Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71
9
2017

Главный редактор
Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Мымрина И.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
ПИ № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО «Издательство
"Инновационное машиностроение"»

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Сердюк А.И., Сергеев А.И., Радыгин А.Б. Компьютерное моделирование гибких производственных систем с автоматизированной системой инструментального обеспечения . . . 387

Калюжный В.В., Калюжный С.В., Куликов А.В., Дикович Ю.А., Бондарь И.А. Система архивирования и отображения информации о работе крановых электроприводов . . . 392

Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Автоматическое регулирование размера сварного шва по температуре изделия . . . 396

Васильков Ю.В., Федотов В.С., Алиев Д.И. Концепция управления автоматическим технологическим складом как производственной системой . . . 401

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Даев Ж.А. Особенности применения диффузора с криволинейными образующими в качестве преобразователя расхода веществ . . . 406

Терентьев В.Б. Упорядочение объектов на основе многокритериального анализа . . . 410

Хусаинова Г.Я. Способ определения начального градиента давления в нефтяных пластах . . . 412

Шалумов М.А. Методология проектирования и обеспечения надёжности радиотехнических устройств в виртуальной среде на основе комплексного моделирования схем и конструкций . . . 416

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кондрашов Ю.Н. Информационное обеспечение систем управления проектами . . . 422

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Быстрянцев Е.В., Логойда В.С. Исследование технологии экспертной оценки качества информационного обеспечения автомобильного транспорта . . . 429

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Serdyuk A.I., Sergeev A.I., Radygin A.B. Computer modeling of flexible production systems with an automated system of the instrumentation ensuring . . . 387

Kalyuzhny V.V., Kalyuzhny S.V., Kulikov A.V., Dikovich Yu.A., Bondar I.A. System for archiving and displaying information about the operation of crane electric drives . . . 392

Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. Automatic adjustment of the welded joint dimensions by product temperature . . . 396

Vasilkov Yu.V., Fedotov V.S., Aliev D.I. The concept of automatic technological warehouse management as a production system . . . 401

MODERN TECHNOLOGY

Daev Zh.A. Application features of a diffuser with curvilinear generatrices in the capacity of a substances flow converter . . . 406

Terentev V.B. The objects ordering on the grounds of multicriteria analysis . . . 410

Khusainova G.Ya. Method for determining the initial pressure gradient in oil reservoirs . . . 412

Shalumov M.A. Methodology of designing and ensuring the reliability of radio engineering devices in a virtual environment based on integrated modeling of circuits and structures . . . 416

INFORMATION TECHNOLOGY

Kondrashov Yu.N. Information ensuring for project management systems . . . 422

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bystryantsev E.V., Logoyda V.S. Research of an expert estimation technology of the information ensuring quality for motor transport . . . 429

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 29.06.2017.
Подписано в печать 24.08.2017.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2017

УДК 658.52.011.56

А.И. Сердюк, д-р техн. наук, проф., **А.И. Сергеев,** канд. техн. наук, доц.
(Оренбургский государственный университет),
А.Б. Радыгин
(АО «ПО «Стрела», г. Оренбург)

sap@mail.osu.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Рассмотрены возможности разработанной компьютерной среды FMS concept, позволяющей моделировать работу гибких производственных систем (ГПС) на уровне технологического перехода, а также возможности программной среды применительно к структурно-параметрическому синтезу автоматизированной системы инструментального обеспечения (АСИО). Приведены результаты вычислительных экспериментов по выявлению закономерностей влияния параметров устройств АСИО на эффективность функционирования ГПС.

Ключевые слова: машиностроение; гибкая автоматизация; гибкая производственная система; автоматизированная система инструментального обеспечения; моделирование; анализ; синтез.

The possibilities of the developed computer environment FMS concept, allowing to simulate the work of flexible production systems (FMS) at the level of technological transition, as well as the possibilities of the software environment in relation to the structural-parametric synthesis of the automated system of the instrumentation ensuring (ASIE) are considered. The results of computational experiments on revealing the regularities of the influence of ASIE device parameters on the efficiency of FMS functioning are presented.

Keywords: mechanical engineering; flexible automation; flexible production system; automated system of instrumentation ensuring; modeling; analysis; synthesis.

При создании гибких производственных систем (ГПС) механической обработки проектировщик сталкивается с проблемой выбора структуры и параметров автоматизированной системы инструментального обеспечения (АСИО, ГОСТ 26228—90). В состав высокоавтоматизированной системы инструментального обеспечения могут включаться центральный накопитель инструментов и инструментальные роботы, магазины станков, устройства автоматической смены и замены инструментов. Предпроектные исследования АСИО предполагают использование компьютерных моделей, учитывающих зависимость эффективности функционирования ГПС от выбранных параметров устройств хранения, доставки и смены режущих инструментов [1]. Такие компьютерные модели должны рассматривать работу ГПС на уровне технологического перехода, что по сравнению с моделированием на уровне технологической операции создаёт определённые сложности для их разработчиков [2].

Система FMS concept. В качестве примера компьютерной среды моделирования ГПС на уровне технологического перехода рассмотрим разработанную систему FMS concept (рис. 1).

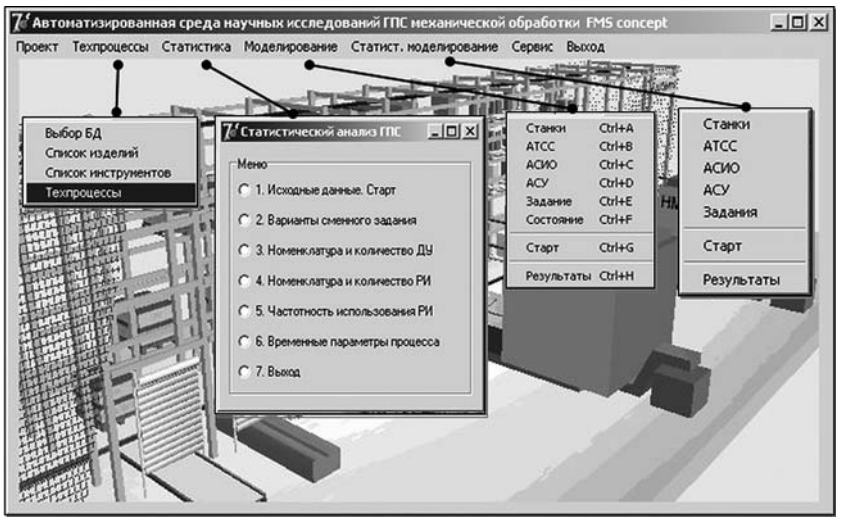


Рис. 1. Основные разделы системы FMS concept [3]

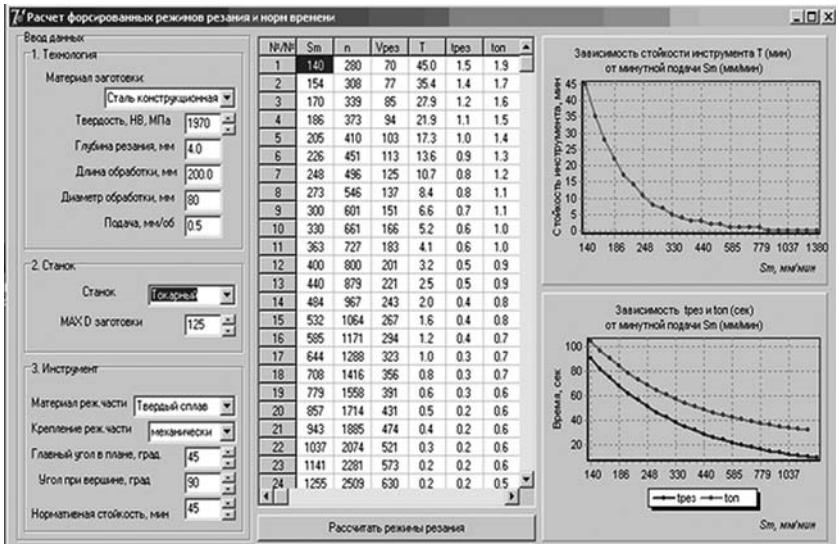


Рис. 2. Окно расчёта режимов резания [4]

