородных, но соподчиненных уровней различной природы. Здесь понятие «уровень» будем употреблять в следующих значениях:

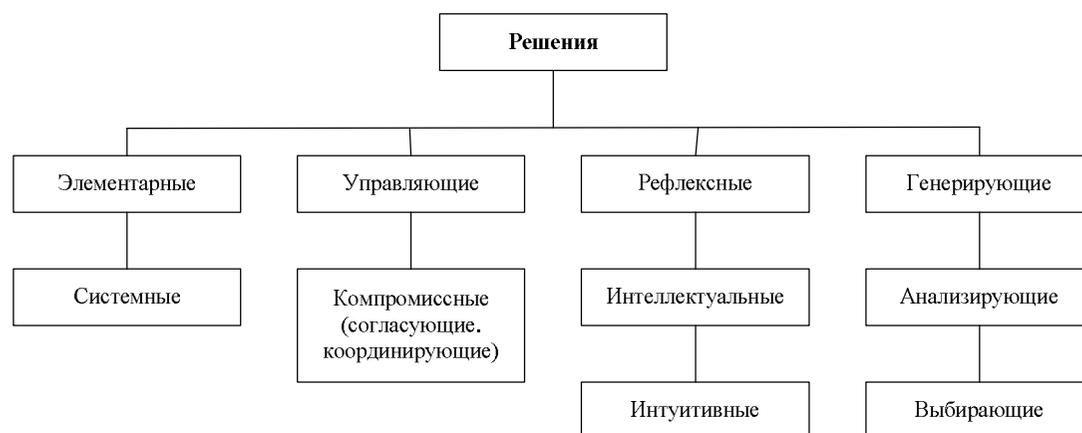
– как организационный аспект, т. е. будем выделять следующие организационные уровни ее строения: СТС в целом, функциональные и обеспечивающие подсистемы, комплекс средств автоматизации, техническое, информационное, лингвистическое, общее и специальное программное обеспечение. В свою очередь каждый из указанных компонентов имеет свое организационное строение. Так, техническое обеспечение состоит из комплексов технических средств, комплексы – из блоков, блоки – из модулей, модули – из плат, платы – из деталей и т. д.;

– как фиксация определенных общностей законов функционирования компонен-

тов СТС, единство их пространственно-временной топологии и субстанционального строения. С этой позиции та же самая СТС может рассматриваться на социальном, экономическом, информационно-управленческом, технологическом и иных уровнях;

– как слою представления СТС. Например, назовем детерминистический, логический и вероятностный слою представления процесса функционирования СТС. В ряде случаев слоями будем называть структурные компоненты СТС, выделенные по временному признаку или по типу решаемых задач. Такими слоями являются: прогнозирование, текущее планирование, оперативное управление;

– как обобщенные качественные оценки параметров проектируемой СТС, выражая их такими терминами, как «уровень технологичности», «уровень информационной защищенности», «уровень унификации», «уровень формализации», «уровень оперативности».



Р и с. 3. Системная классификация решений

Принятая в настоящем исследовании концепция многоуровневого представления предопределяет комплексный, многоаспектный характер постановки и решения проблемы управления СТС. При этом принципиальным является положение о взаимосвязанности различных уровней.

При практической реализации такой технологии управления СТС необходимо выделять различающиеся между собой грани системы: ее устройство; способы и режимы функционирования; допустимые ограничения и т. п. В соответствии с этим на каждом из этапов составляются и используются параллельно несколько описаний СТС, необходимых для того, чтобы составить однозначное представление об управляемом объекте. При составлении этих описаний исходим из двух основных положений. Во-первых, считаем, что попытки подробного и всестороннего представления управляемого объекта в виде единственного описания ошибочны. Это разрушает технологию системного подхода, предполагающего разработку нескольких взаимосвязанных описаний, которые непрерывно уточняются и дополняются в процессе проектирования. Во-вторых, примем утверждение, что СТС невозможно описать с исчерпывающей полнотой при любом количестве описаний. Поэтому речь может идти только о компромиссе между стремлением, с одной стороны, ограничить число и сложность описаний, с другой стороны, учесть многочисленные и разнообразные подробности, характеризующих систему.

Тогда типичными комплексными описаниями (КО) СТС являются топологическое (ТО), процессное (ПО) и информационное (ИО) описания, так, что

$$KO = \langle TO, PO, IO, C \rangle, \quad (1)$$

где C – связи между ТО, ПО, ИО.

Топологическое описание – это характеристика системы, отражающая ее топологию, состав, иерархию и связи, реализующие отношения между уровнями и компонентами:

$$TO = \langle \lambda, \{P_i\}, \{r_j\}, \{R_k\}, \{S_h\} \rangle, \quad (2)$$

где λ – метрическое пространство (возможно несколько пространств со связями между ними – тензорное метрическое пространство);

$\{P_i\}$ – множество компонентов СТС;

$\{r_j\}$ – множество отношений между компонентами СТС;

$\{R_k\}$ – множество иерархических связей между компонентами СТС;

$\{S_h\}$ – множество композиционных свойств СТС, отражающих тип ее структуры.

Процессное описание характеризует процессы, происходящие в СТС, а также способ получения выходных параметров системы при заданных входных воздействиях и конкретной ситуации. Формально это описание будем задавать кортежем

$$PO = \langle T, X, Y, Z, \phi, \mu \rangle, \quad (3)$$

где T – временная метрика функционирования СТС;

X – обобщенное входное воздействие;

Y – обобщенная реакция СТС на входное воздействие;

Z – текущее состояние СТС;

ϕ – оператор входов, представляющий собой отображение вида $\phi: T \times Z = Y$;

μ – оператор переходов или переходная функция системы $X \times Y = Z$.

Информационное описание характеризует проектируемую СТС с точки зрения происходящих в ней процессов приема, обработки, хранения, отображения и передачи информации. Формально это описание задается кортежем

$$IO = \langle I_i, I_p, M_k, U, PI \rangle, \quad (4)$$

где I_i – источники информации;

I_p – получатели информации;

M_k – возможные маршруты движения информации;

U – узлы обработки, хранения и отображения информации;

PI – параметры информации, циркулирующей в СТС.

Формирование, развитие и использование топологического, процессного и информационного описаний осуществляется в форме диалога разработчиков с компьютером. Главным содержанием такого диалога является организация интерактивного режима модельных исследований с помощью комплекса математических моделей: логико-лингвистических, имитационных, оптимизационных и т. д. В тех случаях, когда формализация процессов функционирования отдельных компонентов СКС по каким-либо причинам невозможна или нецелесообразна, такой компонент будет вводиться в модель СКС как ее физический элемент.

Системный взгляд на процесс принятия решений смещает акценты при построении системы управления СТС – первостепенной становится концептуализация, или многоаспектное представление, а разработка алгоритмов и методов выбора альтернативных вариантов становится второстепенной. Этим самым существенно расширяется точка зрения на обеспечение принятия решений, развиваемая в теории ожидаемой полезности, которая опирается на формальные аксиомы предпочтительности

и универсальные алгоритмы многокритериального выбора, но не ориентирована на глубокое проникновение в специфику и существо решаемой проблемы.

Результаты

Предложенная обобщенная структура выбора альтернатив имеет большое прикладное значение с точки зрения решаемой в статье проблемы, так как позволяет на этапах концептуального и формального моделирования рассматриваемой предметной области и ее объектно-ориентированной спецификации обоснованно определить состав и структуру задач, решаемых в создаваемой информационной системе поддержки принятия решений, принимаемых при управлении СТС, определять состав и структуру запросов к соответствующей базе моделей и полимодельных комплексов, возможные схемы декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования) существующих и создаваемых моделей.

Таким образом, при комплексном моделировании СТС требуется проводить разработку и реализацию в рамках каждой конкретной ИСППР своих принципов, методов, моделей и алгоритмов согласования разнородных моделей и критериальных функций, ориентированных на заданную предметную область. Это между тем не исключает возможность использования стандартных унифицированных и легко адаптируемых инструментальных средств (архитектур) комплексного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика / Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев // Учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с. ISBN – 978-5-88070-225-1
2. *Васильев С.Н. и др.* Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федунцов // М.: Физматлит, 2000. – 393 с. ISBN – 978-5-56320-125-1
3. *Valavanis K.P., Saridis G.N.* Intelligent Robotic System Theory: Design and Applications, Kluwer Academic Publishers. – Boston, MA. – 1992.
4. *Алехин Д.А. и др.* Интеллектуальные обратные связи в системе управления полетом / Д.А. Алехин, Ю.Л. Буров, Г. Зарепур, А.Г. Лебедев, Г.Н. Лебедев // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 24. – С. 21-25.
5. *Батищев В.И.* Методы формализации и обобщения непроектируемых структурных элементов в системе многоуровневого анализа транспортной инфраструктуры / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 1(33). – С. 6-11.
6. *Чуваков А.В.* Метод построения многокомпонентной конфигурационной диаграммы сопряжения непроектируемых структурных элементов в системе многоуровневого анализа транспортной инфраструктуры / А.В. Чуваков, Н.Г. Губанов, Е.Ю. Кубрин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 228-232.
7. Военная системотехника и системный анализ: Учебник / Под ред. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999.
8. *Савин Г.И.* Системное моделирование сложных процессов. – М.: Фазис, 2000.
9. *Павловский Ю.А.* Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000.
10. *Тятушкин А.И.* Многометодная технология для расчета оптимального управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2003. – № 3.
11. *Нариньяни А.С.* Программирование в ограничениях и недоопределенные модели // Информационные технологии. – 1998. – № 7. – С. 13-22.
12. *Охтилев М.Ю.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с. – ISBN 5-02-033789-7
13. Толковый словарь по искусственному интеллекту / Авт.-сост. А.Н. Аверкин, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов. – М.: Радио и связь, 2002. – 256 с.
14. *Черноруцкий И.Г.* Методы оптимизации и принятия решений: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2001. – 384 с.
15. *Цыгичко В.Н.* Руководителю о принятии решений / Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 272 с.

16. Дёмин Б.Е. Теоретические основы системного анализа / Б.Е. Дёмин, В.К. Голиков, В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов. – М.: Майор, 2006. – 592 с.
17. Новосельцев В.И. Системный анализ: современные концепции / Изд. 2-е, испр. и доп. – Воронеж: Кварта, 2003. – 360 с.
18. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
19. Дёмин Б.Е. Теория конфликта и ее приложения / М.В. Аржаков, Н.В. Аржакова, Б.Е. Дёмин, В.И. Новосельцев. – Воронеж: Кварта, 2005. – 252 с.

Статья поступила в редакцию 17 июня 2013 г.

THE CONCEPT OF DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM TO SUPPORT DECISION MAKING IN THE MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

N.G. Gubanov, A.V. Chuvakov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100

The generalized structure for the selection of alternatives, which allows for stages of conceptual and formal modeling of complex technical systems, and object-oriented specification reasonably determine the composition and structure of the problems to be solved in the emerging information system to support decision-making and to determine the composition and structure of the query to the appropriate Multiple-based models and complexes.

Keywords: *decision-making systems, management information systems, complex technical systems.*

*Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander V. Chuvakov (Ph.D. (Chem.)), Associate Professor.*

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Н.В. Дилигенский¹, В.И. Немченко¹, М.В. Посашков²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

E-mail: posashkovmv@svgc.ru

Выполнен комплексный анализ действующей организационной структуры многопрофильного предприятия на примере газораспределительной организации (ГРО). Рассмотрено поэтапное преобразование существующей организационной структуры. Сформированы группы критериев, характеризующих сбалансированность, целостность, управляемость и надежность организационной структуры. Проведен анализ эффективности действующей организационной структуры газораспределительной организации и ее модификаций с использованием методологии теории графов.

Ключевые слова: системный анализ, организационная структура, внешняя среда, информационная нагрузка, менеджер высшего звена, менеджер среднего звена, реорганизация, реструктуризация, теория графов, центр принятия решения, целевая функция.

В России после перехода от плановой экономики к рыночной сформировалась конкурентная внешняя среда, определяющая цели, задачи и организационные структуры управления большинства промышленных предприятий. Предприятия, имеющие многоуровневую структуру управления и значительное количество персонала, обладают замедленной реакцией на изменение факторов внешней среды. Конкурентная внешняя среда, имеющая свойство постоянного изменения, требует быстрой адаптации предприятия к новым условиям, что способна обеспечить тщательно продуманная стратегия, сопряженная с диверсификацией производства и реструктуризацией предприятия.

Для разработки стратегии развития предприятия, функционирующего в рыночных условиях, требуется формирование организационных структур управления, способных к самоуправлению и саморазвитию. Создание таких структур возможно посредством комплексной оценки эффективности функционирования предприятия с использованием методов системного анализа.

Системный подход позволяет выполнить комплексную оценку эффективности функционирования предприятия с учетом многих факторов: энергетических, экономических, экологических, потребительских, организационных, нормативно-правовых и других, характеризующих его ретроспективную и текущую деятельность, а также сформировать в условиях рыночной экономики комплекс стратегических мероприятий, обеспечивающих быстрое реагирование на изменение факторов внешней среды.

*Николай Владимирович Дилигенский (д.т.н., проф.).
Владимир Иванович Немченко (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».*

Михаил Викторович Посашков (к.т.н.), доцент.

Целью настоящего исследования является совершенствование существующей организационной структуры предприятия для повышения эффективности его функционирования.

В работе [1] был выполнен комплексный анализ действующей организационной структуры многопрофильного предприятия на примере газораспределительной организации (ГРО), который позволил сделать следующие выводы:

- организационная структура слабо сбалансирована, а неравномерность информационной нагрузки руководителей различного уровня ведет к различной степени обоснованности принятия управленческих решений в разных сферах деятельности;
- организационная структура имеет малое число центров принятия решений – два, что приводит к выработке принципиальных решений по всему спектру вопросов только на высшем уровне и к снижению требований к активности, инициативности и профессионализму руководителей на следующих уровнях иерархии;
- разветвленность и многоуровневость организационной структуры обуславливают низкое качество и надежность управления.

В целом в условиях рыночной экономики при постоянно изменяющихся характеристиках внешней среды базовыми целями для ГРО являются обеспечение высокого качества предоставляемых услуг и надежность функционирования оборудования газотранспортной системы. Для достижения этих целей необходимо совершенствование действующей организационной структуры управления.

Совершенствование существующей структуры ГРО будем выполнять поэтапно. На первом этапе реализуем выравнивание информационной нагрузки руководителей различного уровня, далее проведем увеличение центров принятия управленческих решений, что должно привести к повышению надежности и качества управления предприятием.

Из анализа действующей организационной структуры [1] было выявлено, что наибольшая информационная нагрузка лежит на первом заместителе генерального директора, у которого в непосредственном подчинении находятся 19 руководителей различных подразделений. Поэтому на первом этапе 10 филиалов, находящихся в подчинении у первого заместителя генерального директора, переводим в оперативное управление к заместителю главного инженера, что практически в 2 раза снижает информационную нагрузку на менеджера высшего звена.

Также из анализа действующей структуры ГРО [1] следует, что у других менеджеров высшего звена, руководителей функциональных направлений, находится в оперативном управлении очень малое число подразделений – информационная нагрузка распределена неравномерно.

На втором этапе сокращаем ряд менеджеров высшего звена – заместителей генерального директора с наименьшим числом подразделений, находящихся в оперативном управлении: по корпоративной политике – 1 и по транспортировке газа – 2, которые переходят под руководство соответственно заместителя генерального директора по экономике и заместителя генерального директора по эксплуатации. Группу внутреннего аудита из непосредственного управления генерального директора переводим в подчинение к заместителю генерального директора по правовым вопросам, понижая информационную нагрузку на первого руководителя с 8 до 7 каналов управления.

Третий этап является продолжением второго. Упраздняем должности руководителей следующих функциональных направлений – заместителей генерального директора с минимальным количеством подразделений: по финансам – 2, по транспорту – 1 и правовым вопросам – 3. Подразделения, возглавляемые упраздненными ру-

ководителями, переходят в оперативное управление соответственно к заместителям генерального директора по экономике, эксплуатации и капитальному строительству. Для уменьшения количества иерархических уровней в структуре управления предприятия сокращаем должность первого заместителя генерального директора – структура становится четырехуровневой. Все заместители генерального директора переходят в прямое подчинение к генеральному директору, а отдел торгов и управление комплектации переходят в оперативное управление к заместителю генерального директора по экономике.

Проведенная в три этапа реорганизация действующей структуры ГРО позволила значительно сократить дисбаланс информационной нагрузки между руководителями высших уровней иерархии. Число подразделений, находящихся в управлении у руководителей высшего звена, распределилось следующим образом: у генерального директора – 9; у заместителей генерального директора: по экономике – 5, по эксплуатации – 5, по капитальному строительству – 4, по общим вопросам – 7; у главного инженера – 3, у главного бухгалтера – 4. Информационная нагрузка руководителей функциональных направлений различается в три раза, и принципиальные решения по всему спектру вопросов по-прежнему принимает генеральный директор, что снижает обоснованность этих решений.

Улучшить качество принимаемых управленческих решений позволит привлечение руководителей на следующих уровнях иерархии. Для этого требуется реструктуризация существующей структуры, сопряженная с выделением стратегических направлений деятельности ГРО: оказание услуг по транспортировке природного газа, техническое обслуживание газопроводов и газового оборудования и оказание услуг по газоснабжению вновь подключаемых потребителей. В соответствии с обозначенными стратегическими направлениями деятельности ГРО на четвертом этапе выбираем три управления: транспортировки газа, технической эксплуатации газового оборудования и реализации, которые связываем информационными каналами со всеми менеджерами высшего звена, обеспечивая повышение активности и инициативности руководителей на среднем (третьем) уровне иерархии организационной структуры, а также добавляем горизонтальные связи между подразделениями на различных уровнях: на четвертом – 100, на третьем – 4 и 23 между разными уровнями. Информационная нагрузка на различных уровнях иерархической структуры составляет от 2 на нижнем (отдел эксплуатации газового оборудования) до 11 на среднем (управление реализации). На высшем уровне иерархии число информационных связей варьируется от 8 до 10.