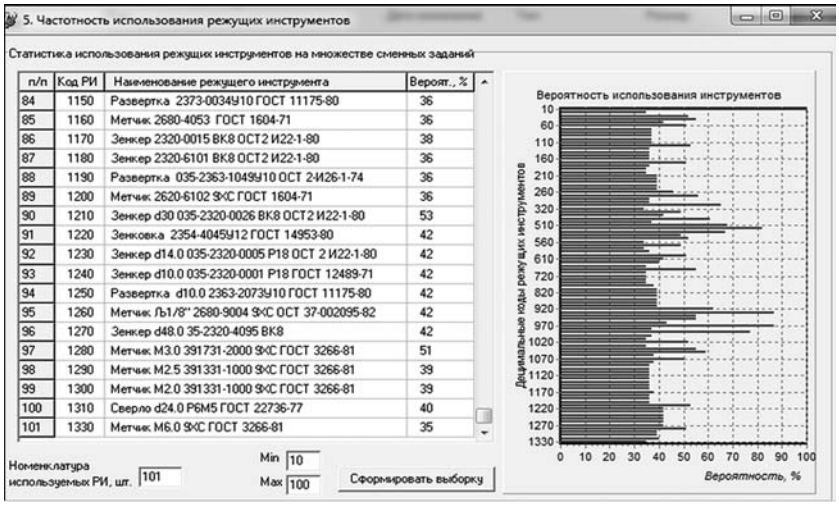


Рис. 3. Окно расчёта частотности использования РИ

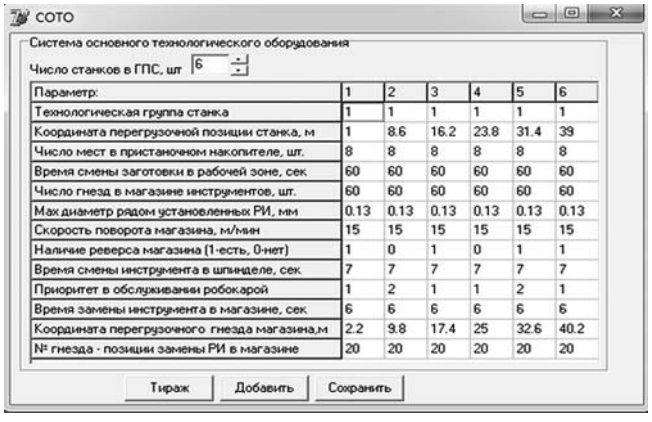


Рис. 4. Окно ввода данных о технологическом оборудовании

В составе системы используется база данных технологических процессов, представленная набором выполняемых технологических переходов.

Каждый технологический переход описывается тремя параметрами: машинным временем перехода (временем резания), вспомогательным временем и десятичным кодом применяемого на переходе режущего инструмента (РИ). Для расчёта режимов резания, затрат времени и ресурса инструментов на технологических переходах может использоваться встроенное приложение (рис. 2).

Десятичный код РИ позволяет идентифицировать до 10 инструментов одного типоразмера, одновременно используемых на станках ГПС, с одинаковым начальным ресурсом и с последующими текущими ресурсами, зависящими от наработки каждого отдельного инструмента [5, 6].

Для сокращения номенклатуры применяемых РИ может рассчитываться частотность их применения на переходах (рис. 3).

Данные о технологическом и сервисном оборудовании (рис. 4), а также настройка алгоритмов его взаимодействия вводятся или корректируются в соответствующих разделах экранного меню.

Результаты моделирования работы ГПС выдаются на экранных формах результатов моделирования для единичных сменных заданий (рис. 5) и для их выборки из сформированного множества (рис. 6).

С использованием среды FMS concept выполнены вычислительные эксперименты по выявлению закономерностей влияния параметров АСИО на эффективность функционирования ГПС. Перечень параметров устройств АСИО ГПС и диапазоны их значений представлены в табл. 1.

Эффективность функционирования ГПС оценивали средним значением $P_{\text{ГПС}}$ и величиной поля рассеяния ω_P значений производительности,

$$P_{\text{ГПС}} = N_{\Sigma}/T_{\text{ц}},$$

где N_{Σ} — число деталей, изготовленных в ГПС за цикл автономной работы; $T_{\text{ц}}$ — модельная длительность цикла автономной работы ГПС, мин.

Сводные результаты моделирования представлены в графическом виде на рис. 7. Рассмотрим их более подробно.

Число гнёзд в МИ станков влияет на буферный запас инструментов, призванный компенсировать неритмичность работы инструментальных роботов при наличии в ГПС центрального накопителя инструментов. В связи с тем, что число гнёзд в магазине современного станка предлагается производителями как опция, возможно оснащение станков магазинами, число гнёзд в которых позволяет отказаться от использования центрального накопителя инструментов. Вместе с тем увеличение времени на подготовку инструмента в магазине с большим числом гнёзд предполагает использование в приводе механизма реверса, обеспечивающего подготовку инструментов по кратчайшему пути.

Судя по полученным результатам, для использованных входных данных 40 гнёзд при отсутствии механизма реверса обеспечивают повышение производительности ГПС с 0,24 до 0,26 мин$^{-1}$, или на 8,3 % (рис. 7, *а*). Для магазинов с механизмом реверса производительность ГПС остаётся неизменной во всём диапазоне числа гнёзд.

Расстояние между гнёздами МИ ограничивает максимальные размеры инструментов, автоматически подаваемых в рабочую зону станка. С другой стороны, увеличение расстояния между гнёздами ведёт к увеличению времени подготовки инструмента при его автоматической смене в шпинделе. Судя по полученным результатам, для магазинов без механизма реверса рациональным расстоянием между гнёздами является 110...130 мм. Потери от нерационального выбора расстояния между гнёздами могут привести к потерям средней производительности ГПС в 3,9 % (рис. 7, *б*).

Для магазинов с механизмом реверса производительность ГПС остаётся неизменной при всех рассмотренных расстояниях между гнёздами.

Скорость поворота МИ станка, равная 15 м/мин и выше, обеспе-

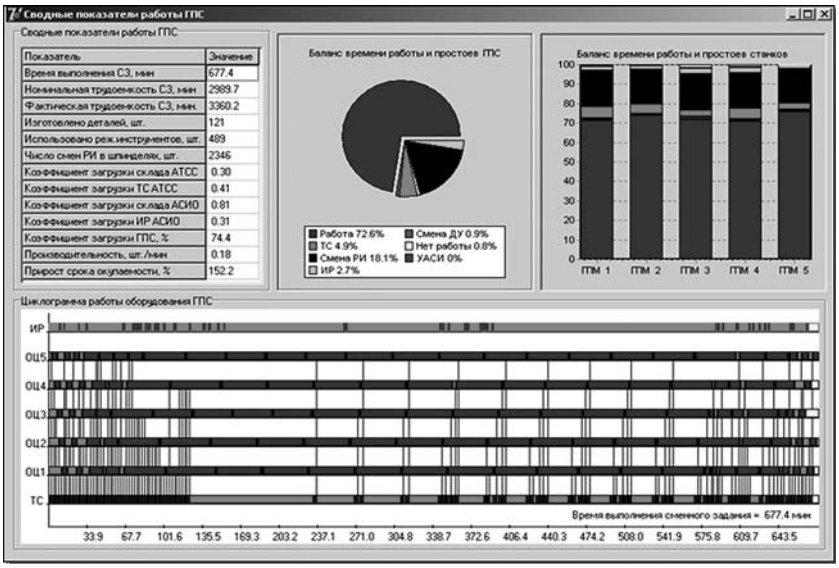


Рис. 5. Окно представления результатов моделирования для единичного сменного задания

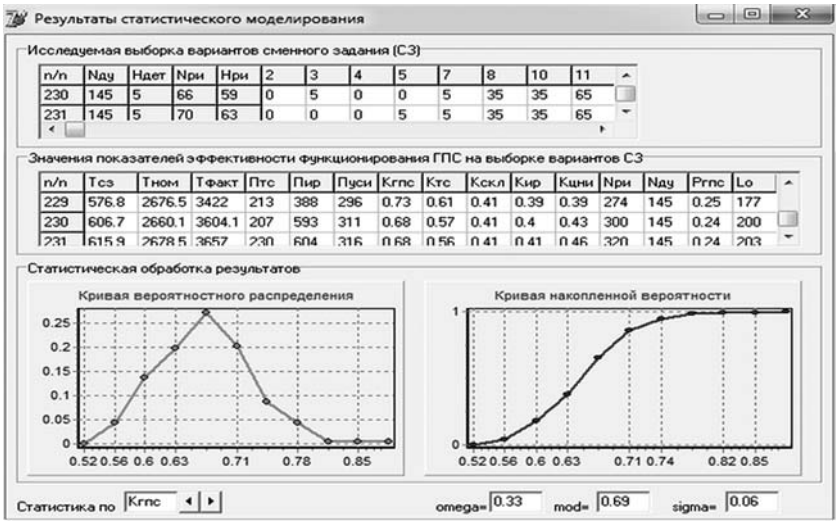


Рис. 6. Окно представления результатов моделирования для выборки сменных заданий

Таблица 1

Перечень входных параметров АСИО ГПС, исследуемых на уровне технологического перехода

Параметр, единица измерения	Диапазон значений
Число гнёзд в магазине инструментов (МИ) станка	20...100
Расстояние между гнёздами в МИ, мм	110...190
Наличие реверса в приводе МИ	Есть/нет
Скорость поворота МИ, м/мин	10...25
Время смены РИ в шпинделе, с	2...10
Время замены РИ в магазине, с	2...10
Наличие у инструментального робота функции одновременной отработки перемещений по осям	Есть/нет
Скорость перемещения инструментального робота, м/с	0,5...2,5
Длительность цикла смены инструмента на инструментальном роботе, с	5...10

чивает стабильно высокую производительность ГПС. Выигрыш в производительности по сравнению с использованием меньшей скорости составляет 4 % (рис. 7, *в*). Данные результаты одинаково справедливы при использовании магазинов как с механизмом реверса, так и без него.