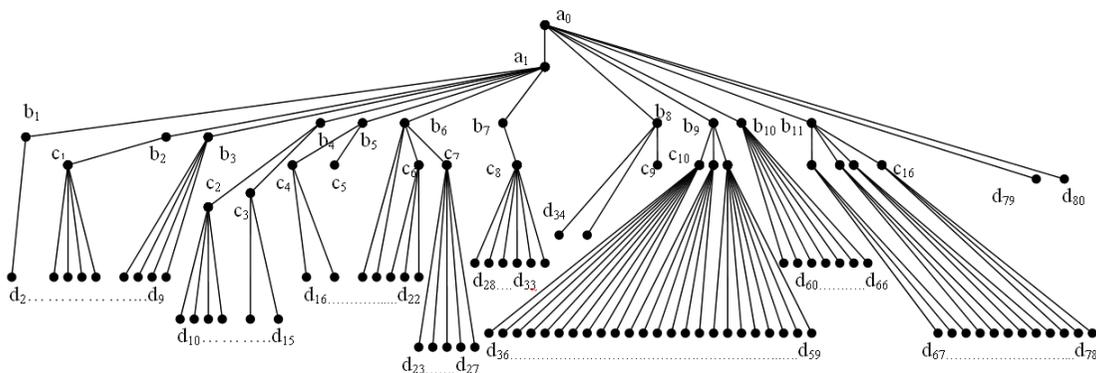
На пятом этапе для уменьшения дисбаланса информационной нагрузки в структуре упраздним должность заместителя генерального директора по экономике с передачей его полномочий заместителю генерального директора по эксплуатации. На высших уровнях иерархии структуры остается шесть руководителей высшего звена с количеством информационных каналов от 7 (у генерального директора) до 10 (у заместителя генерального директора по общим вопросам). Руководители среднего звена (третьего иерархического уровня) имеют от 5 (управление информационных технологий) до 10 (управление реализации) информационных связей. На нижнем уровне число каналов управления колеблется от 2 (спецчасть) до 8 (служба безопасности).

Таким образом, за пять этапов преобразования существующей структуры получены следующие результаты: основные управленческие решения принимаются менеджерами высшего и среднего звена, информационная нагрузка на высшем и сред-

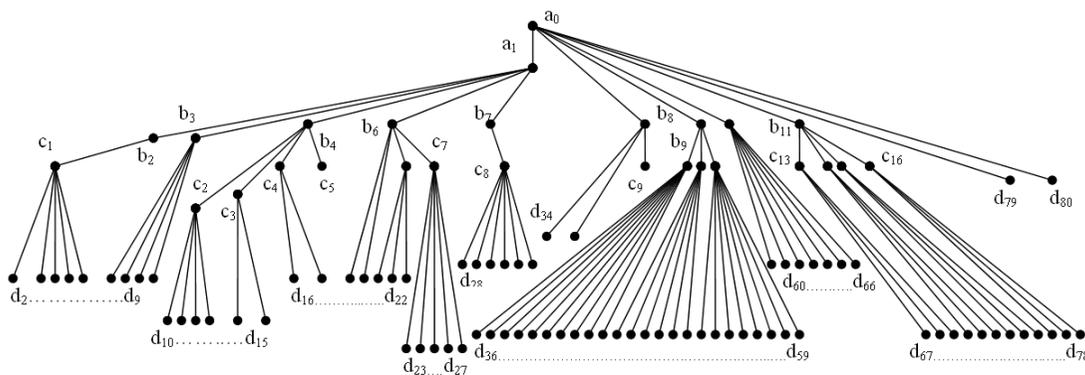
нем уровней структуры отличается не более чем в 2 раза, а в действующей структуре – в 10 раз. Полученная структура представлена на рис. 2.

Для более полной оценки эффективности преобразования существующей структуры применим инструментальные методы теории графов [2], позволяющие определять показатели качества структур и выявлять направления их совершенствования.

Представим полученные на каждом этапе преобразований модифицированные организационные структуры предприятия в соответствии с теорией графов в виде графов G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 (рис. 1 – 5).



Р и с. 1. Модифицированная структура управления ГРО – G_2



Р и с. 2. Модифицированная структура управления ГРО – G_3

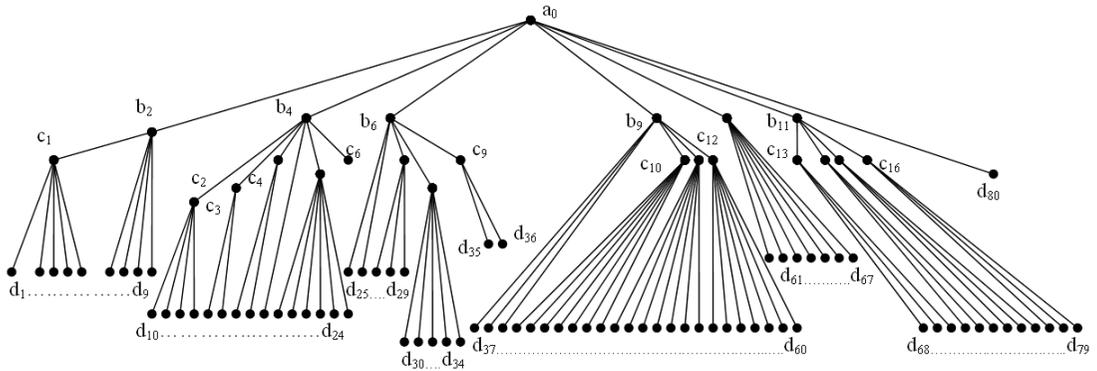
$$G_2 = \{a_0, a_1, b_1, b_2, \dots, b_{11}, c_1, c_2, \dots, c_{16}, d_1, d_2, \dots, d_{80}\} \quad (1)$$

$$G_3 = \{a_0, a_1, b_1, b_2, \dots, b_9, c_1, c_2, \dots, c_{16}, d_1, d_2, \dots, d_{80}\} \quad (2)$$

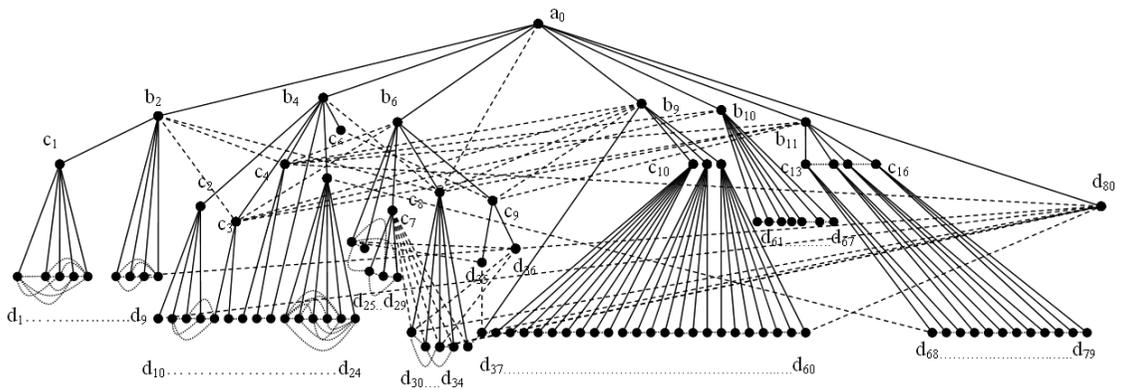
$$G_4 = \{a_0, b_1, b_2, \dots, b_6, c_1, c_2, \dots, c_{16}, d_1, d_2, \dots, d_{80}\} \quad (3)$$

$$G_5 = \{a_0, b_1, b_2, \dots, b_6, c_1, c_2, \dots, c_{16}, d_1, d_2, \dots, d_{80}\} \quad (4)$$

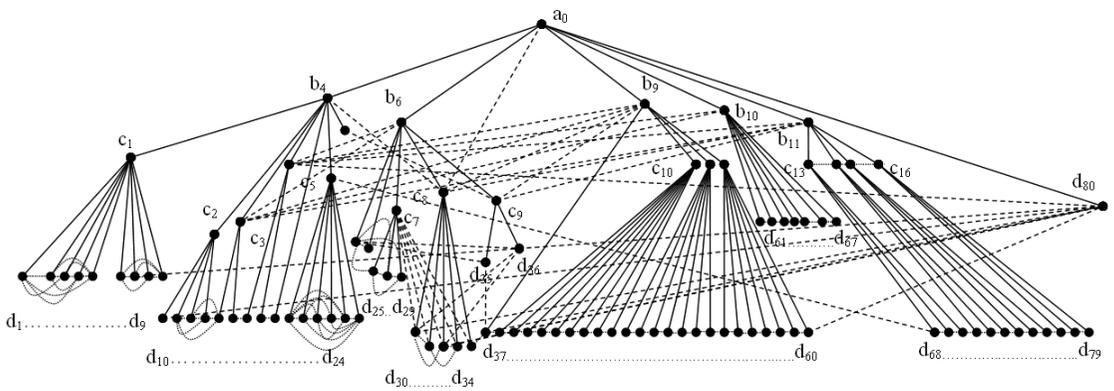
$$G_6 = \{a_0, b_1, b_2, \dots, b_5, c_1, c_2, \dots, c_{16}, d_1, d_2, \dots, d_{80}\} \quad (5)$$



Р и с. 3. Модифицированная структура управления ГРО – G_4



Р и с. 4. Модифицированная структура управления ГРО – G_5



Р и с. 5. Модифицированная структура управления ГРО – G_6

На рис. 1 – 5 вершина a_0 отвечает генеральному директору, a_1 – первому заместителю генерального директора, b_1 – заместителю генерального директора по корпоративной политике, b_2 – заместителю генерального директора по экономике, b_8 – заместителю генерального директора по правовым вопросам, b_9 – главному инженеру и т. д.

Ребра графа $(a_0 a_1)$, $(a_1 b_1)$ $(a_0 b_8)$, $(a_0 b_9)$ и т. д. отвечают управленческим связям организационной структуры: $(a_0 a_1)$ – от генерального директора к первому заместителю генерального директора, $(a_1 b_1)$ – от первого заместителя генерального директора к заместителю генерального директора по корпоративной политике, $(a_0 b_9)$ – от генерального директора к главному инженеру и подобным образом далее.

Графы G_2 , G_3 , как и граф действующей структуры G_1 , представляют собой пятиуровневые иерархические структуры, состоящие из элементов (вершин) $n_2 = 109$, $n_3 = 107$ и ребер $N_2 = 108$, $N_3 = 106$. Графы G_4 , G_5 и G_6 имеют четыре иерархических уровня и состоят соответственно из следующего количества вершин и ребер: $n_4 = 103$ и $N_4 = 102$; $n_5 = 103$ и $N_5 = 229$; $n_6 = 102$ и $N_6 = 225$. Все графы являются неоднородными, нецентрированными, древесными [2], G_5 и G_6 содержат циклы, а G_2 , G_3 и G_4 ациклически.

В соответствии с [1] для анализа графов модифицированных структур G_2 , G_3 , G_4 , G_5 и G_6 используем следующие группы критериев: сбалансированность, целостность, управляемость и надежность.

На основе ранее выполненного первого этапа содержательного анализа модифицированных структур проведем более полный анализ сбалансированности на основе построенных графов. Сбалансированность будем оценивать тремя показателями: информационной нагрузкой на первого руководителя λ_{a_0} – генерального директора, наибольшей информационной нагрузкой элемента организационной структуры $\max \deg(G)$ и степенью неравномерности информационной нагрузки у различных участников управленческой деятельности.

Информационная нагрузка на высшем уровне иерархии – генерального директора – определяется соотношением степени однородности $\deg \{a_0\}$ [2] вершины a_0 – количество ребер графа вершины a_0 к рациональному количеству информационных связей, равному семи [1], и является относительной величиной:

$$\lambda_0 = \lambda_{a_0} = \frac{\deg a_0}{7}. \quad (6)$$

Для графов G_2 , G_3 , G_4 , G_6 этот показатель равен $\lambda_{a_0} = 1$, т. е. информационная нагрузка соответствует нормативной, а в G_5 $\lambda_{a_0} = 1,14$ – генеральный директор имеет информационную перегрузку в 14 %.

Максимальное количество управленческих связей в модифицированных структурах составляет: $\max \deg(G_2) = \max \deg(G_3) = \deg \{c_{10}\} = 11$; $\max \deg(G_4) = \deg \{b_{10}\} = \deg \{c_{10}\} = \deg \{c_{11}\} = \deg \{c_{12}\} = 8$; $\max \deg(G_5) = \deg \{c_8\} = 11$; $\max \deg(G_6) = \deg \{b_{10}\} = \deg \{c_8\} = \deg \{c_{10}\} = 10$. Информационная перегрузка будет иметь следующие значения: для структур G_2 , G_3 , G_5 – 57 %, для G_6 – 43 % и для G_4 – 14 %. Максимальная информационная нагрузка в структуре снизилась в два раза – с 20 до 10.

Минимальное число информационных каналов в анализируемых структурах составило: $\min \deg(G_2) = \min \deg(G_3) = \min \deg(G_4) = 1$, например $\deg \{d_1\} = 1$; $\min \deg(G_5) = \min \deg(G_6) = 2$, например $\deg \{d_{61}\} = 2$.

В соответствии с этим степень неравномерности распределения информационной нагрузки $\bar{\lambda}$, характеризуемая отношением максимальной и минимальной степени однородности вершин графа, рассчитывается по зависимости $\bar{\lambda} = \frac{\max \deg G}{\min \deg G}$.

Рассчитаем значения неравномерности распределения информационной нагрузки в рассматриваемых структурах: $\bar{\lambda}_2 = 11/1 = 11$; $\bar{\lambda}_3 = 11/1 = 11$; $\bar{\lambda}_4 = 8/1 = 8$; $\bar{\lambda}_5 = 11/2 = 5,5$; $\bar{\lambda}_6 = 10/2 = 5$. Видно, что с каждым этапом преобразования действующей структуры дисбаланс распределения информационной нагрузки уменьшается и в итоге снижается в четыре раза – с 20 [1] до 5.

Таким образом, в процессе реструктуризации оценка сбалансированности организационной структуры по показателю информационной нагрузки первого руководителя соответствует рациональному количеству управленческих связей – 7; по двум другим показателям – максимальной информационной нагрузке и степени неравномерности информационной нагрузки – произошли существенные улучшения.

Компактность архитектуры организационной структуры характеризует ее целостность, которую будем оценивать тремя частными критериями: диаметром графа $d(G)$, радиусом графа $r(G)$ и числом центров графа m .

Диаметр графа $d(G)$ характеризует наибольшую длину кратчайшей цепи, связывающей две вершины, – максимальное расстояние между двумя его вершинами a и b :

$$d(G) = \max_{a,b \in V(G)} d(a,b), \quad (7)$$

где a и b – произвольные вершины графа, $V(G)$ – множество всех вершин, $d(a,b)$ – расстояние между вершинами a и b .

Он определяет максимальную длину маршрута, необходимого для передачи информации от наиболее удаленного подразделения в центр принятия управленческих решений и передачи принятого управленческого решения другому наиболее удаленному подразделению организации. Для структур G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 диаметр графа равен $d(G_2) = d(G_3) = 7$ (цепь $d_2c_1b_2a_1a_0b_9c_{10}d_{36}$); $d(G_4) = 6$ (цепь $d_2c_1b_2a_0b_9c_{10}d_{40}$); $d(G_5) = 6$ (цепь $d_2c_1b_2a_0b_9c_{10}d_{40}$); $d(G_6) = 6$ (цепь $d_2c_1b_4a_0b_9c_{10}d_{40}$). В результате сокращения должности первого заместителя генерального директора максимальная длина управленческой цепи уменьшилась с семи до шести, что позволит быстрее получать и передавать информацию.

Радиус графа $r(G)$ характеризует наименьшее из максимальных значений расстояний от фиксированной вершины a до всех вершин графа $V(G)$:

$$r(G) = \min_{a \in V(G)} \max_{b \in V(G)} d(a,b). \quad (8)$$

Он определяет длину маршрута передачи информации от центра принятия решений. Для анализируемых структур радиус равен $r(G_2) = r(G_3) = 4$ (например цепь для вершины $a_0 - a_0a_1b_7c_8d_{28}$); $r(G_4) = r(G_5) = r(G_6) = 3$ (цепь для вершины $a_0 - a_0b_6c_8d_{30}$). Уменьшение радиуса структуры с четырех до трех сократит время передачи информации из центра принятия решений до наиболее удаленного подразделения.

Центрами являются важнейшие вершины графа организационной структуры, где формируются основные управленческие решения. Центром графа является вершина, для которой выполняется следующее условие:

$$r(G) = \max_{b \in V(G)} d(a, b) = \min_{a \in V(G)} \max_{b \in V(G)} d(a, b). \quad (9)$$

Центр графа отвечает минимизации расстояния $d(a, b)$ до самой удаленной вершины множества $V(G)$. Анализ структур графов G_2 и G_3 показывает, что они имеют два центра – вершину a_0 , соответствующую генеральному директору компании, и вершину a_1 , отвечающую первому заместителю генерального директора. Структура G_4 обладает только одним центром – вершиной a_0 . Для рассмотренных графов расстояние от каждой вершины центра до самых удаленных вершин не превышает четырех. Видно, что вершины, определяющие центры графов G_2, G_3, G_4 , находятся на высшем уровне иерархии. В структурах G_5 и G_6 – четыре центра: вершины a_0, c_3, c_4 и c_8 , которые соответствуют генеральному директору и начальникам трех управлений (технической эксплуатации газового оборудования, транспортировки газа и реализации). Расстояние от всех вершин до наиболее удаленных подразделений не превышает трех.

Эффективность архитектуры организационной структуры тем выше, чем меньше диаметр графа $d(G)$ и разница между диаметром и радиусом $r(G)$ графа, и чем больше число центров графа m . Для рассматриваемой организационной структуры в результате реструктуризации величины $d(G)$ и $d(G) - r(G)$ уменьшились на единицу, но по-прежнему достаточно велики, а m возросло в 2 раза, что значительно улучшило качество существующей структуры.

Для анализа управляемости структуры применим следующие критерии: удельное число информационных каналов и количество замкнутых контуров управления.