Длительность цикла смены инструмента в шпинделе представляет собой чистое время смены, идентифицируемое как не перекрываемые технологическим временем простои станка. Судя по представленным результатам (рис. 7, *г*), в исследованном интервале значений длительности цикла смены инструмента наилучшие результаты с точки зрения критерия производительности ГПС обеспечиваются при длительности цикла смены 4 с. Вместе с тем отсутствие механизма реверса в приводе магазина

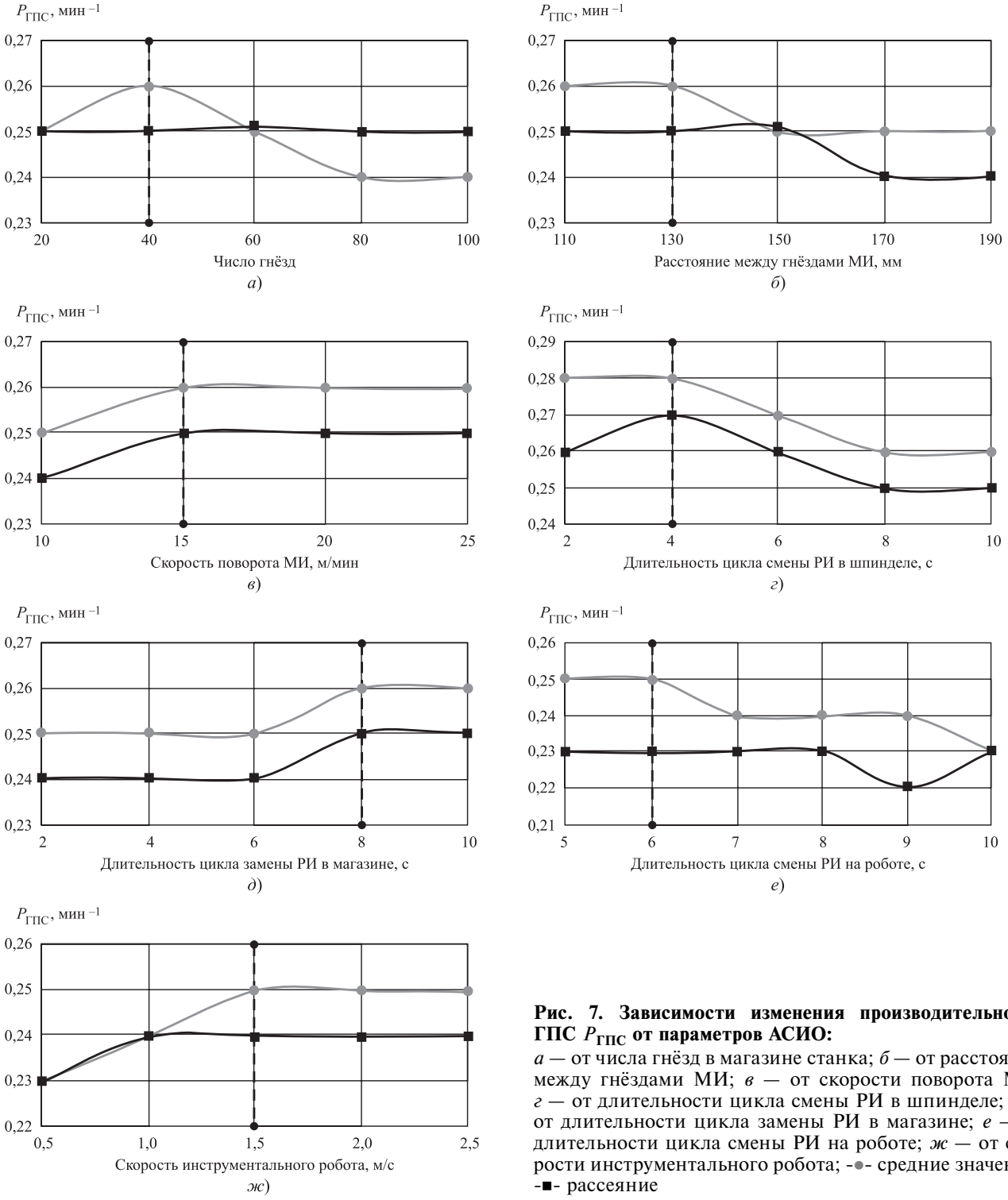


Рис. 7. Зависимости изменения производительности ГПС $P_{ГПС}$ от параметров АСИО:
а — от числа гнёзд в магазине станка; *б* — от расстояния между гнёздами МИ; *в* — от скорости поворота МИ; *г* — от длительности цикла смены РИ в шпинделе; *д* — от длительности цикла замены РИ в магазине; *е* — от длительности цикла смены РИ на роботе; *ж* — от скорости инструментального робота; -●- средние значения; -■- рассеяние

позволяет сократить рассеяние производительности с 0,28 до 0,26 мин$^{-1}$, или на 7,7 %.

Длительность цикла замены инструмента в магазине станка. Из полученных данных (рис. 7, *д*) следует, что рациональное время цикла замены инструмента составляет 8...10 с для магазинов с механизмом реверса. Выигрыш в производительности ГПС составляет около 4 %. Примерно такие же результаты получены и для магазинов без реверса. Для ответа на вопрос, почему меньшие значения длительности цикла замены РИ приводят к меньшей производительности системы, требуется более детальное исследование.

Длительность цикла смены инструмента на инструментальном роботе. Приведённые на рис. 7, *е* графики показывают, что рациональная длительность цикла смены инструмента составляет 5...6 с. При её повышении до 10 с общая производительность ГПС уменьшается с 0,25 до 0,23 мин$^{-1}$, или на 8,0 %.

Скорость перемещения инструментального робота. Рассматривали использование робота для доставки инструментов из центрального накопителя к магазинам станков. Скорость инструментального робота варьировали от 0,5 до 2,5 м/с. Рассматривали также варианты одновременной и последовательной отработки перемещений по координатным осям. Установлено (рис. 7, *ж*), что для использованных исходных данных рациональной является скорость робота 1,5 м/с и выше. Производительность ГПС при этом увеличивается с 0,23 до 0,25 мин$^{-1}$, или на 8,7 %. Варианты с одновременной и последовательной отработкой перемещений незначительно различаются лишь величиной поля рассеяния.

Следует учитывать, что реализация более высокой скорости перемещения инструментального робота требует использования более мощного привода, а следовательно, более высоких затрат на его изготовление и электроэнергию. С данной точки зрения скорость 1,5 м/с является оптимальной.

Представленные результаты получены в ходе многократных статистических вычислительных экспериментов, выполненных с помощью разработанной программной среды. Планирование и проведение каждого из экспериментов подробно запротоколировано, что допускает возможность их повторения и проверки.

Для расчёта экономического эффекта выполним вычислительные эксперименты при двух комплектах параметров АСИО: с наихудшими значениями параметров из исследованных интервалов и с рекомендуемыми значениями параметров. Использованные значения параметров и средние значения показателей эффективности представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводные результаты, используемые для расчёта экономического эффекта

Параметр, единица измерения	Диапазон значений	Наихудшее значение в диапазоне	Рекомендуемое значение
Число гнёзд в магазине инструментов станка	20...100	60	40
Расстояние между гнёздами в МИ, мм	110...190	150	130
Скорость поворота МИ, м/мин	10...25	10	15
Длительность цикла смены РИ в шпинделе, с	2...10	8	4
Длительность цикла замены РИ в магазине, с	2...10	6	8
Скорость перемещения инструментального робота, м/с	0,5...2,5	0,5	1,5
Время смены инструмента на инструментальном роботе, с	5...10	7	6
Средняя производительность $P_{ГПС}$, мин$^{-1}$		0,21	0,27
Поле рассеяния значений $P_{ГПС}$, мин$^{-1}$		0,19	0,23

Судя по полученным результатам, использование рекомендуемых значений параметров устройств АСИО для заданных входных данных позволяет повысить среднюю производительность ГПС с 0,21 до 0,27 мин$^{-1}$, или на 28,6 %.