Удельное число информационных каналов N/n , где N – число ребер и n – число вершин, характеризует потенциал управления организационной структуры. Чем выше удельное число каналов управления, тем больше число управленческих связей, приходящихся на одного руководителя, и более эффективна система управления. Удельное число информационных каналов для модифицированных графов составит $N_2/n_2 = 108/109 = 0,99$; $N_3/n_3 = 106/107 = 0,99$; $N_4/n_4 = 102/103 = 0,99$; $N_5/n_5 = 229/103 = 2,22$; $N_6/n_6 = 225/102 = 2,21$. Видно, что в структурах G_2, G_3 и G_4 на одного руководителя приходится менее одной управленческой связи, а по итогам реструктуризации количество информационных связей выросло более чем в 2,3 раза, на что указывают полученные значения для графов структур G_5 и G_6 .

Количество замкнутых контуров управления (циклов) $v(G)$ характеризует эффективность принятия управленческих решений. Чем больше замкнутых контуров, тем выше качество управления. Графы G_2, G_3 и G_4 , представленные на рис. 6, 7 и 8, имеют вид дерева и являются ациклическими, поэтому количество замкнутых контуров $v(G_2) = v(G_3) = v(G_4) = 0$ – самый низкий из возможных показателей управляемости по этому критерию.

Для плоских связных графов G_5 и G_6 , содержащих циклы, количество замкнутых контуров рассчитывается по формуле Эйлера [2]

$$v = N - n + 2. \quad (10)$$

Число замкнутых контуров для структур составит $v(G_5) = 128$; $v(G_6) = 125$. Появление значительного количества циклов в структурах гарантирует высокое качество и эффективность принятых управленческих решений.

Надежность организационной структуры, характеризующую сохранение работоспособности системы управления при потере некоторого количества структурных элементов, будем оценивать следующими критериями.

1. Число реберной связности $\gamma(G)$ – характеризует надежность передачи управленческих воздействий в организационной структуре. Число реберной связности определяется как наименьшее количество ребер, удаление которых приведет к несвязному или тривиальному графу. Для рассматриваемых структур $\gamma(G_2) = \gamma(G_3) = \gamma(G_4) = 1$ – низкий показатель, и в случае потери информационной связи между двумя любыми вершинами прекращается управление по всему множеству оборванных каналов. У двух последних структур надежность передачи информации повысилась на 100 % – $\gamma(G_5) = \gamma(G_6) = 2$.

2. Число внутренней устойчивости (или число независимости) $\alpha(G)$ – характеризует количество вершин в наибольшем максимальном внутренне устойчивом множестве графа G . Множество внутренней устойчивости графа – это совокупность несмежных вершин, и оно определяет множество независимости участников управленческой деятельности. Чем больше число внутренней устойчивости α , тем больше степеней свободы имеет организационная структура, тем выше компетентность и профессионализм в выработке управленческих воздействий и меньше вероятность появления ошибок управления. Наибольшим независимым множеством вершин в графе G_2 является $b_2b_4b_7b_9b_{11}c_5c_9d_1\dots d_{80}$. В соответствии с этим число внутренней устойчивости структуры $\alpha(G_2) = 87$ – 80 % от общего количества структурных элементов, и организационная структура обладает достаточно высокой степенью независимости. Для остальных структур число внутренней устойчивости составит: $\alpha(G_3) = 86$ с вершинами $b_2b_7b_9b_{11}c_5c_9d_1\dots d_{80}$; $\alpha(G_4) = 82$ с вершинами $b_{11}c_6d_1\dots d_{80}$; $\alpha(G_5) = \alpha(G_6) = 38$ с вершинами $b_6b_{11}c_6d_5d_6d_{10}d_{11}d_{14}d_{16}d_{18}d_{28}d_{31}d_{33}d_{34}d_{35}d_{36}d_{38}d_{40}d_{42}d_{44}d_{46}d_{47}d_{49}d_{51}d_{53}d_{55}d_{57}d_{59}d_{61}d_{63}d_{64}d_{66}d_{68}d_{70}d_{72}d_{74}d_{76}d_{78}$.

3. Число внешней устойчивости (или число доминирования) $\beta(G)$ – определяет количество вершин, входящих в наименьшее множество внешней устойчивости. Подмножество вершин графа V является внешне устойчивым, или доминирующим, если каждая вершина графа G смежна с некоторой вершиной из V ; иначе говоря, каждая вершина графа находится на расстоянии не более 1 от доминирующего множества. Принадлежность к доминирующему множеству характеризует надежность обеспечения информацией всех участников управленческой деятельности, которая тем выше, чем меньше наименьшее доминирующее множество и, соответственно, число внешней устойчивости β .

Анализ графов показал, что с каждым этапом реструктуризации существующей структуры число внешне устойчивого множества постепенно уменьшается от $\beta(G_2) = 22$ ($a_0a_1b_1b_3b_5b_6b_8b_{10}c_1c_2c_3c_4c_6c_7c_8c_{10}c_{11}c_{12}c_{13}c_{14}c_{15}c_{16}$) до $\beta(G_6) = 17$ с множеством $V(b_4b_9b_{10}c_1\dots c_5c_7c_{10}\dots c_{16}d_{25})$. Снижение числа ключевых лиц, принимающих управленческие решения, с каждым этапом преобразования существующей структуры характеризует повышение надежности при потере некоторого количества структурных элементов.

Полученные значения частных критериев качества действующей организационной структуры ГРО и ее модификаций приведены в таблице.

Таким образом, анализ полученной организационной структуры на основе использования методологии теории графов позволил сделать следующие основные выводы:

– организационная структура стала более сбалансированной – неравномерность информационной нагрузки руководителей различных уровней снизилась, что обеспечивает большую степень обоснованности принятия управленческих решений в разных сферах деятельности;

– организационная структура получила большее число центров принятия решений – четыре, что позволяет вырабатывать принципиальные решения по всему спектру вопросов не только на высшем уровне, но и на среднем, повышая активность, инициативность и возможность использования профессионализма руководителей среднего звена;

– качество и надежность управления в организационной структуре значительно возросли – она стала более мобильной.

Критерии качества организационной структуры

Группы	Критерии	Обозначение	Структуры						Целевая функция
			G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	
Сбалансированность	Информационная нагрузка первого руководителя	λ_0	1,14	1	1	1	1,14	1	<i>min</i>
	Максимальная информационная нагрузка	$\max \deg G_1$	20	11	11	8	11	10	<i>min</i>
	Степень неравномерности информационной нагрузки	$\bar{\lambda}$	20	11	11	8	5,5	5	<i>min</i>
Целостность	Число центров (вершин)	m	2	2	2	1	4	4	<i>max</i>
	Диаметр	d	7	7	7	6	6	6	<i>min</i>
	Радиус	r	4	4	4	3	3	3	<i>min</i>
Управляемость	Число каналов управления	N	108	108	106	102	229	225	<i>max</i>
	Соотношение числа каналов управления и вершин	N/n	0,99	0,99	0,99	0,99	2,22	2,21	<i>max</i>
	Число контуров управления	v	0	0	0	0	128	125	<i>max</i>
Надежность	Число реберной связности	γ	1	1	1	1	2	2	<i>max</i>
	Число внутренней устойчивости	α	87	87	86	82	38	38	<i>max</i>
	Число внешней устойчивости	β	22	22	21	21	18	17	<i>min</i>

В целом в условиях рыночной экономики полученная модифицированная структура с четким выделением стратегических направлений деятельности предприятия более адаптирована к постоянно изменяющимся характеристикам внешней среды и позволит обеспечить высокое качество предоставляемых услуг и надежность функционирования оборудования газотранспортной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дилигенский Н.В.* Комплексная оценка эффективности организационной структуры газораспределительной организации / *Дилигенский Н.В., Немченко В.И., Посашков М.В.* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: СамНЦ РАН, 2012. – Т. 14, №4 (5). – С. 1445-1450.
2. *Харари Ф.* Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 301 с.

Статья поступила в редакцию 3 июня 2013 г.

SYSTEMS APPROACH IN PERFECTING OF ORGANIZATIONAL STRUCTURE OF THE GAS-DISTRIBUTING ORGANIZATION

N.V. Diligenskii¹, V.I. Nemchenko¹, M.V. Posashkov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² Samara State Architectural and Structural University
194, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443001

The complex analysis of operating organizational structure of the versatile enterprise on the example of the gas-distributing organization (GRO) is made. Stage-by-stage transformation of existing organizational structure is considered. Groups of the criteria characterizing balance, wholeness, controllability and reliability of organizational structure are created. The analysis of effectiveness of operating organizational structure of the gas-distributing organization and its modifications with use of methodology of the graph theory is carried out.

Keywords: *systems analysis, organizational structure, environment, informational loading, top manager, manager of an average link, reorganization, restructuring, graph theory, decision-making center, target function.*

*Nikolai V. Diligenskii (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir I. Nemchenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Mikhail V. Posashkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАВОДНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ВЕЙЕРШТРАССА*

А.Е. Касаткин

Самарский государственный университет
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1
E-mail: darantion_yar@mail.ru

Заводнение является вторичным методом добычи нефти и обеспечивает высокие уровни нефтеотдачи за счет закачки в нефтеносный пласт воды, вытесняющей нефть. Актуальными являются задачи повышения эффективности заводнения, в том числе за счет оптимального подбора схемы расстановки добывающих скважин и нагнетательных, заполняющих горную породу вытесняющим агентом. В настоящей работе предлагается программно реализованный метод количественной и качественной оценки т.н. моделей заводнения: при этом воображаемое месторождение моделируется однородным бесконечным плоским пластом, покрытым двоякопериодической решеткой с добывающими и нагнетательными скважинами в ячейках, а скорость фильтрации описывается с помощью дзета-функции Вейерштрасса.

Ключевые слова: заводнение, двоякопериодическая решетка, дзета-функция Вейерштрасса, водонефтяной контакт, обводнение скважин, коэффициент извлечения нефти.

Введение

Вторичные интенсивные методы добычи нефти в настоящее время остаются наиболее перспективным средством развития нефтяной промышленности: их высокая эффективность связана в первую очередь с нагнетанием в нефтеносный пласт т. н. вытесняющих агентов, вытесняющих нефть из породы. Исторически первым вторичным методом, случайно открытым в середине 1860-х гг. [1], стало заводнение: рабочими штата Пенсильвания было установлено, что вода, нагнетаемая извне, способна восстановить упавшее пластовое давление. Новая технология была испытана также на территории нескольких других штатов в первой половине XX в. и в настоящее время обеспечивает 50 % добываемой США нефти [1].

Прогнозирование хода заводнения, создание программного комплекса для количественной и качественной оценки схем расстановки скважин – цель настоящего исследования.

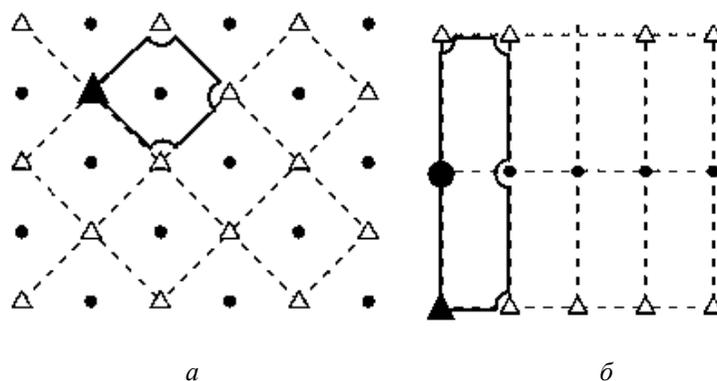
Соответствующая ей задача заключалась в разработке программного средства для мониторинга границы водонефтяного контакта (ВНК), расширяющейся с течением времени. Работа программы предполагала получение качественных и количественных оценок эффективности схем заводнения. Результатами вычислений должны были стать наглядные картины движения воды (вытесняющего агента) с течением времени, а также значения некоторых количественных параметров (времени обводнения добывающих скважин, коэффициента извлечения нефти (КИН) и т.д.).

Для выполнения поставленной задачи требовалось построить модель нефтеносного пласта, а затем математически описать процессы фильтрации жидкостей в нем и распространения границы ВНК с течением времени.

* Работа поддержана грантом РФФИ 13-01-97008-р_поволжье_a)
Андрей Евгеньевич Касаткин, аспирант.

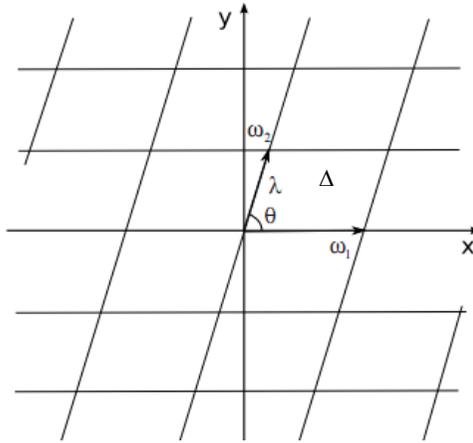
Математическая модель

Построение модели нефтеносного пласта и выявление ее особенностей как области определения функции скорости – первый этап в представлении нефтяного месторождения, подверженного заводнению. Как известно [2], в нефтяной промышленности используются несколько вторичных методов добычи, разделяемых по разным признакам. В частности, выделяют рядные и площадные схемы заводнения, особенности которых определяют их применение на тех или иных участках разработки. Так, рядные модели обладают большей устойчивостью к отказам в работе скважин и оказывают более равномерное воздействие на месторождение, однако площадные, обладающие меньшей зоной охвата, учитывают больше деталей в строении пласта и позволяют распределить влияние заводнения по его (пласта) участкам наиболее рационально за счет своей «компактности». С развитием практики и теории нефтедобычи актуальными становятся вопросы повышения эффективности тех или иных методов: так, некоторыми авторами [3] предлагаются меры по повышению интенсивности разработки за счет видоизменения схем заводнения, что увеличивает их возможное число. Тем не менее можно выделить общее качество, объединяющее все виды этих моделей: независимо от их сложности и направленности при использовании всякой схемы расстановки скважин последние размещаются на месторождении в определенном порядке. Этот порядок обеспечивает периодичность во взаимном расположении скважин: при взгляде «сверху» пласт словно покрывается сеткой из ячеек – повторяющихся элементов у схем заводнения (рис. 1).



Р и с. 1. Пример площадной (а) и рядной (б) схем заводнения: добывающие скважины обозначены кружками, нагнетательные – треугольниками. Жирные контуры выделяют повторяющиеся элементы во взаимном расположении скважин – эти же элементы можно представить ячейками воображаемой решетки, покрывающей месторождение

Итак, после ознакомления с особенностями рассматриваемого метода нефтедобычи можно перейти к моделированию зоны разработки: в рамках настоящей задачи нефтесодержащий пласт представляется однородным, фиксированной толщины, имеющим вид плоскости в комплексных координатах, покрываемой сеткой из добывающих и нагнетательных скважин. Для описания последней (сетки) математический аппарат располагает специальным средством – это т. н. двоякопериодическая решетка [4, 5]. На рис. 2 показан фрагмент указанной структуры с выделенной ячейкой.



Р и с. 2. Фрагмент двоякопериодической решетки L канонической формы (одна из осей направлена вдоль OX). Типичная ячейка, образованная векторами ω_1 и ω_2 , имеет вид параллелограмма

Как видно из изображения, решетка L формируется набором узлов, образуемых векторами ω_1 и ω_2 . На рисунке представлен т. н. «канонический» случай, при котором ω_1 совпадает с горизонтальной осью, а ω_2 описывается следующим образом: $\omega_2 = \lambda e^{i\theta}$. Здесь λ представляет длину второго вектора ω_2 , θ – угол между ω_2 и осью OX , а Δ соответствует площади ячейки, имеющей вид параллелограмма. Отдельно следует указать вид узлов ω , задающих решетку: $\omega = m\omega_1 + n\omega_2$ ($m, n \in \mathbb{Z}$). Благодаря использованию L и бесконечности границ пласта область исследования может быть сужена до одной ячейки, процессы в которой дублируются в ее соседях. В то же время указанное свойство решетки накладывает определенное ограничение на поведение определяемых на ней функций, а именно – соблюдение двоякой периодичности.

Подобное выражение для скорости фильтрации было описано в работе [4, 5], в которой использовалась двоякопериодическая решетка с одиночной добывающей скважиной в ячейке. Соответствующая ей формула представлена ниже:

$$v(z, \bar{z}) = -\frac{Q}{2\pi h} (\overline{\zeta(z)} + \alpha \bar{z} - \beta z). \quad (1)$$

Здесь $\zeta(z) = \frac{1}{z} + \sum_{n,m=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{z-\omega} + \frac{1}{\omega} + \frac{z}{\omega^2} \right)$ – дзета-функция Вейерштрасса [4, 5];

$\beta = \frac{\pi}{\Delta}$ и $\alpha = \frac{\beta \bar{\omega} - 2\zeta(\omega/2)}{\omega}$ – числовые параметры; Δ – площадь ячейки; Q – мощность добывающей скважины; h – толщина пласта; ω – узел решетки L ($\omega = m\omega_1 + n\omega_2/m, n \in \mathbb{Z}$) [4, 5]. Важно отметить, что именно величины α и β обеспечивают двоякопериодичность функции $v(z, \bar{z})$. Таким образом, выражение (1) может быть использовано для описания течения жидкости в открытом нефтеносном пласте толщины h , разрабатываемом системой добывающих скважин одинаковой мощности Q : последние располагаются в узлах покрывающей месторождение двоякопериодической решетки L . Линейный характер формулы (1) позволяет легко обобщить ее на случай размещения нескольких скважин в одной ячейке. Кроме того, рассматриваемое выражение для скорости $v(z, \bar{z})$ также позволяет учесть направленность работы

скважин: добывающие отмечаются знаком «минус» перед соответствующим им слагаемым, нагнетательные – знаком «плюс». Формула (2) демонстрирует итоговый вид функции скорости, принятый в решаемой задаче после всех указанных модификаций выражения (1):

$$v(z, \bar{z}) = -\sum_{u=1}^{n_1} \frac{Q_u^{(prod)}}{2\pi} (\bar{\zeta}(z - z_u, \overline{z - z_u}) + a\overline{(z - z_u)} - \beta(z - z_u)) + \sum_{w=1}^{n_2} \frac{Q_w^{(inject)}}{2\pi} (\bar{\zeta}(z - z_w, \overline{z - z_w}) + a\overline{(z - z_w)} - \beta(z - z_w)). \quad (2)$$

Здесь n_1 и n_2 – число добывающих (мощности Q_u) и нагнетательных (мощности Q_w) скважин соответственно, размещенных в точках z_u и z_w (u и w – индексы сумм).