Выводы. Разработанное приложение FMS concept представляет собой инструмент для компьютерного моделирования работы ГПС механической обработки, который за счёт проработки алгоритмов моделирования на уровне технологического перехода учитывает номенклатуру применяемых режущих инструментов, режимы резания, параметры технологического оборудования, автоматизированной транспортно-складской системы, автоматизированной системы инструментального обеспечения, автоматизированных систем управления и диспетчирования. Пример использования приложения в вычислительных экспериментах позволил установить, что значения параметров АСИО оказывают существенное вли-

яние на эффективность функционирования ГПС в целом.

Судя по выявленным закономерностям, влияние значений каждого отдельного параметра АСИО колеблется в широких пределах: от исчезающе малого влияния расстояния между гнёздами магазина (прирост средней производительности составляет 3,8 %) до существенного влияния скорости перемещения инструментального робота (прирост средней производительности — 13,6 %). Вместе с тем выбор рациональных значений всей совокупности параметров АСИО позволяет резко повысить эффективность проекта ГПС: в рассмотренном примере прирост производительности составляет 28,6 %. Ожидается, что комплексная проработка остальных подсистем ГПС с использованием FMS concept приведет к ещё большему повышению эффективности проектируемой системы [7, 8].

Библиографические ссылки

1. **Алгоритмы** автоматизированного построения циклограмм работы оборудования / А.И. Сердюк, Р.Р. Рахматуллин, С.Ю. Шамаев, С.А. Назаров // Технология машиностроения. 2010. № 9. С. 51—56.

2. **Сердюк А.И., Елагин В.В.** Расчет автоматизированных систем инструментального обеспечения ГПС // Станки и инструмент. 1990. № 9. С. 2—6.

3. **Сердюк А.И., Сергеев А.И., Шамаев С.Ю.** Автоматизированная среда научных исследований ГПС механической обработки FMS concept // Свидетельство РФ № 2016611380 о регистрации программы для ЭВМ; Заявитель и правообладатель ФГБОУ ОГУ; Заявл. 02.12.2015; Зарегистр. 01.02.2016.

4. **Сердюк А.И.** Влияние режимов резания на эффективность ГПС механообработки // СТИН. 1997. № 5. С. 5—8.

5. **Рахматуллин Р.Р., Корнипаев М.А., Казаков А.О., Сердюк А.И.** Оперативный синтез режимов резания по текущим критериям системы оперативно-производственного планирования // СТИН. 2012. № 1. С. 2—6.

6. **Рахматуллин Р.Р., Сердюк А.И., Казаков А.О., Кузьмин В.А.** Автоматизация проектирования режимов резания на многоцелевых станках // Программные продукты и системы. 2013. № 1 С. 114—118.

7. **Сердюк А.И., Сергеев А.И.** Проектирование гибких производственных систем с заданным сроком окупаемости // СТИН. 2005. № 11. С. 20—25.

8. **Сердюк А.И., Сергеев А.И., Корнипаев М.А., Гильфанова Ф.Ф.** Стратегия и тактика формирования технического предложения по созданию гибких производственных систем механообработки // Вестник ОГУ. 2006. № 1. С. 138—145.

УДК 621.389

В.В. Калюжный, канд. техн. наук, доц., **С.В. Калюжный,** канд. техн. наук, **А.В. Куликов**
(Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск),
Ю.А. Дикович, И.А. Бондарь
(ПАО «Алчевский металлургический комбинат»)

info@dstu.education

СИСТЕМА АРХИВИРОВАНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О РАБОТЕ КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Описана электронная система, построенная на базе контроллера CPU 315, осуществляющая передачу информации о состоянии электроприводов мостового крана грузоподъёмностью 470 т в промышленный компьютер с последующим её архивированием и отображением в виде графиков и сообщений.

Ключевые слова: крановый электропривод; система архивирования; отображение информации; микроконтроллер.

The electronic system based on the CPU 315 controller is described, which transmits information about the electric drives state of a bridge crane with a carrying capacity of 470 tons to an industrial computer, followed by its archiving and imaging in the form of graphs and messages.

Keywords: crane electric drive; archiving system; information imaging; microcontroller.

Грузоподъёмные машины, работающие в различных отраслях промышленности, имеют важное значение. Проблема обеспечения их бесперебойной работы, качественного и своевременного ремонта, а также полноты диагностирования возникающих неисправностей не теряет своей актуальности. Зачастую требуется текущий контроль исправности каждого

механизма этих машин, а также непрерывное получение информации о состоянии наиболее ответственных механических и электрических узлов.

Крановые электроприводы, обеспечивающие перемещение мостов, тележек и подъём грузов, представляют собой сложную электромеханическую систему, включающую в себя редукторы, тормозные устройства, промежуточные валы, колёсные тележки, электродвигатели и их питающие преобразователи, а также ещё много других механических узлов и электрических аппаратов. Поэтому для безаварийного функционирования оборудования кранов требуются соответствующие по сложности системы управления и диагностики, которыми сегодня, к сожалению, краны отечественного производства не всегда комплектуются.

В статье рассматривается мостовой кран, предназначенный для подъёмно-транспортных операций с грузом массой до 470 т, который в настоящее время работает в кислородно-конвертерном цехе ПАО «Алчевский металлургический комбинат». Кран оснащён электроприводами переменного тока на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для управления электроприводами используется система управления SINAMICS S120 фирмы Siemens. Её структурная схема приведена на рис. 1.

SINAMICS S120 представляет собой комбинацию силовой части, выполненной на базе автономного преобразователя частоты с модулями управления CU320 (описание см. в [1]). Каждый из указанных модулей подключен посредством интерфейса Drive-CLiQ к силовым модулям (преобразователям, на рис. 1 — блоки MM1...MM16) двигателей, управляющих силовой частью приводов механизмов перемещения моста крана, главной и вспомогательной тележек, главного (470 т) и вспомогательного (100 и 20 т) приводов подъёмных механизмов крана (далее в статье для краткости используется термин «привод подъёма»).

Все модули управления объединены по сети Profibus, ведущим устройством в которой является контроллер CPU 315 серии S7-300 фирмы Siemens. Управление приводами кранов осуществляется при помощи сигналов с модулей датчиков скоростей (SM20) и терминальных модулей (TM15), к которым подключены концевые выключатели конечных позиций и тормозов, а также контакты джойстиков пульта оператора. В сеть Profibus дополнительно включена панель оператора, отображающая основные данные о состоянии узлов крана.

При эксплуатации крана редукторные и тормозные узлы изнашиваются, постоянно изменяются моменты статических сопротивлений, которые зависят от положения тележки с грузом, а также изменяются приведённые инерционные массы — всё это вносит возмущения в систему электропривода. Профилактика и качественная диагностика возникающих неисправностей механических и электрических узлов крана затрудняются необходимостью его бесперебойной работы и отсутствием заведомо точной информации о таких данных работы приводов, как ток, напряжение и скорость вращения электродвигателя, состояния сигналов управления и т. д. Наличие этой информации позволило бы более чётко определить объём диагностических, профилактических и ремонтных работ, предупредить повторное возникновение различных неисправностей, определить своевременность указанных работ в любой момент времени работы крана.

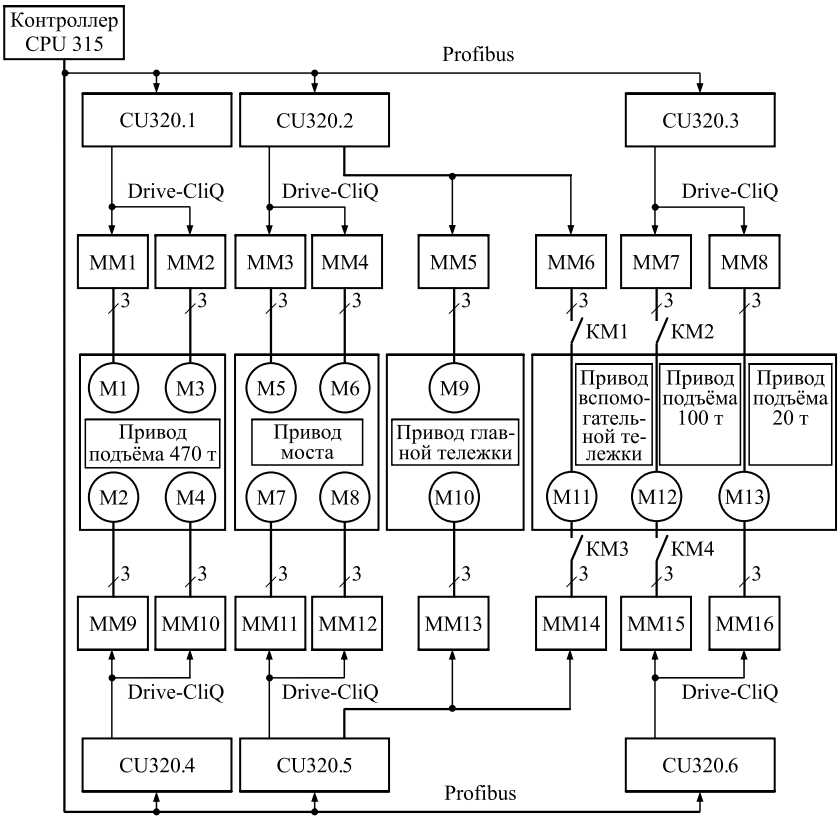


Рис. 1. Структурная схема управления электродвигателями крана

Целью работы, представленной в настоящей статье, является разработка электронной системы, осуществляющей с использованием контроллера CPU 315 передачу информации о состоянии приводов в промышленный компьютер (ПК) с последующим её архивированием и возможностью отображения в виде графиков и сообщений.

Для решения поставленной задачи необходимо определиться с перечнем сигналов и их значений, за которыми необходимо вести наблюдение, а затем обеспечить формирование телеграмм с этими значениями (при помощи программы STARTER) с последующей записью в блоки данных внутренней памяти контроллера и дальнейшей передачей, архивированием и отображением на экране ПК при помощи редакторов и функций проводника WinCC Explorer. На рис. 2 представлена функциональная схема прохождения информации от системы управления электроприводом до её изображения на мониторе ПК. Рассмотрим подробно каждый из приведённых на схеме этапов.

Модуль управления, например, электроприводами главного и вспомогательного подъёма, передвижением тележек имеет свой адрес в сети Profibus, и с этим адресом он сконфигурирован при помощи программного обеспечения SIMATIC STEP7 в проекте контроллера CPU 315. В проект также загружены основные специальные файлы преобразователя частоты

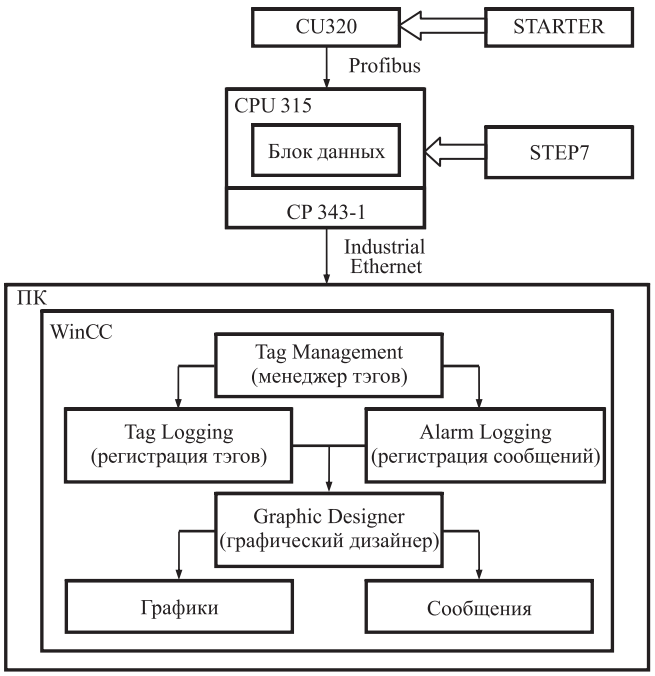


Рис. 2. Функциональная схема прохождения информации от модулей управления к ПК

каждого привода, полностью описывающие все его признаки и параметры. Модуль управления собирает и отправляет в контроллер телеграммы в определённой последовательности и определённой длины с информацией от объектов привода: модуля двигателя (MM), терминальных плат (TM15) и непосредственно с самого модуля управления CU320. Со стороны контроллера в проекте STEP7 сконфигурирован приём этих телеграмм в той же последовательности с записью их содержимого в соответствующие блоки данных с указанными адресами и типами (аналоговые значения, битовые сигналы, сообщения).

Существуют стандартные и специфические наборы телеграмм для каждого объекта привода. В случае отсутствия в указанных телеграммах какого-либо параметра в программе STARTER создаётся свободная телеграмма, формируемая с помощью техники BICO (Binector Connector Technology). Этой телеграммой значение параметра, например r0027 с типом данных Int16 (целочисленный тип с разрядностью 16 бит), определяющего суммарное сглаженное значение тока привода, можно записать в одно из слов состояний, содержащееся в телеграмме [2, 3]. Таким образом, необходимая информация о приводе попадает в контроллер.

Для связи контроллера с ПК на шине S7-300 установлен коммуникационный процессор CP 343-1, позволяющий подключаться к CPU с помощью сети Industrial Ethernet по протоколу TCP/IP. Для создания канала связи, получения, архивирования и визуализации параметров работы привода используется программный продукт фирмы Siemens SIMATIC WinCC (Windows Control Center), ядром которого является WinCC Explorer (проводник WinCC). В WinCC Explorer отображается структура всего проекта и осуществляется управление им (создание проекта подробно рассмотрено в [4]).

Для разработки и создания проектов существуют специальные редакторы. В данном случае необходимы следующие: Tag Management (управление тэгами), Tag Logging (регистрация тэгов), Graphics Designer (графический дизайнер), Alarm Logging (регистрация аварийных сообщений). Чтобы получить доступ из WinCC к информации в блоке данных, между WinCC и контроллером сконфигурировано соединение по протоколу TCP/IP с помощью специального драйвера связи — канал связи.

Tag Managment является основной утилитой WinCC Explorer и используется для связи

своих переменных — тэгов (tags) с данными из блока данных проекта STEP7, содержащемся в контроллере CPU. С помощью него создаются тэги, привязанные к адресам с необходимыми значениями в блоках данных.

Редактор Tag Logging содержит функции, предназначенные для сбора данных от внешних источников и подготовки этих данных для отображения и архивирования из тегов, связанных с помощью Tag Managment. Можно задать различные циклы и условия архивирования: а) постоянное циклическое архивирование (значения тегов постоянно сканируются с заданной цикличностью); б) ациклическое архивирование — текущее значение архивируется, когда происходит соответствующее предварительно сконфигурированное событие (например, выключен блокиратор управления электроприводом главного подъёмного механизма крана — начало архивирования тегов, связанных с параметрами приводов главного подъёма и перемещения его тележки) [5].

Для отображения архивированных данных в виде графика (тренда) используется объект Active-X «WinCC Online Trend Control» (далее WinCC OTC). В редакторе Graphic Designer в кадр визуализации вставляется объект WinCC OTC и подключается к тэгу архивируемого значения. Также с помощью многообразных настроек можно добавить в одно окно другие тэги, изменить внешний вид тренда, свойства и параметры осей, подключить элементы статистической обработки значений на различных выбранных интервалах времени и многое другое.

В редакторе Alarm Logging определяются события, при которых появляются соответствующие сообщения, а также содержание сообщений. В графическом редакторе Graphic Designer есть специальный графический объект WinCC Alarm Control, в котором могут отображаться сообщения, сконфигурированные в редакторе Alarm Logging.

После архивирования тегов сообщений в редакторе Graphic Designer необходимо создать кадры визуализации, на которых будут отображаться соответствующие объекты (графики, таблицы с сообщениями), а также организовать навигацию между ними с помощью кнопок. Например, главный кадр будет содержать кнопки со ссылками на кадры с объектами графиков и сообщений параметров различных групп приводов, состояний механизмов, органов управления и датчиков обратной связи (джойстиков, концевых выключателей и т. д.).

Относительно операционной системы следует указать, что на ПК устанавливается Windows XP SP3 или Windows Server 2003. Собственно ПК должен соответствовать промышленным стандартам виброустойчивости и быть устойчивым к воздействию высоких температур, электромагнитного излучения, иметь повышенное по сравнению с обычными ПК время наработки на отказ. Могут быть выбраны следующие два варианта места установки ПК: в одном из электропомещений, в отдельном специально для этого предназначенном шкафу; в кабине оператора крана. При втором варианте ПК должен быть в компактном исполнении с возможностью настольного или настенного монтажа либо может монтироваться в небольшой навесной или напольный шкаф с подключением к нему подвесного или настенного монитора. Второй вариант более предпочтителен ввиду повышенного уровня опасности в электропомещении крана, а также сложности и дороговизны выбора ПК для максимально допустимых условий эксплуатации (например, у большинства ПК температура ограничивается +40 °С, в то время как в электропомещении она может достигать +55...+60 °С). Размещению ПК в кабине оператора также способствует близость расположенного там же шкафа контроллера.