Методика решения

В ходе рассуждений, описанных в предыдущем разделе, были сформированы компоненты общей модели, описывающей предмет исследования. С завершением подготовительного этапа решения можно приступить к следующей стадии – формулированию уравнений, способных представить движение границы ВНК. Весьма удобно представить фронт заводнения в виде совокупности точек, образованных кривыми течения нагнетаемой воды в определенный момент времени. Объединение линий тока жидкости, проникающей в пласт через ствол нагнетательной скважины, образует т. н. «водяное пятно», граница которого совпадает с границей водонефтяного контакта согласно «поршневой» модели вытеснения нефти [6]. Итоговая система уравнений, позволяющая определить кривые движения воды, а следовательно, и отследить распространение границы ВНК, представлена ниже:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{\partial \bar{z}}{\partial t} &= v(z); \\ z_{t=0} &= z_0 + r_w e^{i\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

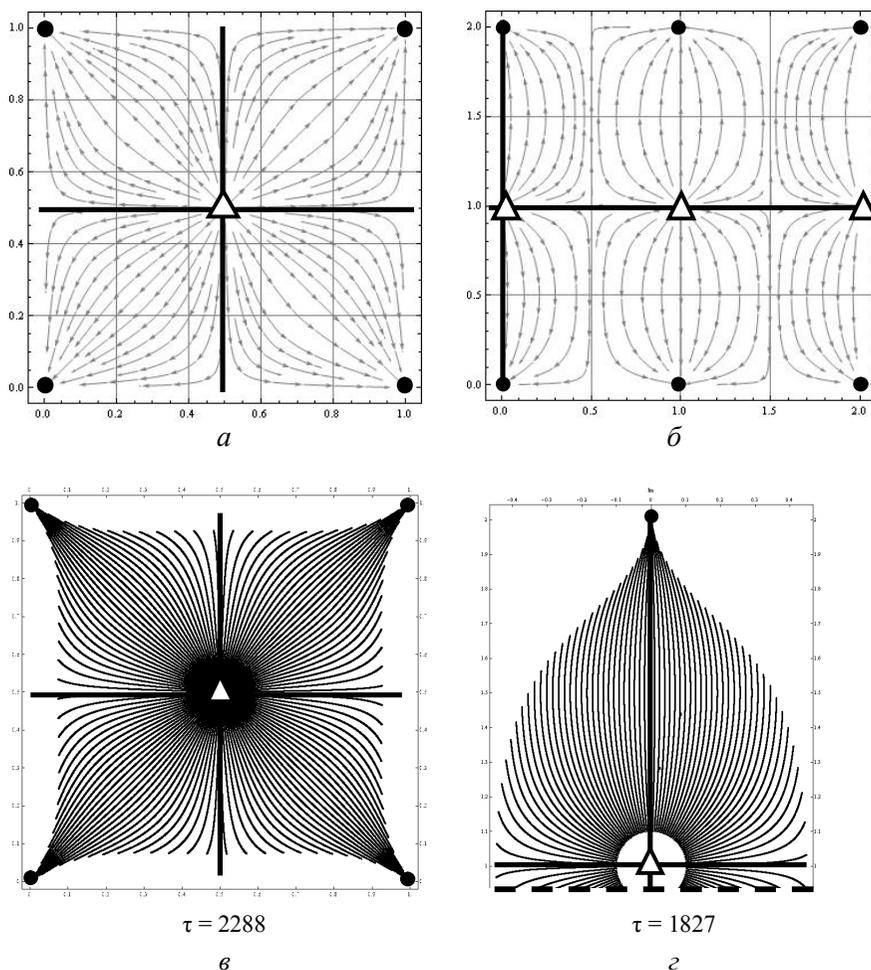
Здесь m – пористость пласта, z_0 – центр призабойной зоны радиуса r_w нагнетательной скважины, сквозь которую в месторождение поступает вода. Выражение для $v(z)$ совпадает с формулой (2). Угол θ используется для построения кривых движения воды: изменяя значение θ в диапазоне $[0, 2\pi)$, можно перемещаться вдоль края ствола нагнетательной скважины, от одной траектории течения к другой, а величина $\Delta\theta$ определяет их (траекторий) суммарное число. Нарастив параметр θ с шагом $\Delta\theta$, можно построить несколько решений задач Коши, аналогичных (3): объединение вычисляемых траекторий течения образует т. н. «водяное пятно», граница которого совпадает с границей ВНК в выбранный момент времени. В качестве переменной интегрирования удобно ввести т. н. безразмерное время τ , связанное с реальным (t) следующим соотношением: $\tau = mQt / h |\omega_1^2|$.

Для численного интегрирования системы (3) использовались методы Рунге – Кутты, измененные с учетом комплексной природы переменных, входящих в уравнения.

Результаты

На рис. 3 представлен ряд картин фронта заводнения, полученных при обработке нескольких схем из рис. 1: круги соответствуют добывающим скважинам, а треугольники – нагнетательным. Для удобства местоположение «притоков» (нагнетательных скважин) дополнительно отмечено перекрестием черных сплошных линий.

На рисунке представлены картины течения закачиваемой в пласт воды, построенные для пятиточечной и однорядной линейной схем расстановки скважин. Первый ряд изображений демонстрирует движение линий тока, вдоль которых осуществлялось интегрирование; ниже расположены «снимки» «водяного пятна» для каждой схемы в момент прорыва воды в добывающие скважины. В довершение следует отметить качественное совпадение результатов как с итогами численных расчетов [7], так и с экспериментальными данными [8] других авторов, занятых решением схожих задач.



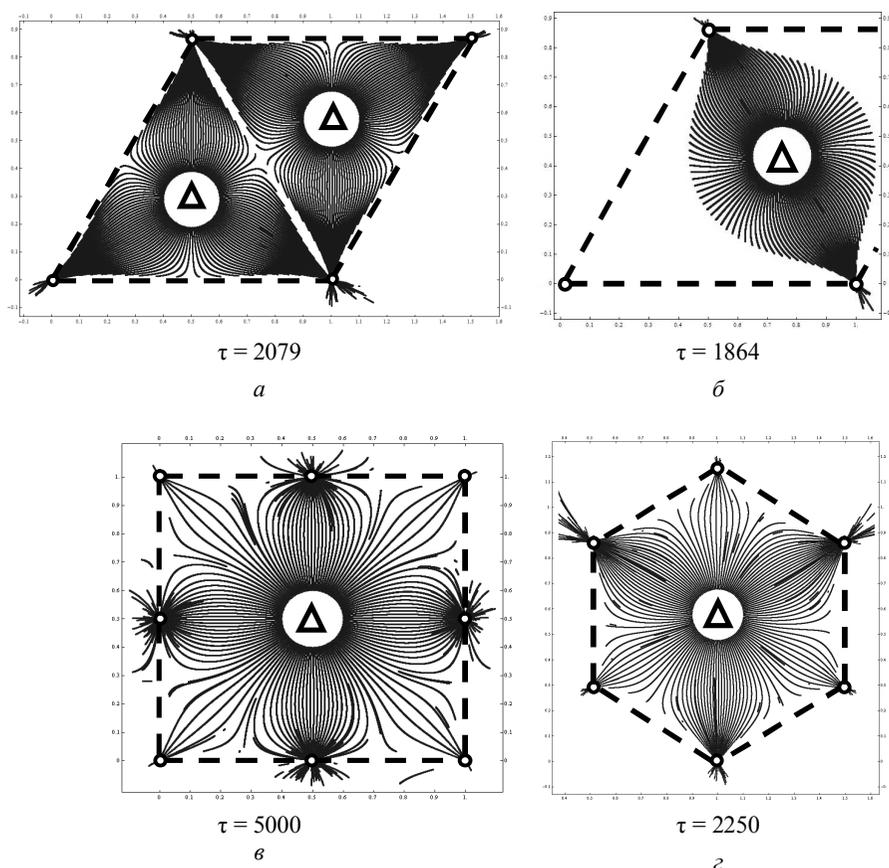
Р и с. 3. Картины фронта заводнения, построенные для пятиточечной (а, в) и однорядной линейной (б, г) схем расстановки скважин. Значения τ отражают моменты прорыва воды в добывающие скважины. Траектории движения жидкости обозначены кривыми, направленными от нагнетательных (треугольники) скважин к добывающим (кружки)

Заключение

Оценочный потенциал программного комплекса, создаваемого в рамках решения задачи, включает как качественный, так и количественный аспект сравнения. При использовании разрабатываемого программного средства возможен сравнительный анализ различных схем заводнения, включая как визуальную, так и строго числовую оценку их эффективности. При этом в качестве числовых критериев в на-

стоящий момент приняты *время начала обводнения добывающих скважин*, после которого нагнетание воды следует прекратить¹, а также *коэффициент извлечения нефти*²: важно отметить отсутствие (на данный момент) программной реализации расчета КИН, что предполагается сделать в следующей версии программы.

На рис. 4 представлен пример сравнения схем заводнения с использованием вышеуказанных количественных критериев. На рисунке изображена граница ВНК для четырехточечной (а) и скошенной пятиточечной (б) моделей в момент прорыва воды, а также вид водяного пятна для девятиточечной (в) и семиточечной (г) схем на стадии, когда вода достигла всех добывающих скважин. В отличие от предыдущего изображения на рис. 5 дополнительно нанесены границы ячейки решетки L (жирный пунктир).



Р и с. 4. Сравнительный анализ нескольких схем заводнения: траектории движения воды обозначены кривыми, направленными от нагнетательных скважин (треугольники) к добывающим (кружки); жирный пунктир очерчивает границы ячейки решетки L

Визуально оценивая КИН на снимках верхнего ряда, нетрудно убедиться в пре-

¹ В рамках настоящей модели предполагается, что в последующий водный период [2] разработки объемы извлекаемой нефти будут незначительными.

² КИН представляет собой отношение площади заводненной области к площади исследуемого участка, и используется для оценки неизвлекаемых нефтяных запасов [1].

имуществе варианта *a*, при котором нагнетаемая жидкость заполняет почти всю ячейку. Сравнение значений τ на картинах нижнего ряда говорит о большей скорости семиточечной схемы, обеспечивающей более быстрый результат, нежели девятиточечная.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Уолкотт Д.* Разработка и управление месторождениями при заводнении. – М., 2001.
2. *Желтов Ю.П.* Разработка нефтяных месторождений: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1998. – 465 с.: ил.
3. *Горбатилов В.А., Костюченко С.В., Пальянов А.П.* Технология дискретных закачек – основа для модернизации систем ППД и совершенствования методов заводнения нефтяных залежей // Вестник инженерингового центра ЮКОС, 2001. – № 2. – С. 45-53.
4. *Астафьев В.И., Ротерс П.В.* Моделирование двоякопериодических систем добывающих скважин // Вестник СамГУ, 2010. – Т. 78. – № 4. – С. 5-11.
5. *Астафьев В.И., Ротерс П.В.* Моделирование двоякопериодических систем добывающих скважин. 2. Коэффициент продуктивности // Вестник СамГУ, 2011. – Т. 89. – № 8. – С. 118-127.
6. *Щелкачев В.Н., Ланук Б.Б.* Подземная гидравлика: Учеб. пособие для студентов нефтегаз. спецтей. – М., Ижевск: РХД, 2001.
7. *Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г., Якобовский М.В.* Моделирование процессов нефтедобычи на многопроцессорных вычислительных системах. – МСЦ РАН, 2001.
8. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде / Пер. с англ. – М.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2013 г.

WATERFLOODING PROCESS MODELING USING BY WEIERSTRASS ELLIPTIC FUNCTIONS

A. Y. Kasatkin

Samara State University
1, Pavlov academician st., Samara, 443011

Waterflooding is one among several second oil recovery methods and it produces a high oil recovery rates by injection water into the oil keeping formation. Increasing waterflooding efficiency using by optimal well location scheme is an actual task. To achieve the corresponding goal we propose a program tool for well location schemes compare, both of by quantitative and qualitative characteristics. The program realization based on the oil keeping reservoir pattern represented a homogeneous formation with fixed thickness and infinite borders covering by dual periodical lattice: it includes production and injection wells into her cells. Also this lattice requires dual periodical property from the speed function defined on her cells. So we had used modified Weierstrass dzeta-function to describe oil-water filtering process in modeling reservoir.

Keywords: *waterflooding, dual periodical lattice, Weierstrass dzeta-function, oil-water contact, production well filling, coefficient of oil extraction.*

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Н.В. Коновалова

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: knata2011@yandex.ru

Рассмотрены особенности функционирования инструментального производства предприятия аэрокосмической отрасли. Определены узкие места в организации инструментального производства и предложены пути решения выявленных проблем.

Ключевые слова: планирование, инструментальное производство, календарный план-график, принципы планирования.

В настоящее время происходят глубокие необратимые изменения в организации управления производственной деятельностью промышленных предприятий. Предприятия ради выживания в непрерывно изменяющихся рыночных условиях вынуждены постоянно перестраивать принципы и методы управления, способы планирования и организации работ. Весьма остро стоят проблемы совершенствования управления и планирования перед машиностроительными предприятиями, производящими сложную наукоемкую продукцию.

На примере ведущего предприятия аэрокосмической отрасли ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» рассмотрим задачи повышения эффективности оперативного планирования инструментального хозяйства, занимающего ведущее место в системе технического обслуживания производства. От степени совершенства инструментального производства, эффективности обеспечения рабочих мест инструментом и технологической оснасткой существенным образом зависят важнейшие показатели эффективности работы предприятия – производительность труда, качество продукции, ритмичность производства, себестоимость изделий и др.

Структура информационных взаимодействий организационной системы управления ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» представлена на рис. 1. Она представляет собой сложную производственно-экономическую систему, состоящую из основных, вспомогательных и обслуживающих цехов.

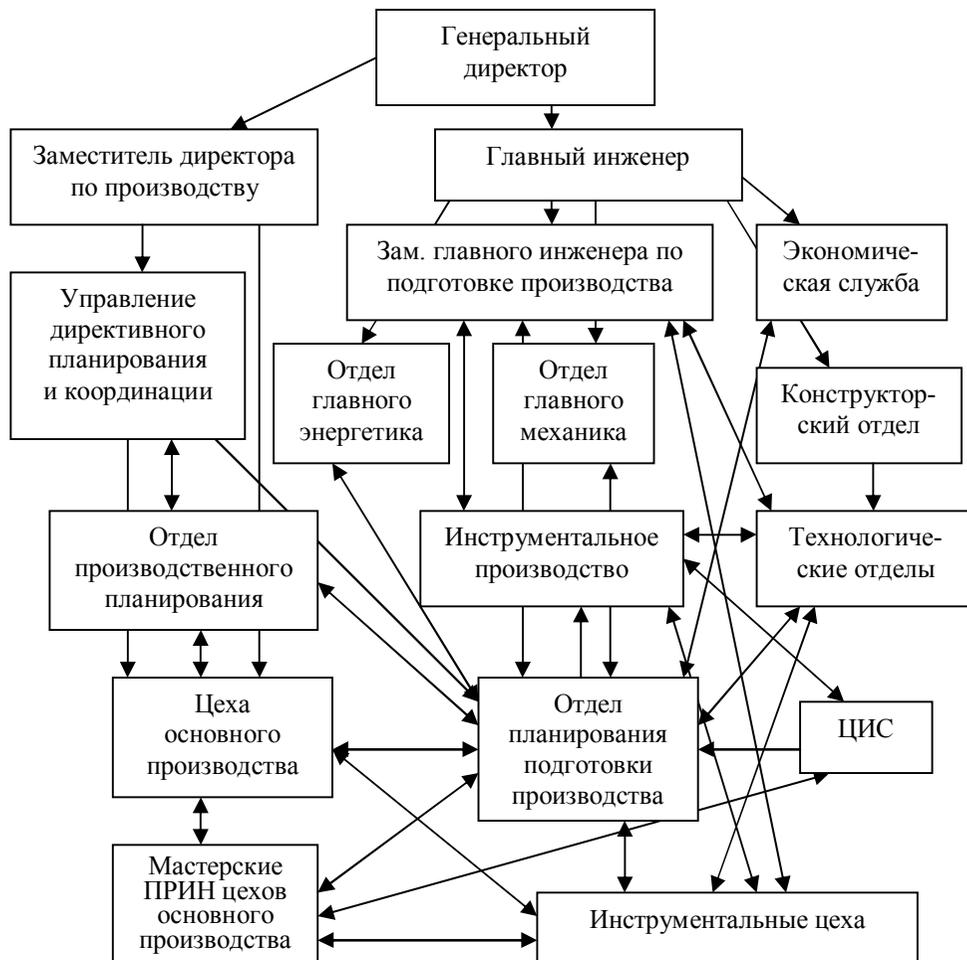
В системе технического обслуживания производства инструментальное производство занимает одно из ведущих мест. Сложность организации и планирования инструментального производства и эксплуатации инструмента обуславливается огромной номенклатурой оснастки, высоким требованием к ее качеству, износостойкости и большим влиянием качества подготовки производства в целом на экономику предприятия.

Анализ работы инструментальных цехов показал, что среди проблем повышения эффективности оперативно-производственного планирования одними из наиболее актуальных являются проблемы контроля и регулирования многономенклатурного инструментального производства на машиностроительных предприятиях.

В настоящее время планирование работы сводится в основном к ранжированию и отбору дефицитных заказов по всей номенклатуре планового периода. Контроль

над установленными календарными сроками выпуска заказов практически не ведется. Это резко снижает эффективность системы оперативно-производственного планирования и приводит к тому, что дефицит или срочные заказы постоянно присутствуют в реальной производственной деятельности.

Также недостаточно эффективна работа системы сбора информации, необходимой для обеспечения более точного планирования.