Заключение. Затраты на приобретение материалов и оборудования, необходимых для внедрения системы сбора и архивирования данных о работе электроприводов и механизмов крана, составят ориентировочно от 3 до 5 тыс. евро. В условиях металлургической промышленности эти средства могут окупиться десятки, а то и сотни раз в зависимости от типа предупреждённой даже одноразовой аварии. Кроме того, не следует забывать, что снижение аварийности влияет также и на уровень безопасности работ, например, связанных с перемещением ковшей с расплавленной сталью.

Библиографические ссылки

1. **Siemens.** SINAMICS S120. Руководство по вводу в эксплуатацию. М., ООО «Сименс», 2005. 326 с.

2. **Siemens.** SINAMICS S120. Ввод в эксплуатацию с помощью инструмента STARTER.M., ООО «Сименс», 2006. 91 с.

3. **Siemens.** SIMATIC S. Списки параметров. М., ООО «Сименс», 2005. 1206 с.

4. **Siemens.** SIMATIC HMI. WinCC V6. Основная документация. Руководство пользователя. М., ООО «Сименс», 2003. 524 с.

5. **Siemens.** WinCC. Регистрация тэгов. Руководство. М., ООО «Сименс», 1999. 120 с.

УДК 621.791.05:681.5

В.П. Сидоров, д-р техн. наук, **А.В. Мельзитдинова**
(Тольяттинский государственный университет)

melzitdinova@gmail.com

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРА СВАРНОГО ШВА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ИЗДЕЛИЯ

Предложена методика автоматического регулирования ширины шва при односторонней сварке стыкового соединения без разделки кромок по температуре поверхности изделия. Рассмотрено влияние отклонений параметров процесса сварки на ширину обратного валика. Приведены расчёты, доказывающие работоспособность предлагаемой методики.

Ключевые слова: автоматическое регулирование; односторонняя сварка; ширина обратного валика; температура поверхности; отклонения параметров.

An automatically adjustment methodology of the welded joint width for indirect welding of the butt joint without groove according to the surface temperature of the product is proposed. The influence of the welding process parameters deviations on the width of the reverse bead is considered. The calculations that prove the operability of the proposed methodology are given.

Keywords: automatic adjustment; indirect welding; width of the reverse bead; surface temperature; parameters deviation.

Повышение качества сварных соединений и его стабильности — важное требование современного производства. Стабильность геометрии шва является непременным условием обеспечения стабильности его других характеристик. В работе [1] приведены результаты исследований требований к точности параметров при двухсторонней сварке без разделки кромок при установленном допуске на глубину проплавления. В данной работе определяли условия обеспечения автоматического регулирования при односторонней сварке стыкового соединения без разделки кромок при задании допуска на ширину обратного валика (ШОВ) шва. ШОВ при сварке на весу во многом определяет вероятность прожога или непровара, так как длина и площадь сварочной ванны с обратной стороны пластины однозначно с ней связаны. В работе [2] приводятся сведения о системе автоматического регулирования (САР) по температуре поверхности изделия. В этом случае требуется измерение температур в двух точках поверхности изделия. Точки располагаются позади сварочной ванны, что приводит к отставанию реакции на возмущения в зоне контроля температур от времени действия возмущений.

Предлагаемая методика основана на предположении, что возмущения как контролируемых, так и неконтролируемых параметров процесса сварки вызывают аналогичные возмущения ширины сварочной ванны и температуры поверхности изделия вблизи сечения сварочной ванны максимальной ширины. Вследствие этого при контроле температуры на поверхности изделия в точке с продольной координатой, близкой к продольной координате сечения сварочной ванны максимальной ширины, нет необходимости измерять все контролируемые параметры, а достаточно контролировать только один, используемый для регулирования. Расположение точки замера вдоль шва в зоне достижения шириной сварочной ванны максимального значения повышает точность регулирования.

На рис. 1 представлена схема сварного соединения. При регулировании требуется стабилизировать ширину обратного валика E_2. При расчёте температур ось Y перпендикуляр-

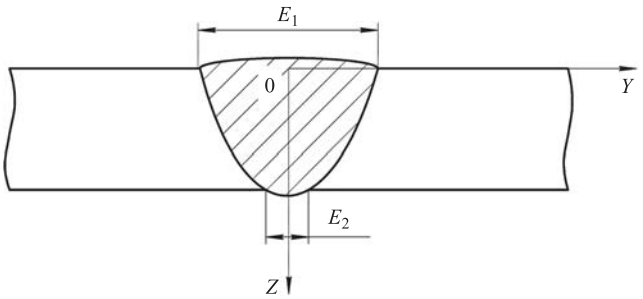


Рис. 1. Поперечное сечение одностороннего сварочного шва:
E_1 — максимальная ширина шва на лицевой поверхности (со стороны действия сварочной дуги); E_2 — номинальная (эталонная) ШОВ

на к направлению скорости сварки, а ось Z направлена от наружной поверхности пластины со стороны действия сварочной дуги. ШОВ имеет важное значение при сварке. При излишней ШОВ может произойти прожог под действием веса ванны и давления сварочной дуги, а при недостаточной — наступить непровар.

Возможности регулирования исследовали с помощью формулы для нормально-кругового источника тепла, движущегося на поверхности плоского слоя — пластины, правомерность применения которой показана в работе [3].

Формула для расчёта температур при сварке имеет вид

$$T = T_0 + \frac{2q_{\text{и}}}{c\rho(4\pi a)^{1,5}} \sum_{n=-N}^{N} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}(t_0+t)} \times \\ \times \mathrm{e}^{-\left[\frac{(z-2n\delta)^2}{4at} + \frac{\left[x-V_{\text{с}}(t_0+t)\right]^2+y^2}{4a(t_0+t)}\right]} dt, \quad (1)$$

где x, y, z — координаты точки измерения относительно подвижной системы координат источника тепла, см; координата x считается в данном случае положительной в направлении, противоположном направлению скорости сварки; T — температура в точке измерения, °С; T_0 — начальная температура пластины, °С; t — время, прошедшее с момента начала действия движущегося источника тепла, с; $c\rho$ — объёмная теплоёмкость материала изделия, Дж/(°С·см^3); $q_{\text{и}}$ — эффективная мощность дуги, Вт; δ — толщина пластины, см; a — температуропроводность, см^2/с; $t_0 = 1/(4ak)$ — постоянная времени, характеризующая сосредоточенность теплового потока от источника тепла к изделию, с; k — коэффициент сосредоточенности сварочного источника тепла, см$^{-2}$; $V_{\text{с}}$ — скорость движения источника тепла, см/с; N — число фиктивных источников тепла, учитывающих отражение теплоты от поверхностей плоского слоя (пластины).

Приравняв данное выражение температуре плавления $T_{\text{пл}}$, отсчитываемой от 0 °С, можно рассчитать ширину сварочной ванны в любой плоскости по толщине пластины, в том числе при координате $z = \delta$, т.е. найти координаты y, x, при которых $T = T_{\text{пл}}$.

Эффективная мощность дуги определяется по формуле

$$q_{\text{и}} = U_{\text{с}} I_{\text{с}} \eta_{\text{и}},$$

где $\eta_{\text{и}}$ — эффективный КПД сварочного источника тепла; $U_{\text{с}}$ — напряжение сварки; $I_{\text{с}}$ — ток сварки.

Номинальные значения теплофизических коэффициентов принимали равными значениям соответствующих коэффициентов для высоколегированной стали: объёмная теплоёмкость $c\rho$ = 3,476 Дж/(°С·см^3); температуропроводность a = 0,0432 см^2/с. Плотность осевого теплового потока была выбрана по литературным данным: q_0 = 4200 Вт/см^2. Коэффициент сосредоточенности сварочного источника тепла k = 11 см$^{-2}$; диаметр пятна нагрева $D_{\text{н}}$ = 1,04 см. Данному значению коэффициента сосредоточенности соответствует постоянная времени t_0 = 0,526 с. Температуру плавления высоколегированной стали, отсчитываемую от 0 °С, принимали равной 1440 °С; T_0 = 20 °С. Таким образом, номинальная (эталонная) расчётная температура плавления $T_{\text{пл}} - T_0$ при определении размеров сварочной ванны составляла 1420 °С.

Параметры источника тепла для изотермы, приведённой на рис. 2: эффективная мощность $q_{\text{и}}$ = 1200 Вт; скорость сварки $V_{\text{с}}$ = 0,495 см/с; толщина пластины δ = 0,4 см. Данной эффективной мощности соответствует сварочный ток $I_{\text{с}} \approx 200$ А при вольтовом эквиваленте эффективной мощности дуги в аргоне прямой полярности с неплавящимися электродами $U_{\text{э}} = q_{\text{и}}/I_{\text{с}}$ = 6 Вт/А.