Р и с. 1. Структура информационных взаимодействий в организационной системе управления ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Рассчитаем нормированную оценку информационной емкости подразделений:

$$K_{н.оц.} = \frac{\sum_{i=1}^n (In_i + Out_i)}{n}, \quad (1)$$

где In_i – количество входных информационных потоков по подразделению;

Out_i – количество выходных информационных потоков по подразделению;

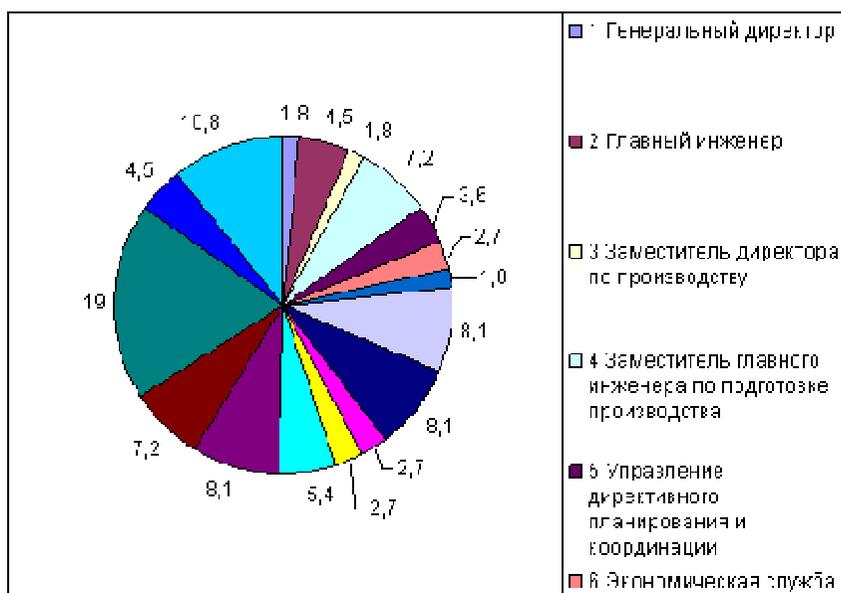
n – общее количество подразделений.

В табл. 1 представлены результаты расчетов информационной емкости подразделений структуры, представленной на рис. 1.

Таблица 1

Информационная емкость подразделений

№ п/п	Подразделение	Вход	Выход	Сумма	Нормированная оценка, %
1	Генеральный директор	–	2	2	1,8
2	Главный инженер	–	5	5	4,5
3	Заместитель директора по производству	–	2	2	1,8
4	Заместитель главного инженера по подготовке производства	4	4	8	7,2
5	Управление директивного планирования и координации	1	3	4	3,6
6	Экономическая служба	2	1	3	2,7
7	Конструкторский отдел	1	1	2	1,8
8	Технологические отделы	5	4	9	8,1
9	Инструментальное производство	5	4	9	8,1
10	Отдел главного энергетика	2	1	3	2,7
11	Отдел главного механика	2	1	3	2,7
12	Отдел производственного планирования	3	3	6	5,4
13	Цеха основного производства	5	4	9	8,1
14	Мастерские ПРИН	4	4	8	7,2
15	Отдел планирования подготовки производства	11	10	21	19,0
16	ЦИС	2	3	5	4,5
17	Инструментальные цеха	6	6	12	10,8
	Итого			111	

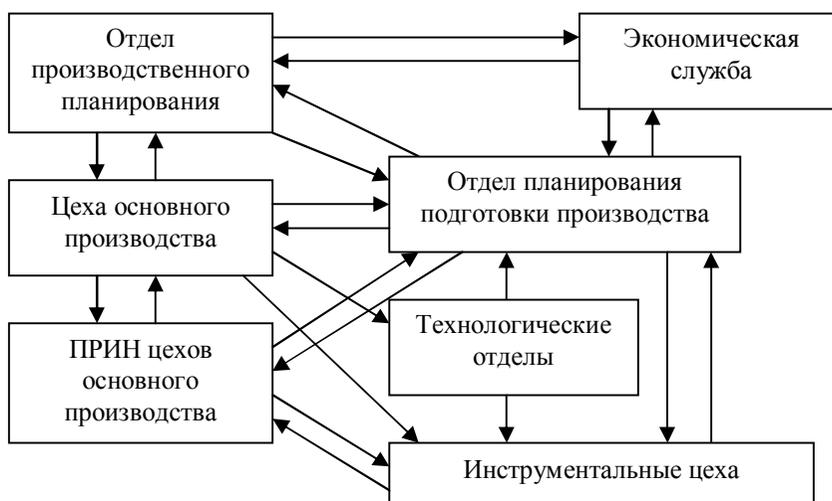


Р и с. 2. Структура информационной емкости подразделений предприятия

Как видно из данных диаграммы (рис. 2), информационная емкость отдела планирования подготовки производства составляет 19,0 % от всей информационной нагрузки в структуре организации. Это значение является максимальным из всех проанализированных подразделений (см. табл. 1), что можно объяснить высокой степенью значимости процессов организации планирования, учета и контроля инструментального производства.

На втором месте по информационной емкости находятся цеха инструментального производства (нормированная информационная емкость равна 10,8 %), что также свидетельствует о первостепенности системы технического обслуживания производства.

Исходя из этого рассмотрим этот вид деятельности более подробно. Схема информационных потоков в структуре управления инструментальным производством представлена на рис. 3.



Р и с. 3. Структура информационных взаимодействий в системе управления инструментальным производством

Отделу производственного планирования предоставляются отчетные данные о выполнении плана цехами инструментального производства и мастерскими цехов основного производства по изготовлению приспособлений и инструмента (ПРИН) за месяц, а отдел планирования подготовки производства (ОППП) получает подетальные графики выпуска готовой продукции и производственную программу по цехам основного производства и предприятия в целом.

Цехам инструментального производства, ПРИН цехов основного производства ОППП направляет оперативные указания по текущей работе и директивные сроки по срочным заказам, планы и заявки на ремонтное обслуживание, планово-предупредительный ремонт (ППР) и обеспечение инструментов и оснасткой цехов основного производства, а получает отчеты о фактическом выполнении производственного плана.

Цехам основного производства ОППП направляет заказы на изготовление деталей, узлов и оказание услуг цехам инструментального производства, а получает заявки на включение в план цехов инструментального производства.

В технологические отделы ОППП направляет заключения, касающиеся извещений о конструкторских и технологических изменениях по изделиям, а получает чертежи СТО и извещения на доработку.

Экономической службе отдел планирования подготовки производства направляет данные о ходе выполнения заказов, подготавливает перечни для списания затрат, а получает согласованные заказ-наряды со сроками.

Существенной является проблема перезагрузки цехов инструментального производства. Как видно из сопоставления плановых и фактических показателей загрузки (табл. 2), планируемые объемы работ превышают нормативную производительность цеха в 2,5 раза за счет увеличения объема переходящих и дополнительных работ.

Выходом из сложившейся ситуации может быть построение алгоритмов перераспределения потока заказов с определением их приоритетности. Решением этой задачи являются методы и алгоритмы, изложенные в теории систем массового обслуживания и бережливого производства [4, 6].

Предположим, что для согласования потоков заказов возможно применить метод очередей. Использование метода очередей позволит улучшить перераспределение потоков заказов внутри предприятия и цеха с помощью следующих принципов:

1. «Первым пришел – первым ушел» (FIFO) – заказы, поступившие первыми, выполняются в первую очередь;
2. «Первым пришел – последним ушел» (LIFO) – заказы, поступившие первыми, выполняются в последнюю очередь;
3. Процесс обмена (PS) – заказы выполняются в равной степени, т. е. они находятся в очереди одно и то же время ожидания.

Правила вычисления этих приоритетов назначаются в единственной точке планирования производства – в примере, приведенном на рис. 4, это второй производственный участок, следующий непосредственно за первой системой управления. На каждом последующем производственном участке функционирует собственная исполнительная производственная система (Manufacturing Execution System, MES), задача которой – обеспечить своевременную обработку поступающих на вход заданий с учетом их текущего приоритета, оптимизировать внутренний материальный поток и вовремя показать возникающие проблемы, связанные с этим процессом. Значительное отклонение в обработке конкретного задания на одном из участков может повлиять на вычисляемое значение его приоритета.

Любая методика планирования производства, которая ограничивает уровень операционных заделов, будет создавать так называемое логистическое вытягивание. «Вытягивающая» логистическая система – это такая организация движения материальных потоков, при которой материальные ресурсы подаются («вытягиваются») на следующую технологическую операцию с предыдущей по мере необходимости, поэтому жесткий график движения материальных потоков отсутствует. Размещение заказов на пополнение запасов или изготовление материальных ресурсов или готовой продукции происходит тогда, когда их количество достигает определенного критического уровня. Эта система основана на «вытягивании» продукта последующей операцией с предыдущей операции в тот момент, когда последующая операция готова к этой работе.

Метод лимитированных очередей, такой как FIFO, успешно используется в массовых и крупносерийных производствах, где объем выпуска достаточно высок и технологический процесс отлажен.

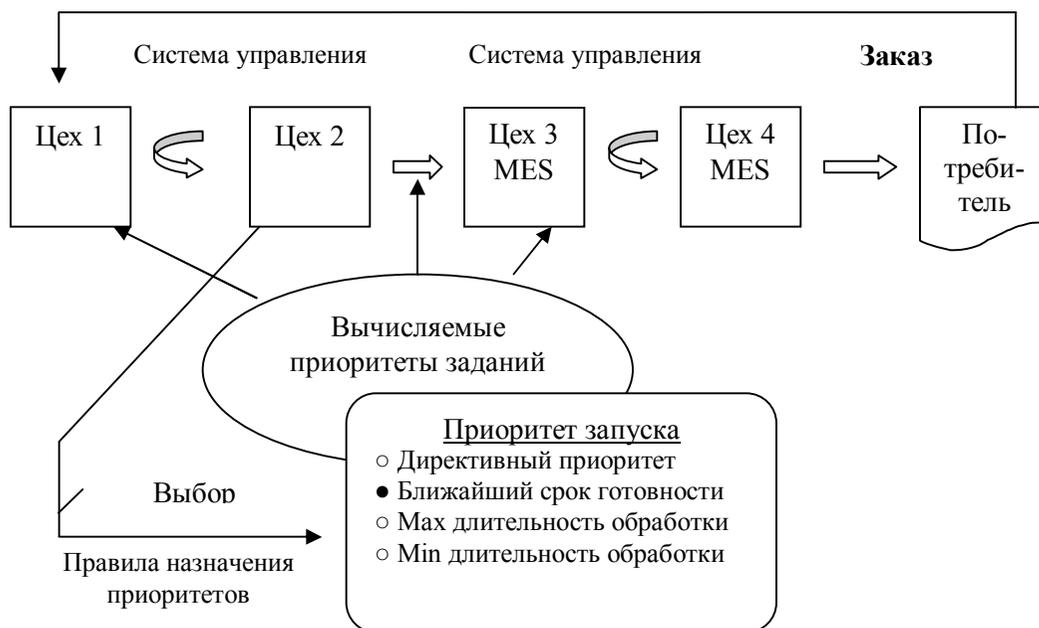
Плановые и фактические показатели загрузки цехов

Отчетные данные по цехам подготовки производства за май 2012 г.				
Цех 23XX				
Расчетная мощность цеха – 23447 н/час				
Процент выполнения плана – 117,7				
	План		Отчет	
	Количество позиций	Трудоемкость, н/час	Количество позиций	Трудоемкость, н/час
Основной план	70	22291	5	1613
Дополнительный план	41	18763	18	2755
Оперативные графики	90	29485	36	14538
«Узлы»				175
Итого	201	70539	59	19081
Ремонт		–		686
ППР		3000		7216
Отд. 29XX		125		605
Итого		73664		27588
Цех 23XX				
Расчетная мощность цеха – 31408 н/час				
Процент выполнения плана – 113,7				
	План		Отчет	
	Количество позиций	Трудоемкость, н/час	Количество позиций	Трудоемкость, н/час
Основной план	257	31036	82	5840
Дополнительный план	43	5423	39	9265
Оперативные графики	81	10287	14	3425
«Узлы»				2410
Итого		46746		20940
Услуги цехам				466
УСП		1000		1954
Ремонт		6000		10619
ППР		1000		2043
Отд. 29XX		678		946
Итого		55424		35721
Цех 23XX				
Расчетная мощность цеха – 29684 н/час				
Процент выполнения плана – 102,7				
	План		Отчет	
	Количество позиций	Трудоемкость, н/час	Количество позиций	Трудоемкость, н/час
Основной план	32	17863	19	1826
Дополнительный план	32	9504	16	1160
Оперативные графики	54	23674	18	1003
«Узлы»				7382
Итого	118	51041	53	11371
Ремонт		1000		665
ППР		13000		15710
Отд. 29XX		816		2763
Итого		65857		30509

Но в производстве единичных и мелкосерийных изделий, к которому как раз относится планирование и изготовление спецнастки на анализируемом предприятии, где постоянно запускаются в производство новые заказы с оригинальной технологией их изготовления, сроки могут меняться непосредственно в процессе изготовления. Для таких случаев наиболее эффективной является «вытягивающая» логистическая система, основанная на методе вычисляемых приоритетов [7].

Метод вычисляемых приоритетов состоит в том, что заказы в данной системе выполняются не в обязательном порядке, а производственные задания, оказавшись в лимитированной очереди, продвигаются от участка к участку не по правилам FIFO (то есть не соблюдается обязательная дисциплина в «порядке поступления»), а по другим вычисляемым приоритетам.

Структура метода вычисляемых приоритетов приведена на рис. 4.



Р и с. 4. Структура метода вычисляемых приоритетов

Процедура «вытягивания» осуществляется за счет того, что каждый последующий участок может начинать выполнение только тех заданий, которые имеют максимально возможный приоритет, что выражается в первоочередном заполнении на уровне системы управления не всех доступных ячеек, а лишь тех, что соответствуют приоритетным заданиям. Последующий участок 2 хотя и является единственной точкой планирования, определяющей работу всех остальных производственных звеньев, сам вынужден выполнять только эти, наиболее приоритетные задания. Численные значения приоритетов заданий получаются за счет вычисления на каждом из участков значения общего для всех критерия. Вид этого критерия задается основным планирующим звеном (участком 2), а его значение каждый производственный участок самостоятельно вычисляет для своих заданий, либо вставших в очередь на обработку, либо находящихся в заполненных ячейках системы управления на предыдущей стадии.

Логистическая схема метода вычисляемых приоритетов представляет собой «вы-

тягивающую» систему планирования и использует децентрализованные вычислительные ресурсы для поддержания эффективности процессов в условиях приоритетов исполняемых заданий.

Таким образом, предлагается для согласования плановых заданий и фактических производственных возможностей цехов инструментального производства использовать алгоритмы перераспределения потока заказов, основанные на теории массового обслуживания и методе вычисляемых приоритетов из «вытягивающей» логистической системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бухалков М.И.* Внутрифирменное планирование: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2000. – 400 с.
2. *Есаулов В.Н.* Оперативно-календарное планирование и диспетчирование: Учеб. пособие / В.Н. Есаулов, С.Г. Чернега; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 98 с.
3. *Иванов И.Н.* Организация производства на промышленных предприятиях: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 352 с. (Высшее образование).
4. *Кофман А., Крюон Р.* Массовое обслуживание. Теория и приложения. – М.: Мир, 1965. – 303 с.
5. *Пелих А.С.* Экономико-математические методы и модели в управлении производством / А.С. Пелих, Л.Л. Терехов, Л.А. Терехова. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 248 с. (Высшее образование).
6. *Саати Т.Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1965. – 520 с.
7. *Фролов Е.* Современные концепции управления в производственной логистике MES для дискретного производства – метод вычисляемых приоритетов // САПР и графика. – 2011. – № 1. – С. 71-75.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2013 г.

WAYS OF OPERATIONAL PLANNING AND SCHEDULING DEVELOPMENT THE TOOL PRODUCTION IN MACHINE-BUILDING PLANT

N.V. Konovalova

Samara State Technology University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

This paper deals with some tool production peculiarities of an aerospace enterprise. Undeveloped issues in tool production process are discovered and the solutions to solve these problems are proposed.

Keywords: *planning, tool production, schedule, schedule, planning principles.*

Nataliya V. Konovalova, Postgraduate Student.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСТАВКАМИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА БАЗЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Сергеев, А.А. Новиков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sergeev-av@samaraenergo.ru

Излагается новый подход к решению задачи управления поставками сырья и комплектующих для промышленных предприятий, отличительной особенностью которого от существующих является применение классического аппарата теории автоматического управления для разработки моделей, критериев и алгоритмов управления поставками. Приведены пример построения модели системы управления поставками в виде передаточных функций и результаты численного моделирования управляемых процессов в программном комплексе Simulink.

Ключевые слова: управление поставками, теория автоматического управления, модель управления поставками, склад, товарно-материальные ценности, страховой запас, уровень запасов, передаточная функция, возмущение, ПИД-регулятор, функциональные блоки, переходные процессы.

Как показывает практика управления промышленными предприятиями, одной из первоочередных задач, решение которой необходимо для обеспечения успешного их функционирования, является эффективная организация поставок сырья и комплектующих, потребляемых в результате осуществления производственного процесса. Высокий приоритет и важность этой задачи подтверждается и большим количеством работ по данному направлению в теории исследования операций, и не ослабевающим интересом к ней со стороны разработчиков автоматизированных систем управления предприятиями. Не случайно одними из первых автоматизированных систем управления на производственных предприятиях после начала широкого распространения компьютерной техники стали системы планирования потребностей в материалах (Material Requirement Planning – MRP). Методология и алгоритмы MRP до сих пор остаются центральным звеном современных интегрированных систем управления ресурсами предприятий (Enterprise Resource Planning).

Результаты теоретических исследований и практические разработки по данному направлению взаимно дополняют друг друга, но на текущий момент имеют весьма ограниченную, на наш взгляд, область пересечения. При этом степень их взаимного проникновения не позволяет пока говорить о широком применении имеющейся теоретической базы в качестве инструментального средства разработки используемых в реальной производственной практике систем управления. С другой стороны, отсутствует достаточно эффективная обратная связь от разработчиков и пользователей данных систем к научному сообществу, в связи с чем его огромный потенциал остается здесь не вполне востребованным.

Описанные выше проблемы характерны и для других областей управления производственными и бизнес-процессами. В то же время в смежной области задач

Антон Владимирович Сергеев (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Алексей Александрович Новиков, аспирант.

управления, а именно автоматизации управления технологическими процессами и установками, картина взаимодействия и параллельного развития теории и практики выглядит кардинально иным образом.

Здесь теоретическая база исследования задач управления развивается в рамках теории автоматического управления (ТАУ), представляющей собой область научного знания, имеющего дедуктивную структуру и высокую степень формализации, единую методологическую основу и развитый математический аппарат. При этом полученные в ТАУ результаты имеют строгое математическое обоснование и в то же время доведены до уровня прикладных инженерных методик, на базе которых построено большое количество систем автоматизированного проектирования систем автоматического управления. С другой стороны, проблемы управления, находящие успешное решение в ТАУ, ставятся перед ней непосредственно инженерной практикой.

И здесь особо следует подчеркнуть, что в рамках ТАУ не постулируется природа управляемых объектов и процессов, а значит, полученные ею результаты имеют универсальный характер и применимы в различных областях человеческой деятельности.

Последнее обстоятельство естественным образом вызывает интерес к исследованию возможности ее применения для решения нетипичных для ее приложения задач управления нетехническими объектами. В том числе в качестве объекта управления можно рассмотреть склад (или любое другое сооружение аналогичного назначения) производственного предприятия, в котором формируется определенный запас сырья, материалов и комплектующих, и сформулировать и решить задачу управления бизнес-процессом их поставки (или производства) с целью поддержания уровня запасов, обеспечивающего эффективную работу предприятия.

Итак, перейдем к постановке задачи. Отметим, что, как правило, с целью снижения накладных расходов предприятия стремятся свести к минимуму уровень своих запасов. Одновременно с этим они предпочитают держать некоторый резерв запасов на случай непредвиденных обстоятельств (например таких, как задержки поставок, обнаружение брака, неожиданное увеличение спроса и т. д.), чтобы не допускать простоев производства или срыва поставок готовой продукции. Этот резерв получил название «страховой запас». В таком случае задача управления состоит в том, чтобы поддерживать постоянный заданный уровень страхового запаса при условии возможного проявления возмущающих факторов, упомянутых выше.

Построим математическую модель рассматриваемой задачи. Объектом управления в данном случае является склад, в котором происходит накопление материалов, сырья и т. п. Текущий уровень содержимого склада определяется объемом поступлений товарно-материальных ценностей и их потребления на временном отрезке от начального до текущего момента времени:

$$D(\tau) = \int_{t_n}^{t_k} (f^{post}(\tau) - f^{potr}(\tau)) d(\tau), \quad (1)$$

где $D(\tau)$ – уровень содержимого склада; $f^{post}(\tau)$ – входящий поток, представляющий собой поставку материалов; $f^{potr}(\tau)$ – исходящий поток, представляющий собой потребление материалов.

С точки зрения ТАУ склад представляет собой интегрирующее звено [1], на входе которого действует сигнал, равный разнице между потоком поставки материалов и потоком их потребления:

$$G_{\text{склад}}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{D(p)}{f^{\text{post}}(p) - f^{\text{potr}}(p)} = \frac{1}{p}. \quad (2)$$

В силу того, что состояние складских запасов меняется не непрерывно, а только в моменты поступления товаров на склад или их списания со склада, и сам процесс формирования и выдачи заказа на пополнение складских запасов носит дискретный характер, предлагается перейти к дискретному описанию модели системы управления поставками.

Передаточная функция рассматриваемого объекта управления в дискретном виде представлена ниже [1]:

$$G_{\text{склад}}(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{z}{z - 1}. \quad (3)$$

Роль органа управления играет отдел снабжения, работа которого заключается в регулярном определении необходимого размера пополнения запаса, при котором обеспечивается достижение и поддержание заданного страхового уровня при минимизации затрат, связанных с заказом и хранением товара, а также потерями из-за неудовлетворенного спроса. Алгоритм принятия решений предлагается реализовать в виде дискретного ПИД-регулятора, который будет формировать сигнал, соответствующий сформированным отделом снабжения заказам на поставку сырья. Передаточная функция дискретного ПИД-регулятора представлена ниже:

$$G_p(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}}; \quad (4)$$

$$q_0 = K \cdot \left(1 + \frac{T_D}{T} \right); \quad (5)$$

$$q_1 = -K \cdot \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} - \frac{T}{T_H} \right); \quad (6)$$

$$q_2 = K \frac{T_D}{T}, \quad (7)$$

где K – коэффициент передачи; T_D – постоянная дифференцирования; T_H – постоянная интегрирования; T – период дискретизации.

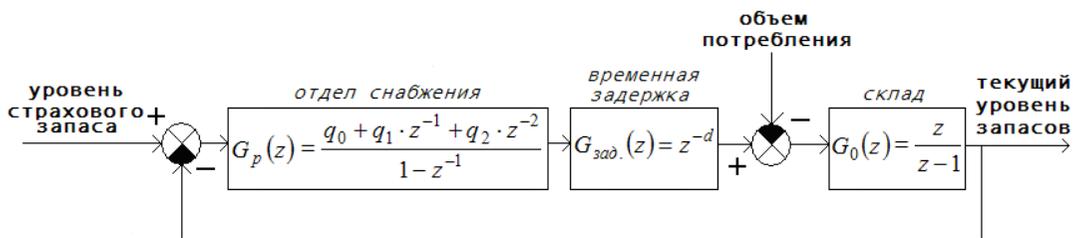
Кроме того, в модели необходимо учесть временную задержку, существующую между моментом формирования заказа и моментом поставки товарно-материальных ценностей на склад, т. е. ввести в модель системы звено запаздывания [2]:

$$G_{\text{зад.}}(z) = z^{-d}. \quad (8)$$

Как уже было упомянуто выше, на уровень складских запасов оказывает непосредственное влияние потребление товаров со склада, подверженное влиянию случайных факторов. Данное воздействие в системе управления поставками является возмущающим и действует на входе объекта управления, т. е. склада. Очевидно, что если бы отсутствовало потребление товаров со склада, то и уровень запасов оставался бы постоянным и отсутствовала бы необходимость в обеспечении поставок.

Процесс учета товарно-материальных ценностей на складе представляет собой обратную связь в системе управления поставками, без которой невозможно осуществить поддержание заданного уровня запасов, значение которого является своего рода уставкой регулирования.

С учетом приведенного выше описания процесс управления поставками можно представить в виде следующей функциональной схемы (рис. 1).



Р и с. 1. Структурно-функциональное представление модели управления поставками

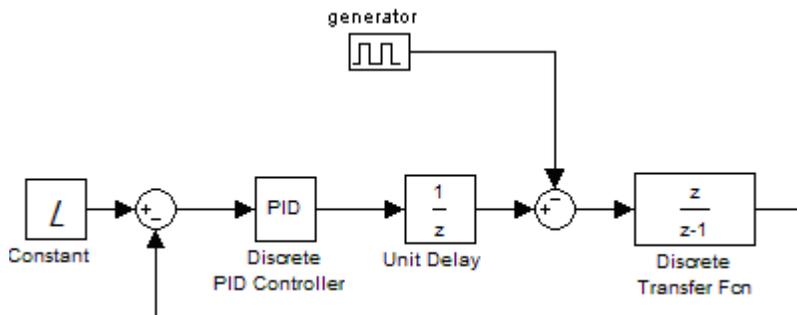
Здесь: входным сигналом модели является заданный уровень страхового запаса; объект управления – склад – представлен интегратором; на входе объекта управления действует возмущающее воздействие – потребление материалов со склада; управляющий орган – отдел снабжения, задачей которого является поддержание заданного уровня страхового запаса материалов на складе. В связи с наличием временных задержек по поставкам в модель управления поставками включено звено запаздывания.

Представленная модель с целью проведения численных экспериментов была реализована в пакете прикладных программ MATLAB с помощью средства моделирования динамических систем Simulink.

Для построения модели были использованы следующие функциональные блоки Simulink:

1. Блок дискретной передаточной функции Discrete Transfer Fcn. Задаёт дискретную передаточную функцию в виде отношения полиномов.
2. Блок дискретного ПИД-регулятора Discrete PID Controller.
3. Источник постоянного сигнала Constant. Задаёт постоянный по уровню сигнал.
4. Блок единичной дискретной задержки Unit Delay. Выполняет задержку входного сигнала на один шаг модельного времени.
5. Источник сигнала Pulse Generator. Формирует импульсный сигнал.
6. Блок вычисления суммы Sum. Выполняет вычисление суммы текущих значений сигналов.

На рис. 2 изображена модель управления поставками на предприятии, реализованная в Simulink.



Р и с. 2. Модель управления поставками на предприятии, реализованная в Simulink

Источником входного сигнала в модели служит блок Constant, в котором задается L – уровень страхового запаса, поддерживаемого на предприятии. Данный сигнал, являющийся для системы управления не чем иным, как уставкой регулирования, по-

ступает на сумматор, в котором вычисляется разница между значением уставки и текущим значением регулируемой величины, или другими словами – ошибка регулирования. Таким образом, на входе дискретного ПИД-регулятора действует ошибка регулирования. Дискретный ПИД-регулятор в модели имитирует работу отдела снабжения. Выходным сигналом этого блока является объем поставляемого товара, который требуется для поддержания заданного уровня L . Учитывая ненулевую продолжительность процесса доставки товарно-материальных ценностей на склад, в модели выходной сигнал с регулятора проходит через блок Unit Delay, с помощью которого задается временная задержка. Источником сигнала, имитирующего ежедневный объем потребляемой продукции, служит блок Generator, в нем и будет задаваться возмущающее воздействие. В итоге два сформировавшихся сигнала (объем поставок и потребления) поступают на сумматор, в котором вычисляется их разность. Полученное значение поступает на вход объекта управления – блок Discrete Transfer Fcn, алгоритм работы которого описывается выражением (3). Для того чтобы поддерживать заданный уровень запасов, в модель введена отрицательная обратная связь, по которой передается значение текущего уровня запасов на сумматор перед ПИД-регулятором, формируя тем самым ошибку регулирования.

Оценим перспективы применения предложенного подхода к решению задачи управления объемами поставки бензола, являющегося исходным сырьем для производства изопропилбензола на предприятии ЗАО «Самараоргсинтез». Прием, хранение и выдача бензола осуществляются во вспомогательном цехе завода. Поставка сырья осуществляется в железнодорожных цистернах; хранение – в специальных емкостях. Объем запаса сырья ежедневно фиксируется, данная информация передается в отдел снабжения. Необходимый объем содержания бензола в емкостях поддерживается за счет изменения объема поставок. То есть уровень страхового запаса применительно к данному предприятию регулируется объемами поставок, решение относительно которых принимается в отделе снабжения.

Из вспомогательного цеха бензол насосом подают в цех получения изопропилбензола методом алкилирования бензола пропиленом в присутствии катализатора $AlCl_3$. В свою очередь, изопропилбензол является сырьем для производства фенола и ацетона. ЗАО «Самараоргсинтез» на данный момент является одним из ведущих производителей фенола и ацетона в России, поддерживающем на высоком уровне объем выпуска продукции, которая пользуется постоянно увеличивающимся спросом. Для данного предприятия задача оптимального управления поставками исходного сырья является актуальной.

Примем следующие исходные данные и параметры модели: необходимый уровень запасов бензола на предприятии $L = 600$ тн; задержка между формированием регулятором задания на поставку необходимого количества сырья и собственно поступлением его во вспомогательный цех, из которого производится отбор продукта на переработку, равна одному дню (один шаг в модели).

Для нахождения оптимальных настроек регулятора в Simulink-модели воспользуемся возможностями раздела Simulink Response Optimization. Для этого задействуем вспомогательный блок PID Tuning, который позволяет определять настройки ПИД-регулятора путем оптимизации временных сигналов исходя из заданных пользователем условий. Для представленной выше модели в качестве такого условия (критерия) была выбрана минимизация перерегулирования абсолютной величины текущего уровня запасов

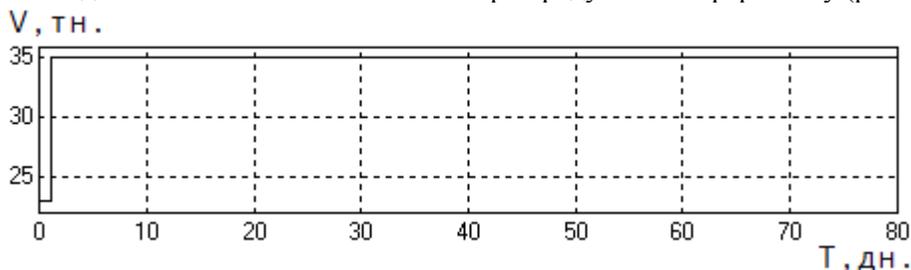
$$\Delta = |L_{\max} - L_0| \rightarrow \min, \quad (9)$$

где Δ – абсолютная величина перерегулирования; L_{\max} – максимальное отклонение от

заданного значения уровня страхового запаса; L_0 – заданное значение уровня страхового запаса.

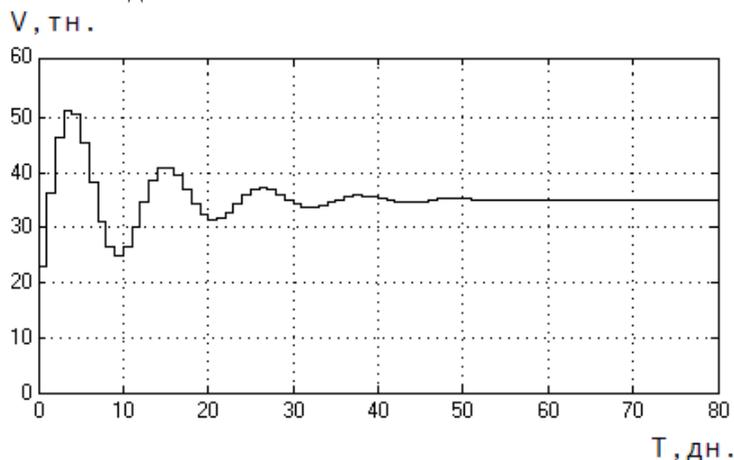
Результатом использования блока PID Tuning для рассматриваемой модели являются следующие настройки ПИД-регулятора: коэффициент пропорциональности равен 0,5294; коэффициент интегрирования 0,175; коэффициент дифференцирования 0,066.

Для оценки динамических свойств системы в сигнал на входе объекта управления ввели «единичный» скачок объемов отбора продукта на переработку (рис. 3).



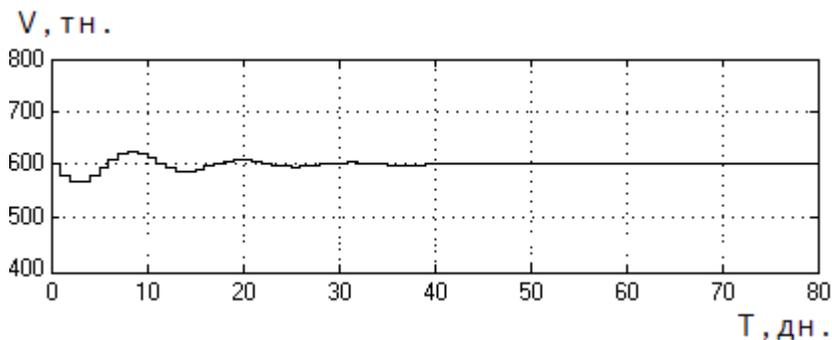
Р и с. 3. Ежедневный отбор сырья на переработку

На рис. 4 изображен сигнал с выхода дискретного ПИД-регулятора, т. е. объем поставок сырья на склад.



Р и с. 4. Сигнал с выхода ПИД-регулятора

На рис. 5 представлен выходной сигнал с дискретного интегратора (уровень запасов).



Р и с. 5. Выходной сигнал с интегратора (уровень запасов)

Приведенные результаты моделирования показывают, что рассматриваемая система управления поставками устойчива и позволяет достигать основной цели управления – поддержание заданного уровня запасов. При этом для реализации управления на каждом временном шаге необходима только информация о текущем уровне запасов на складе и нет необходимости в прогнозе или оценке предполагаемого будущего уровня их потребления. Это существенно снижает требования к технической реализации системы.

Указанные выше обстоятельства говорят о том, что предложенную концепцию управления поставками вполне можно принять за основу при разработке соответствующей автоматизированной системы управления. При этом в дальнейшем необходимо будет принять во внимание следующие обстоятельства.

Во-первых, необходимо учитывать конечную вместимость емкостей для хранения сырья. То есть при определенных условиях задача управления поставками может стать нелинейной, что, соответственно, необходимо будет учесть при построении алгоритма управления. Кроме того, целесообразно уточнить критерий управления поставками исходя из соображений экономического характера, а именно из условия минимизации совокупных затрат на управление поставками и хранение запасов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 768 с.
2. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2013 г.

DESIGNING OF THE MODEL OF RAW MATERIALS SUPPLY MANAGEMENT SYSTEM FOR THE INDUSTRIAL ENTERPRISES ON THE BASIS OF THE CLASSICAL AUTOMATIC CONTROL THEORY

A.V. Sergeev, A.A. Novikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The new approach to the solution of a problem of raw materials supply management for the industrial enterprises which distinctive feature from existing is use of the classical means of the automatic control theory for designing of models, criteria and algorithms of supply management is stated. The example of the supply management systems model designing in the form of transfer functions and the results of numerical modeling of controlled processes in the software package Simulink are given.

Keywords: *supply management, automatic control theory, supply management model, warehouse, inventory items, insurance stock, stocks level, transfer function, disturbance, PID-controller, functional blocks, transitional processes.*

*Anton V. Sergeev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Aleksy A. Novikov, Postgraduate Student.*

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СБОРНЫМИ ГРУЗОВЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ*

*П.О. Скобелев, А.Н. Лада, С.С. Кожевников, Д.С. Рыбак, И.А. Пустовой,
А.В. Царев*

ООО «НПК «Разумные решения»
443013, г. Самара, ул. Московское шоссе, 17, оф. 1201

Описываются принципы построения интеллектуальной системы планирования перевозок сборных грузов. Приведено описание метода адаптивного планирования на основе мультиагентных технологий для решения задачи адаптивного планирования.

Ключевые слова: логистика, грузоперевозка, маршрут, адаптивное планирование.