На рис. 2 сварочная ванна смещена в сторону положительных x. Максимальная ШОВ E_2 = 0,166 см имеет место при x = 1,0 см.

ШОВ вблизи своего максимума изменяется с низкой интенсивностью. Поэтому длина участка сварочной ванны, на котором ШОВ отличается от максимальной ширины E_2 = = 0,166 см всего на 0,03...0,04 см (18...24 %), составляет 0,2 см (x = 0,9...1,1 см). В пределах этой зоны по оси X вне сварочной ванны следует выбирать точки для замера температуры на поверхностях пластины. Можно принять, что диапазон координат, при котором обеспечивается необходимая точность регулирования, составляет от 0,9 до 1,1 продольной координаты точки сварочной ванны с максимальной шириной проплавления. Перемещение точки

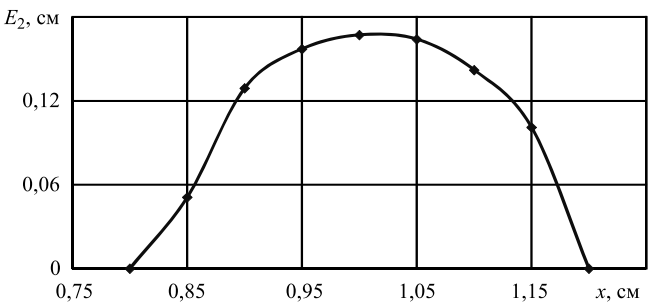


Рис. 2. Зависимость ширины сварочной ванны на обратной плоскости пластины от продольной координаты x

замера по направлению скорости сварки позволяет выбрать её оптимальное положение с точки зрения синхронности изменений температуры в этой точке и в зоне максимальной ширины сварочной ванны.

Положение продольной координаты сечения сварочной ванны с максимальной шириной можно определить предварительно, перед сваркой, расчётом с помощью формулы (1) или опытным путём. Последнее можно сделать, например, по очертаниям кратера сварочного шва от его передней части до установившейся ширины шва.

Зависимость ШОВ E_2 от эффективной мощности дуги (рис. 3) существенно нелинейна. Эталонную полуширину сварочной ванны обратного валика можно выбрать в центре отрезка между $y = 0$ и координатой максимальной полуширины валика, т.е. при $y = \pm 0{,}75$ мм. Приняли, что ширина сварочной ванны и обратного валика E_2 может изменяться от 0 до 3 мм. Допустимые отклонения ШОВ $\pm\Delta E_2$ по абсолютной величине будут одинаковы. В этом случае потребуется регулировать эффективную мощность с различными коэффициентами чувствительности в зависимости от знака отклонения E_2. Эталонное значение эффективной мощности дуги $q_и$ для обеспечения номинальной ШОВ E_2 = 0,15 см составило 1194 Вт, максимально допустимое — 1263 Вт, минимальное — 1171 Вт. Скорость сварки $V_с$ = 0,495 см/с, толщина пластин — 0,4 см. Теплофизические характеристики материала такие же, как и для зависимости, приведённой на рис. 2.

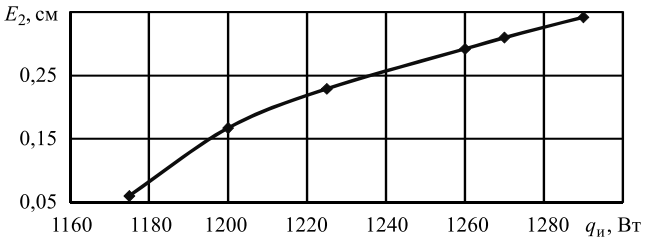


Рис. 3. Влияние эффективной мощности дуги на ШОВ

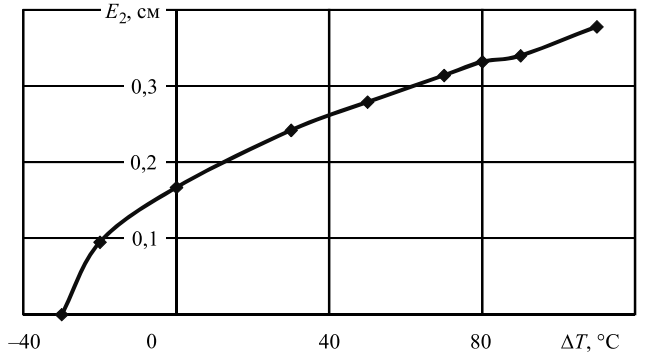


Рис. 4. Зависимость ШОВ от отклонения начальной температуры деталей ΔT_0 при $q_и$ = 1194 Вт, $V_с$ = 0,495 см/с

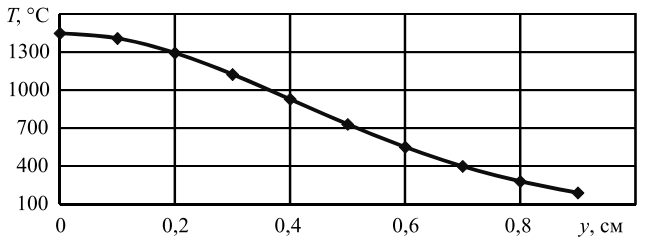


Рис. 5. Распределение температуры по оси *Y* на обратной поверхности пластины при x = 1,0 см

Зависимость, приведенная на рис. 4, позволяет определить предельные положительные и отрицательные отклонения начальной температуры ΔT_0, при которых достигаются предельные размеры обратного валика. Для эталонной начальной температуры T_0 = 1420 °С они составляют +66 и −25 °С соответственно.

Точку замера температуры выбрали при y = 0,5 см, меньшей двойной ШОВ (E_2 = 0,3 см). Параметры сварки — номинальные. При таких параметрах расчётная номинальная температура контролируемой точки $T_т$ = 747 °С (рис. 5).

В табл. 1 приведены допустимые расчётные относительные отклонения основных параметров процесса ΔP от их значений P при максимальной ШОВ $\Delta P/P$, а также изменение при этом относительной температуры в точке контроля $\Delta T_т/T_т$.

Поскольку расчётная температура плавления для ШОВ и номинальная температура в точке замера отличаются примерно в 2 раза, то и допустимые относительные отклонения температур в этих точках также отличаются примерно в 2 раза.

Таблица 1

Допустимые расчётные относительные отклонения основных параметров процесса

Параметр P		$\frac{\Delta P}{P}\cdot 100$, %	$\frac{\Delta T_т}{T_т}\cdot 100$, %
Эффективная мощность дуги $q_и$	$+\Delta E_2$	+5,8	+5,0
	$-\Delta E_2$	−1,9	−1,8
Скорость сварки $V_с$	$+\Delta E_2$	−5,0	+7,2
	$-\Delta E_2$	+1,9	+2,6
Начальная температура изделия T_0	$+\Delta E_2$	+4,6	+9,0
	$-\Delta E_2$	−1,8	−3,5

Корректирующее значение эффективной мощности дуги определяется по формуле

$$\Delta q_{\text{и}} = \frac{\Delta T_{\text{т}}}{\Delta T_0}\Delta q_x,$$

где $\Delta T_{\text{т}} = T_{\text{и}} - T_0$ — положительное или отрицательное отклонение температуры в контролируемой точке изделия $T_{\text{и}}$ от эталонного значения T_0, при котором получена эталонная ШОВ; ΔT_0 — допустимое положительное или отрицательное отклонение от эталонного значения начальной температуры изделия по отношению к допускаемым отклонениям эталонной максимальной ширины сварочной ванны; Δq_x — допустимое положительное или отрицательное отклонение эффективной мощности от эталонного значения по отношению к допускаемым отклонениям максимальной ширины сварочной ванны.

В табл. 2 приведены относительные изменения ширины шва на лицевой поверхности пластины E_1.

Из всех параметров только уменьшение скорости сварки оказывает сопоставимое с E_2 влияние на размер E_1.

На рис. 6 показана схема автоматического регулирования по температуре. Свариваемое изделие *1* подаётся в зону сварки со скоростью $V_{\text{с}}$. Сварочный источник питания *2* подключается одним полюсом к свариваемому изделию *1*, а другим — к сварочной горелке *3*. Между электродом сварочной горелки *3* и свариваемым изделием *1* возбуждается электрическая дуга *4*, и расплавляются кромки свариваемого металла. Образуется сварочная ванна *5* и после затвердевания расплавленного металла — шов с шириной обратного валика E_2. Процесс сварки контролируется с помощью фотопирометра *6*, измеряющего температуру поверхности пластины вне шва в зоне

Таблица 2

Относительные изменения величины E_1 при допустимых отклонениях E_2

Параметр	$+\frac{\Delta E_1}{E_1}\cdot 100$, %	$-\frac{\Delta E_1}{E_1}\cdot 100$, %
Эффективная мощность	+3,2	−0,8
Скорость сварки	−8,1	0
Температура детали	+2,4	−0,1

Примечание. Номинальная ширина лицевого шва E_1 = 0,782 см.