Введение

Задача выбора маршрутов и построения расписаний перевозки грузов, являющаяся одной из известнейших задач комбинаторной оптимизации, имеет различные постановки в зависимости от типов ограничений, но наиболее актуальной считается «Задача маршрутизации с ограничением по времени» (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*) [1, 2]. При этом целью является минимизация времени в пути, общего пробега и количества ресурсов при соблюдении условий выполнения каждого заказа в рамках временного окна, сопоставленного с заказом. Решение задачи точными методами за приемлемое время не представляется возможным. В течение последних 50 лет были разработаны различные алгоритмы составления расписаний на основе эвристических методов [3, 4]. Однако практически ни один из них не учитывает возможность динамического изменения ситуации в реальном масштабе времени как один из важнейших факторов, диктуемых современными реалиями бизнес-процессов. Большинство известных алгоритмов подразумевают, что вычисления будут производиться на основании исходных данных, изначально переданных в систему. Но в реальности возникают непредвиденные ситуации: поломки, опоздания, изменения тарифов и т. п., которые влияют на построенное расписание. Для бизнеса требуется быстрая реакция на любое значимое изменение и адаптивная перестройка расписания в реальном времени. Таким образом, актуальной является задача разработки системы, которая могла бы в реальном времени перестраивать расписания ресурсов в условиях динамично меняющегося мира.

Эффективное решение подобной задачи может быть построено с использованием мультиагентного подхода [5]. В создаваемых мультиагентных системах разрабатываются и реализуются методы распределенного решения задач (*distributed problem solving*), когда любая сложная задача (например задача распределения, планирования

* Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ, поддержавшему разработки по созданию интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени по государственному контракту Минобрнауки РФ № 14.514.11.4080.

Петр Олегович Скобелев (д.т.н.), президент группы компаний «Генезис знаний».

Александр Николаевич Лада, руководитель направления.

Сергей Сергеевич Кожевников, заместитель генерального директора.

Дмитрий Сергеевич Рыбак, старший разработчик.

Иван Александрович Пустовой, старший программист.

Александр Вячеславович Царев, заместитель генерального директора.

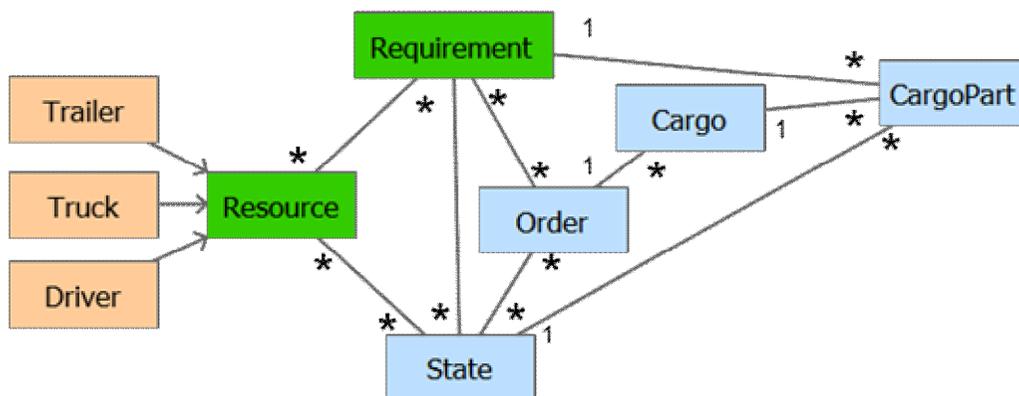
и оптимизации ресурсов грузового флота) декомпозируется на более простые автономно решаемые подзадачи (выполнения одного заказа, загрузки одного грузовика и др.), а далее между полученными частными решениями происходит взаимное согласование, для чего ищутся и разрешаются конфликты путем переговоров и взаимных уступок в интересах достижения решения общей задачи.

Мультиагентный подход к решению задачи управления сборными грузовыми перевозками

В статье представлена система управления сборными грузовыми перевозками, которая позволяет решить проблему адаптивного перестроения расписания [6]. По сравнению с предыдущей версией системы грузоперевозок, которая оперировала исключительно перевозками *FTL (Full Truck Load)* [7, 8], данная система предоставляет возможность планирования перевозок *LTL (Less Than Truckload)*, что приводит к значительному увеличению прибыли от выполнения грузоперевозок [9].

Описание объектной модели системы управления грузоперевозками

Для описания предметной области управления грузоперевозками разработана объектная модель, являющаяся основой онтологии предметной области, в которой можно выделить следующие ключевые сущности: Заказ, Требование, Состояние, Груз и Ресурс. На рис. 1 представлена диаграмма классов.



Р и с. 1. Диаграмма классов объектной модели

Основной сущностью является Заявка (*Order*), которая описывает Заказ пользователя на выполнение перевозки груза. Данная сущность содержит поля «стоимость перевозки», «стратегия выполнения перевозки». В рамках заявки создается список Грузов (*Cargo*), подлежащих перевозке. Далее в заявку добавляется список Требований (*Requirement*). Данная сущность описывает подзадачу в рамках заявки (погрузка, разгрузка, стоянка). Требование может включать список предпочитаемых ресурсов. В этом случае оно может быть запланировано только с использованием указанных ресурсов. Результат работы системы (расписание) представляется в виде набора Состояний (*State*), которые содержат данные о Местоположении ресурсов и размещении грузов (*CargoPart*) в определенный момент времени (отметка на временной шкале).

Виды агентов, используемых в системе управления грузоперевозками

В соответствии с функциональным назначением в системе используются агенты 8 видов (табл. 1), каждый из которых относится к одному из 2 типов: агент потребности (*Demand*) или агент возможности (*Resource*) [10]. Типы сообщений агентов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Типы агентов

Вид агента	Назначение
Требование погрузки (<i>D</i>)	Обеспечить погрузку груза в заданный интервал времени и в заданной локации.
Требование разгрузки (<i>D</i>)	Обеспечить разгрузку груза в заданный момент времени и в заданной локации. При необходимости собрать грузы с нескольких ресурсов, если используется несколько ресурсов в рамках заявки.
Требование стоянки (<i>D</i>)	Обеспечить стоянку ресурса в течение заданного интервала времени.
Требование техобслуживания (<i>D</i>)	Обеспечить техобслуживание ресурса в заданный промежуток времени (не связано с конкретной заявкой).
Поддержка многопроходного алгоритма (<i>R</i>)	Обеспечить поддержку многопроходного алгоритма планирования, используя: <ul style="list-style-type: none"> – сбор заявок, которым не удалось запланироваться в текущем проходе; – принятие решения о необходимости следующего прохода; – последовательное ослабление ограничений в новых проходах; – фильтрацию опций совместно с агентами требований.
Сервисный (<i>R</i>)	Обеспечить завершение цикла планирования и промежуточное сохранение текущих результатов в БД через заданные промежутки времени во время цикла планирования.
Грузовик (<i>R</i>)	Обеспечить предоставление возможности перевозки грузов из точки А в точку Б.
Трейлер (<i>R</i>)	Обеспечить отслеживание возможной перегрузки трейлера в процессе выполнения заказов.

Таблица 2

Типы сообщений

Тип сообщений	Агент	Описание сообщения
Распланирование	Требование	Запрос на перепланирование требования
Дефрагментация	Требование	Сообщение о необходимости провести дефрагментацию своей части расписания по заданным параметрам
Допустимость опоздания	Требование	Включение/выключение признака допустимости опоздания в контексте требования. Отправляется агентом многопроходного планирования
Обслуживание допустимого сдвига	Требование	В зависимости от содержимого сообщения выполняется одно из действий: <ul style="list-style-type: none"> – сообщение текущего допустимого сдвига требования; – уменьшение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения;

Тип сообщений	Агент	Описание сообщения
		– увеличение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения
Запрос о предоставлении ресурсов	Требование	Запрос у агента грузовика временного слота для выполнения задачи перевозки грузов
Вытеснение груза из трейлера	Трейлер	Предписание требованию освободить перевозимые грузы из трейлера
Внешние изменения	Сервисный	Сообщение о произведенных пользователем изменениях
Запись в следующий проход планирования	Многопроходного планирования	Сообщение о необходимости занести требование в очередь следующего прохода планировщика
Фильтрация опций планирования	Многопроходного планирования	Запрос на исключение из сообщения опций, конфликтующих с требованиями, не участвующими в текущем проходе планирования

Адаптивное планирование сборных грузовых перевозок

Для решения задачи управления сборными грузовыми перевозками на основе мультиагентного подхода разработан метод адаптивного планирования. В общем виде процесс работы системы можно разделить на следующие этапы:

- 1) инициализация;
- 2) основной цикл планирования;
- 3) принятие решения о завершении цикла планирования. В случае завершения выполняется пункт 4, иначе – пункт 2;
- 4) завершение цикла планирования.

Инициализация. На этапе инициализации система загружает все необходимые объекты из базы данных (БД) и создает агентов для каждого из требований, зафиксированных в очереди на планирование.

Основной цикл планирования. Менеджер агентов последовательно передает управление агентам из основной очереди. Агент, получивший управление, исключается из очереди. Он может ставить других агентов как в основную, так и в экстренную очередь. Менеджер агентов обрабатывает экстренную очередь в приоритетном порядке и не переходит к основной очереди, пока не будет обработана экстренная. Алгоритм гарантирует целостность расписания в случае пустой экстренной очереди. После завершения обработки очередей данные готовы к записи в БД.

Принятие решения о завершении цикла планирования. Если все ограничения, предусмотренные многопроходным алгоритмом, отключены системой и за текущий проход не запланировано ни одной заявки, принимается решение о завершении цикла планирования.

Завершение цикла планирования. При завершении цикла планирования выполняется подсчет ключевых показателей эффективности (*Key Performance Indicators (KPI)*) и сохранение результата в БД.

После завершения цикла планирования предусмотрена возможность дальнейшей проактивной работы планировщика с целью повышения *KPI*. Новый цикл планирования может быть инициирован любым изменением со стороны пользователя либо прямым перезапуском планировщика.

Построение и анализ опций планирования

Для построения опций планирования используется единый механизм для всех типов требований, который состоит из следующих этапов:

- 1) выборка групп ресурсов для планирования;
- 2) фильтрация групп ресурсов;
- 3) действия для каждой группы ресурсов:
 - определение вариантов планирования;
 - фильтрация вариантов планирования (первая стадия фильтрации);
 - построение и анализ опций планирования по вариантам;
 - фильтрация опций планирования (вторая стадия фильтрации);
 - оценка опций планирования.

Для ускорения процесса реализован механизм кэширования опций планирования. При анализе опций планирования лучшая опция для каждой группы ресурсов записывается в кэш. Далее при планировании агент требования запоминает текущее время и сообщает об изменении данной группы ресурсов менеджеру групп ресурсов, который запоминает время последнего изменения. Если у требования имеется предыдущее запланированное требование, этап подбора групп ресурсов пропускается и используется тот же ресурс, что и в предыдущем требовании.

Анализ опции планирования состоит из следующих этапов:

- 1) построение цепочки операций;
- 2) построение набора требований, с которыми необходимо проверить конфликты;
- 3) анализ каждого требования набора обработчиками конфликтов.

На данный момент в системе поддерживаются следующие типы конфликтов: по времени, объему, весу, температуре, типу трейлера, совместимости грузов, неразрешимый (если во время анализа будет обнаружен конфликт типа «неразрешимый», опция планирования отклоняется).

Обработка конфликтов

В системе существуют два обработчика конфликтов:

- 1) обработчик конфликтов по времени;
- 2) обработчик конфликтов между грузами.

Обработчик конфликтов по времени анализирует следующее условие:

$$t_{end} + \delta_{bc} \leq t_{start} + \delta_{stop} + \delta_{ac}, \quad (1)$$

где t_{end} – время окончания выполнения планируемого требования;

t_{start} – время начала выполнения рассматриваемого требования;

a – локация, с которой начинается выполнение планируемого требования;

b – локация, в которой заканчивается выполнение планируемого требования;

c – локация, с которой начинается выполнение рассматриваемого требования;

δ_{bc} – время, необходимое для перемещения между локациями b и c ;

δ_{ac} – время, необходимое для перемещения между локациями a и c ;

δ_{stop} – время, на которое возможно смещение рассматриваемого требования.

Если условие (1) выполняется, возможно планирование без конфликта по времени с рассматриваемым требованием.

Для обработчика конфликтов между грузами перед анализом выполняется построение «карты загрузки» для планируемого требования. Карта представляет собой набор пар <время, индекс загрузки>. Индекс загрузки отражает несколько показателей:

- загрузку по объему;
- загрузку по весу;
- минимальную допустимую температуру для набора грузов;
- максимальную допустимую температуру для набора грузов;
- словарь <груз, количество>, подробно отражающий текущую загрузку.

Далее производится анализ для каждого требования, входящего в интервал времени, на который построена «карта загрузки», и оценивается возможность разместиться с грузами в трейлере с учетом всех ограничений. Если размещение невозможно, регистрируется конфликт до ближайшего требования погрузки.

Алгоритм многопроходного адаптивного планирования

Для ускорения планирования, улучшения качества и возможности фиксации приоритетных целей (например планирование без опозданий) реализован механизм многопроходного планирования, цель которого заключается в следующем:

- привести как можно большее количество заявок в соответствие набору критериев;
- снизить влияние фильтрации по конфликтам, когда весь ресурс (или его часть) становятся недоступными для требований, причем ресурс может освободиться далее в процессе планирования.

Ниже приведен алгоритм многопроходного планирования:

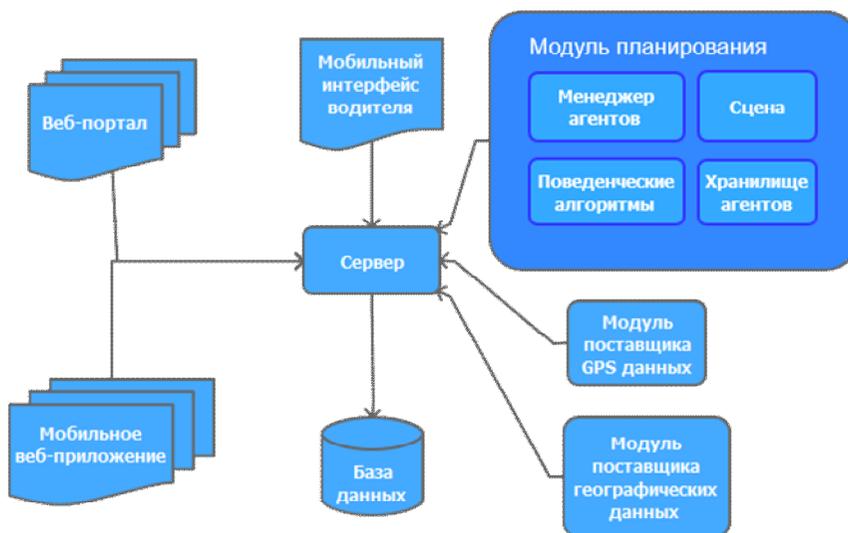
1. Инициализация. Все N ограничений активны. В первом проходе разрешены конфликты с любыми требованиями.
2. Проход планирования. Агент многопроходного планирования записывает в очередь для выполнения следующего прохода все требования, которым не удалось запланироваться. Если проход не первый, разрешены конфликты только с требованиями, участвующими в текущем проходе.
3. Как только все требования были запланированы или встали в очередь следующего прохода, активируется агент многопроходного планирования и производит одно из действий:
 - a. Начало следующего прохода с теми же ограничениями. Для этого очередь следующего прохода должна быть не пуста и за последний проход запланирована хотя бы одна заявка. Далее повторяется пункт 2 для очередного прохода алгоритма.
 - b. Начало следующего прохода с отменой очередного ограничения. Для этого очередь следующего прохода должна быть не пуста и за последний проход не запланирована ни одна заявка. Далее повторяется пункт 2 для очередного прохода алгоритма.
 - c. Завершение цикла планирования. Для этого либо очередь следующего прохода должна быть пуста, либо за последний проход не запланирована ни одна заявка и сняты все ограничения.

Архитектура и функции системы управления сборными грузовыми перевозками

Для реализации представленного алгоритма и анализа выбранного подхода была разработана система управления грузоперевозками.

Архитектура системы управления грузоперевозками (рис. 2) построена в соответствии с топологией «звезда». Все коммуникации между модулями системы осу-

ществляются через сервер. Веб-портал представляет собой веб-интерфейс, через который осуществляется ввод заявок, мониторинг ресурсов, просмотр отчетов, ввод фактической информации о расположении ресурсов и этапах выполнения заявок.

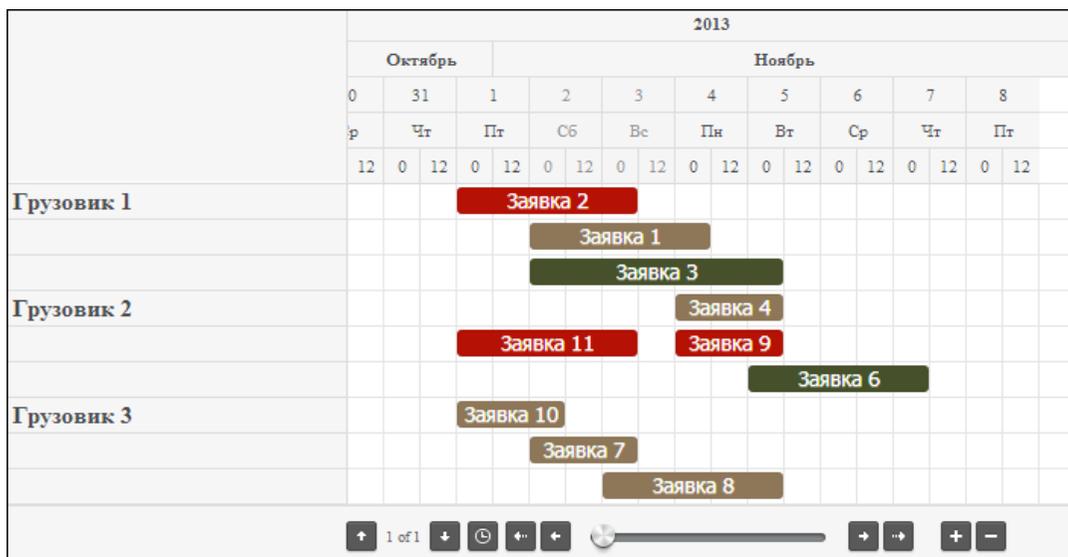


Р и с. 2. Архитектура системы управления сборными грузовыми перевозками

Мобильный интерфейс водителя – программно-аппаратное решение, позволяющее водителю проставлять фактические отметки времени в процессе выполнения заявок, а также просматривать информацию о состоянии автомобиля, показания датчиков, дату и место ближайшего технического обслуживания и ряд других параметров. Мобильное веб-приложение предназначено для водителей, у которых отсутствует мобильный интерфейс водителя. Мобильное веб-приложение имеет ограниченную функциональность по сравнению с мобильным интерфейсом водителя, и его основной функцией является предоставление водителю возможности проставления фактических времен выполнения операций. Модуль поставщика географических данных позволяет получать информацию о скорости и времени движения по дорогам, основываясь на данных из внешних источников гео-информации. Данный модуль использует внешний сервис CloudMade для получения актуальной информации о маршрутах и скорости на дорогах. Модуль поставщика GPS передает в систему данные о фактическом месторасположении грузовиков, основываясь на данных GPS. Модуль планирования предназначен для адаптивного построения расписания и его перестроения при внешних изменениях. Результатом работы планировщика является набор состояний, описывающих назначение определенных ресурсов на некоторые заявки на шкале времени.

Расписание ресурсов после выполнения работы модуля планирования представляется в виде диаграммы Гантта (рис. 3).

На текущий момент при наличии сцены в 500 заявок и 40 доступных грузовиков вся сцена целиком планируется в течение 30 минут. Инкрементальное планирование (при добавлении новой заявки) выполняется в течение 1 минуты.



Р и с. 3. Расписание ресурсов, представленное в виде диаграммы Гантта

Выводы

В результате проведенных исследований и разработок в области применения мультиагентного подхода к решению задачи управления сборными грузоперевозками была разработана система, позволяющая в реальном времени отслеживать выполнение операций, вносить управляющие воздействия, которые, в свою очередь, влияют на процесс построения расписания ресурсов.

В дальнейшем планируется развитие системы в виде *Software as a Service (SaaS)* решения, которое позволяло бы множеству компаний пользоваться одним решением для оптимизации бизнеса за счет снижения затрат на покупку дорогостоящего программного обеспечения. Планируется также добавить в систему возможность автоматической корректировки построенного плана с учетом GPS-данных, что позволит более точно вычислять время завершения каждой операции, увеличить количество совпадений прогнозируемого времени выполнения с фактическим, что приведет к улучшению качества построенного расписания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. T.K. Ralphs, L. Kopmanz, W.R. Pulleyblank, and L.E. Trotter, Jr. On the Capacitated Vehicle Routing Problem. – Available from: [On the Capacitated Vehicle Routing Problem](#)
2. Jesper Larsen. Parallelization of the Vehicle Routing Problem with Time Windows. – Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.10.8068>
3. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Edited by J. Y-T. Leung // Chapman & Hall / CRC Computer and Information Science Series. – 2004.
4. Stefan Vos. Meta-heuristics: The state of the Art // Local Search for Planning and Scheduling. Edited by A. Nareyek // ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000 // Springer-Verlag, Germany, 2001.
5. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1-32.
6. Diyazitdinova A., Ivashenko A., Skobelev P., Tsarev A., Martyshkin D., Syusin I. Multi-Agent Platform for Full Truck Load Scheduling // Interactive Systems and Technologies: The problems of Hu-

man-Computer Interaction. Volume III. – Collection of scientific papers. – Ulyanovsk: UISTU, 2009. – Pp. 132-143.

7. *Амелина Н.О., Лада А.Н., Майоров И.В., Скобелев П.О., Царев А.В.* Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. – 2011. – № 6. – С. 31-37.
8. Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling. – Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. – Pp. 282-285.
9. Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system. – Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – P. 244-249.
10. *Виттих В.А., Скобелев П.О.* Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 162-169.

Статья поступила в редакцию 17 июля 2013 г.

DESIGNING OF INTELLIGENT SYSTEM FOR CARGO TRANSPORTATION WITH CONSOLIDATION

P.O. Skobelev, A.N. Lada, S.S. Kozhevnikov, D.S. Rybak, I.A. Pustovoy, A.V. Tsarev

«SEC «Smart Solutions»

17 Moscovskoe Shosse, office center «Vertikal», Samara, 443013

Principles of designing intelligent scheduling system for transport logistics with cargo consolidations are described in the paper. The description of adaptive scheduling method based on multi-agent technologies are given.

Keywords: *logistic, cargo transportation, route, adaptive scheduling.*

Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Group President.

Alexander N. Lada, Head of Department.

Sergey S. Kozhevnikov, Deputy General Director.

Dmitry S. Rybak, Senior Developer.

Ivan A. Pustovoy, Senior Programmer.

Alexander V. Tsarev, Deputy General Director.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА «ДЕРЕВО РЕШЕНИЙ» С МЕТОДОМ ВЫБОРА АТТРИБУТА CART ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

И.М. Сунагатов, В.И. Батищев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрен и применен аналитический метод «Дерево решений: CART». Рассмотрены варианты получения прогнозных значений энергопотребления. Проанализированы ошибки прогнозирования.

***Ключевые слова:** классификационно-регрессионные деревья решений, CART, методы прогнозирования, энергопотребление, математическое моделирование.*

Прогнозирование режимных параметров и технико-экономических показателей является одной из важных задач как при планировании, так и при ведении текущих режимов энергообъединения. Составляя планы по различным показателям на предстоящие сутки, неделю, месяц, квартал, год, службы и отделы ЭО решают задачу планирования энергобаланса – соотношения между потребностью в электроэнергии (мощности) и средствами ее удовлетворения. Одним из важнейших показателей при планировании является уровень ожидаемого электропотребления в целом по объединению, группам и отдельным потребителям. В этом смысле величина прогноза электропотребления является опорным показателем для планирования балансов электроэнергии и мощности.

Для построения прогноза поведения системы необходимо понимание ее функционирования и представление ее структуры. Для построения структуры воспользуемся системно-аналитическим методом «дерево решений» с алгоритмом выбора атрибута CART [1, 2, 3].

В алгоритме CART каждый узел дерева решений согласно методу дихотомии имеет два листа. На каждом шаге построения дерева правило, формируемое в узле, делит заданное множество примеров (обучающую выборку) на две части – часть, в которой правило выполняется и часть, в которой правило не выполняется [4]. Для выбора оптимального правила используется функция оценки качества разбиения

$$Gini(T) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где p_i^2 – вероятность появления класса i в наборе данных T .

Входными данными являются временные ряды значений потребления электроэнергии и соответствующих им значений окружающей температуры. Для анализа использованы реально зарегистрированные временные ряды Z_t , содержащие по 8329 значений, снятых с интервалом 1 час. Ряды квантованы на суточные выборки Z_{ij}^M , где $j = 1, 2, \dots, n$, $M = 24$.

На основе визуального анализа значений годового интервала ряда потребления

Ильдар Маратович Сунагатов, аспирант.

Виталий Иванович Батищев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационные технологии».

выдвигаются гипотезы о подобии суточных выборок. Критерием для проверки гипотез примем линейный коэффициент корреляции Пирсона. В случае подтверждения гипотезы наличия подобия прогнозные значения анализируемых факторов F_t^M определяются путем экстраполяции выборки по предыдущим ее значениям или значениям аппроксимирующей выборки.

Значениями аппроксимирующей выборки Z_t^M являются средние значения:

$$Z_t^M = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n B_{ij} \right\}, j = 1, 2, \dots, 24,$$

где $B_{ij} = Z_t^M - \min(Z_t^M)$.

Экстраполируя данные, получим прогнозные значения факторов:

$$F_t^M = P_{ct} + Z_t^M + e, \quad (2)$$

где P_{ct} – текущие значения энергопотребления.

Среднее значение ошибки экстраполирования аппроксимирующей выборки M также будет являться входными данными для построения дерева решения.

Рассмотрим различные варианты характера изменения значений температуры и энергопотребления на отдельных участках временных рядов (табл. 1).

Таблица 1

Характер изменения значений температуры и энергопотребления на отдельных участках временных рядов

№	Температура	Потребление	Участок	Ошибка, %
1	Снижение	Увеличение	$[Z_t^M; Z_{t+150M}^M]$	5
2	Увеличение	Снижение	$[Z_t^M; Z_{t+150M}^M]$	5
3	Снижение	Увеличение	$[Z_{t+150M}^M; Z_{t+450M}^M]$	4
4	Увеличение	Снижение	$[Z_{t+150M}^M; Z_{t+450M}^M]$	4
5	Снижение	Увеличение	$[Z_{t+450M}^M; Z_{t+366M}^M]$	5
6	Увеличение	Снижение	$[Z_{t+450M}^M; Z_{t+366M}^M]$	5
7	Снижение	Снижение	$[Z_{t+180M}^M; Z_{t+210M}^M]$	5
8	Увеличение	Увеличение	$[Z_{t+180M}^M; Z_{t+210M}^M]$	5
9	Отсутствие изменения	Отсутствие изменения	$[Z_t^M; Z_{t+366M}^M]$	0,5

С учетом выявленной в результате статистического анализа данных регрессионной зависимости значений энергопотребления от температуры окружающей среды можно ввести поправку в прогнозный уровень, относительно которого будет производиться экстраполяция выборки на сутки вперед:

$$P_{ft} = P_{ct} + K_1(T_{ct} - T_{t+1}), \quad (3)$$

где T_c – текущие значения температуры;

T_{t+1} – прогнозные значения температуры;

K_1 – коэффициент линейной регрессии (в рассматриваемом примере $K_1 = 16,7$).

С учетом поправки прогнозные значения будут рассчитываться по формуле

$$F_t^M = P_{ft} + Z_t^M + e. \quad (4)$$

В табл. 2 приведены результаты анализа ошибок прогнозирования с учетом введенных выше поправок, отнесенные к некоторым характерным интервалам.

Таблица 2

Значения ошибки на выборках с определенным сдвигом

№	Сдвиг	Ошибка, %	Соответствие
1	t_{-7M}	5	Праздничный – выходной (воскресенье)
2	t_{-6M}	4	Суббота при 6-дневной рабочей неделе
3	t_{-5M}	3	Предпраздничный (пятница)
4	t_{-1M}	3	Послепраздничный (понедельник)
5	$t_{-2M}, t_{-3M}, t_{-4M}$	2	Вторник, среда, четверг при 5-дневной рабочей неделе

Дальнейшее уточнение прогноза может быть обеспечено рациональным выбором участков опорной выборки исходных данных. В табл. 3 показано изменение ошибок прогнозирования энергопотребления в рабочие дни, обусловленных ошибками аппроксимации суточного графика при переходе от участка $[Z_t^M; Z_{t+150M}^M]$ к $[Z_{t+150M}^M; Z_{t+450M}^M]$ и от $[Z_{t+150M}^M; Z_{t+450M}^M]$ к $[Z_{t+450M}^M; Z_{t+366M}^M]$.

Таблица 3

Изменение ошибки аппроксимации в зависимости от выбора участка исходной выборки

№	Сдвиг	Ошибка, %	Ошибка аппроксимации, %
1	$[Z_t^M; Z_{t+150M}^M] \rightarrow [Z_{t+150M}^M; Z_{t+180M}^M]$	- 4% → +2%	- 2% → +0%
2	$[Z_{t+150M}^M; Z_{t+180M}^M] \rightarrow [Z_{t+180M}^M; Z_{t+210M}^M]$	+ 2% → +3%	+ 0% → +1%
3	$[Z_{t+180M}^M; Z_{t+210M}^M] \rightarrow [Z_{t+210M}^M; Z_{t+450M}^M]$	+ 3% → +2%	+ 1% → +0%
4	$[Z_{t+210M}^M; Z_{t+450M}^M] \rightarrow [Z_{t+450M}^M; Z_{t+366M}^M]$	+ 2% → -4%	+ 0% → -2%

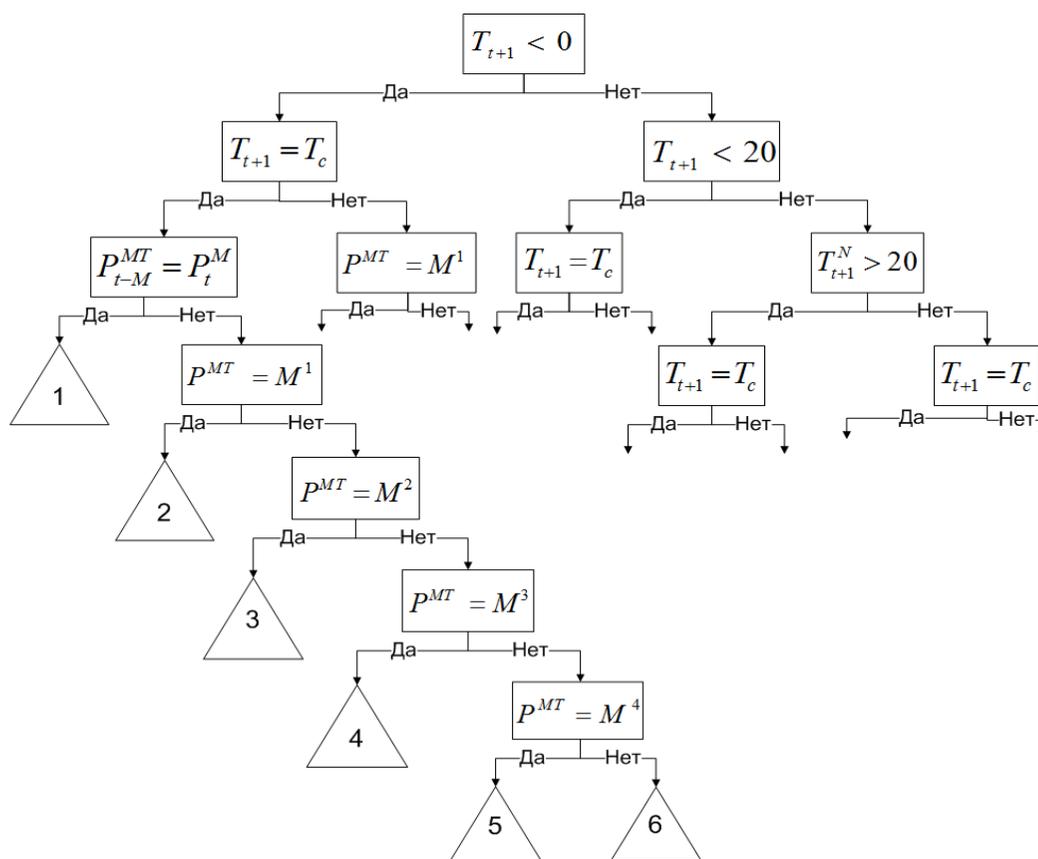
В результате учета температурного сезона ошибка прогнозирования снижается до ~ 2 %.

Построение дерева регрессии схоже с процедурой построения дерева классификации. Сначала строится дерево максимального размера, затем уменьшается размер дерева с помощью алгоритма «отсечения» (pruning) до приемлемого размера.

Дерево решений дает возможность работать с многомерными задачами и задачами, в которых существует зависимость выходной переменной от переменных категориального типа. Главный принцип построения – разбиение всего пространства на участки, в которых выходная переменная считается постоянной. При этом следует учитывать, что существует сильная зависимость между объемом обучающей выборки и результирующей ошибкой ответа дерева.

Процесс построения дерева происходит последовательно. На первом шаге мы получаем регрессионную оценку как константу по всему пространству примеров,

которая учитывается как среднее значение выходной переменной в обучающей выборке.



Р и с. 1. Фрагмент дерева решений

Для построения дерева решений имеющиеся данные сведены в табл. 4, где указана степень влияния атрибутов на ошибку.

Результатом получим дерево с максимальной глубиной в 9 узлов, состоящее из категориальных и регрессионных переменных (атрибутов). Первым выбирается атрибут с наибольшей степенью влияния, т. е. тот, который максимально сузит диапазон значений, – прогнозная температура (регрессия). Локализуя температурный сезон, выполняем разбиение ряда температуры сравнением со вторым атрибутом (категориальным) «Температура 1-4».

Третьим атрибутом выбирается сезон недельного потребления, характер которого зависит от второго атрибута.

Визуально фрагмент дерева решений представлен на рисунке.

Таблица 4

Перечень атрибутов

№	Наблюдение	Степень влияния, %	Обозначение	Вид атрибута
1	Температура 1. Зима	1	T^1	Категориальный
2	Температура 2. Осень, весна		T^2	Категориальный
3	Температура 3. Лето		T^3	Категориальный

№	Наблюдение	Степень влияния, %	Обозначение	Вид атрибута
4	Температура Повышение ночной летней	4.	T^4	Категориальный
5	Потребление. Функция зависимости потребления от прогнозной температуры	2	P_f	Регрессионный
6	Потребление 1. Рабочие дни при 5-дневной неделе	1	M^1	Категориальный
7	Потребление 2. Рабочие дни при 6-дневной неделе		M^2	Категориальный
8	Потребление 3. Праздничные и выходные дни		M^3	Категориальный
9	Потребление 4. Предпраздничные дни		M^4	Категориальный
10	Потребление 5. Послепраздничные дни		M^5	Категориальный

Решением будет служить среднее значение дневного потребления, по которому будет экстраполирован график, выбранный по второму и третьему атрибуту. Дерево позволяет сделать прогноз с точностью до 2 %, а также визуализирует основные зависимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананий В. Левитин. Алгоритмы: введение в разработку и анализ = Introduction to The Design and Analysis of Algorithms. – М.: Вильямс, 2006. – С. 409-417.
2. Breiman Leo, Friedman J.H., Olshen R.A. & Stone C.J. (1984). Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.
3. Hyafil, Laurent; Rivest, RL (1976). Constructing Optimal Binary Decision Trees is NP-complete. Information Processing Letters 5 (1): 15-17.
4. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. – М.: Юнити, 1998.

Статья поступила в редакцию 7 июля 2013 г.

USE SYSTEM-ANALYTICAL METHOD «DECISION TREES» TO THE PROCESS OF SELECTING THE ATTRIBUTES «CART» FOR BUILDING SYSTEM OF SHORT-TERM FORECAST

I.M. Sunagatov, V.I. Batishchev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The analytical method «A tree of decisions: CART» is considered and applied. Options of obtaining expected values of power consumption are considered. Errors of forecasting are analyzed.

Keywords: classification and regression decision trees, CART, forecasting methods, energy, mathematical modeling.

*Ildar M. Sunagatov, Postgraduate Student.
Vitaly I. Batishchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*