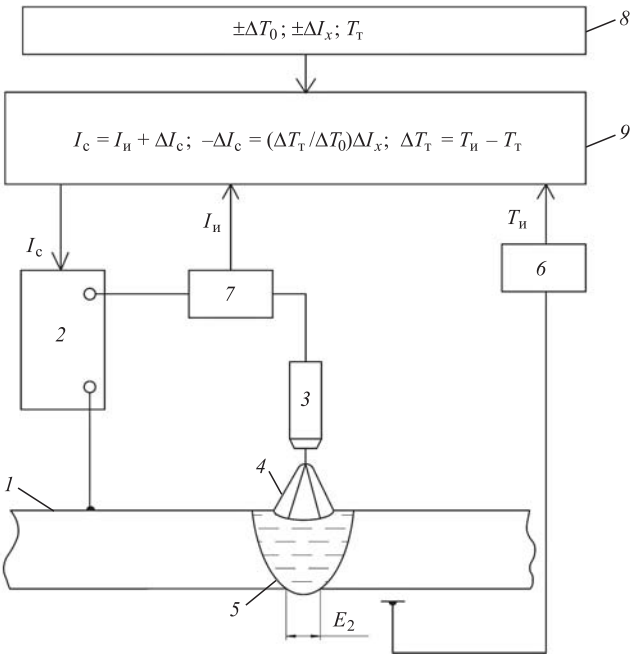


Рис. 6. Схема автоматического регулирования

максимальной ШОВ, и датчика сварочного тока *7*. Значения допустимых положительных и отрицательных отклонений начальной температуры деталей $\pm\Delta T_0$ и сварочного тока $\pm\Delta I_x$, а также эталонной температуры точки $T_{\text{т}}$ хранятся в блоке памяти *8*.

Текущие значения сварочного тока $I_{\text{и}}$ и температуры точки $T_{\text{и}}$ передаются в вычислительный блок *9*. В нём вначале вычисляется отклонение текущей температуры точки от установленного эталонного значения: $\Delta T_{\text{т}} = T_{\text{и}} - T_{\text{т}}$. После этого вычисляется корректирующее значение тока $\Delta I_{\text{с}}$ по формуле

$$\Delta I_{\text{с}} = \frac{\Delta T_{\text{т}}}{\Delta T_0}\Delta I_x,$$

где $\Delta T_{\text{т}} = T_{\text{и}} - T_0$ — положительное или отрицательное отклонение температуры контролируемой точки изделия $T_{\text{и}}$ от эталонного значения T_0, при котором получена эталонная ШОВ (шва); ΔT_0 — допустимое положительное или отрицательное отклонение начальной температуры изделия от эталонного значения, обеспечивающее допустимые отклонения эталонной максимальной ширины сварочной ванны; ΔI_x — допустимое положительное или отрицательное отклонение тока сварки от эталонного значения, обеспечивающее допустимые отклонения максимальной ширины сварочной ванны.

Значение требуемого сварочного тока $I_{\text{с}}$ определяется в вычислительном блоке *9* путём

сложения текущего значения тока с регулирующим воздействием: $I_с = I_и + \Delta I_с$, затем передаётся в сварочный источник питания *2*, где устанавливается с помощью устройства регулирования тока.

Вычислительный блок *9* и блок хранения констант *8* взаимодействуют так, что при увеличении измеренной температуры по отношению к эталонной из блока *8* в блок *9* поступают положительные значения допустимых отклонений температур и тока, а вычисленному значению корректирующего воздействия тока $\Delta I_с$ присваивается противоположный знак, т.е. получим $-\Delta I_с$.

При снижении измеренной температуры по отношению к эталонной из блока *8* в блок *9* поступают отрицательные значения допустимых отклонений температур и тока, а вычисленному значению корректирующего воздействия тока $\Delta I_с$ присваивается противоположный знак, т.е. получим $+\Delta I_с$.

Пример. Опытным и расчётным путями получали данные, необходимые для автоматического регулирования максимальной ширины сварочной ванны по предлагаемой методике. Способ сварки — неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона без присадочной проволоки. Номинальный режим сварки стыкового соединения толщиной 4 мм без разделки кромок из высоколегированной стали: ток сварки 200 А, скорость сварки 0,495 см/с, напряжение сварки $U_с$ = 14 В. Длина дуги $L_д$ = 3 мм. Начальная температура пластин при сварке 20 °С. Ширина шва со стороны действия сварочной дуги E_1 = 6 мм, с обратной стороны — E_2 = 1,5 мм. Для расчётов были приняты следующие теплофизические свойства стали: $c\rho$ = 3,476 Дж/(°С·см^3); температуропроводность a = 0,0432 см^2/с. Плотность осевого теплового потока q_0 = 4200 Вт/см^2. Коэффициент сосредоточенности сварочного источника тепла k = 11 см$^{-2}$; диаметр пятна нагрева $D_н$ = 1,04 см. Данному коэффициенту сосредоточенности соответствует постоянная времени t_0 = 0,526 с. Температура плавления высоколегированной стали, отсчитываемая от 0 °С, $T_{пл}$ = 1440 °С. Номинальная температура деталей перед сваркой T_0 = 20 °С. Таким образом, номинальная (эталонная) расчётная температура плавления $T_{пл} - T_0$ при определении размеров сварочной ванны составляла 1420 °С.

В результате графического решения системы уравнений для полученных размеров шва были определены $q_и$ = 1194 Вт и q_0 = 4200 Вт/см^2.

После этого расчётным путём определяли продольную координату $x_м$ вдоль оси сварочного источника тепла, в которой имеет место максимальная ширина сварочной ванны. Получили $x_м$ = 1,0 см. Поперечную координату точки замера температур $y_т$ выбрали в диапазоне между максимальной шириной шва и её удвоенной величиной: $y_т$ = 0,5 см. После этого рассчитали номинальное значение температуры в точке замера: $T_т$ = 747 °С.

Для установленных допустимых отклонений ШОВ расчётным путём установили допустимые отклонения эффективной мощности дуги: $+\Delta q_и$ = 69 Вт и $-\Delta q_и$ = −23 Вт. Зная вольтов эквивалент эффективной мощности дуги, получили допустимые отклонения сварочного тока $+\Delta I$ и $-\Delta I$.

Таким же образом установили допустимые отклонения начальной температуры свариваемых деталей: $+\Delta T_0$ = 66 °С; $-\Delta T_0$ = −25 °С для ШОВ. При этом отклонения температуры контролируемой точки имели такие же значения.

После этого уменьшали скорость сварки до предельного значения $V_с$ = 0,47 см/с, увеличивающего ШОВ до E_{2max} = 0,3 см. Расчётная температура в точке замера увеличилась на 52 °С: до 799 °С. После чего рассчитали корректирующее значение эффективной мощности дуги по формуле

$$\Delta q_и = \frac{\Delta T_т}{\Delta T_0}\Delta q_x = \frac{52}{66}\cdot 69 = 54 \text{ Вт}.$$

Значение эффективной мощности дуги необходимо уменьшить до $\Delta q_и$ = 1194 − 54 = = 1140 Вт. Переход от значений эффективной мощности дуги к значениям сварочного тока, используемого для регулирования, осуществляли с помощью вольтова эквивалента или эффективного КПД. Например, при $U_э$ = 6 Вт/А сварочный ток необходимо уменьшить на ΔI = 54/6 = 9 А. Расчётная ШОВ при скорректированных параметрах режима $V_с$ = = 0,47 см/с и $q_и$ = 1140 Вт составила 0,157 см. Погрешность регулирования составит (0,007/0,15)·100 % = 4,7 %.

Заключение. По предлагаемой методике регулирования ширины обратного валика точка измерения температуры на поверхности изделия выбирается не на шве, а вне его, на нерасплавленной поверхности, в зоне, близкой к сварочной ванне, там, где ванна имеет максимальную ширину. Это значительно умень-

шает различие по времени действия возмущений, для учёта влияния которых измеряется температура поверхности изделия, на зону максимальной ширины ванны и зону замера температуры. Также улучшается качество регулирования ширины валика на обратной поверхности изделия за счёт повышения точности регулирования и снижения отставания по времени реакции регулирующего параметра на действие возмущений.

Библиографические ссылки

1. **Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В.** Исследование допустимых отклонений параметров дуговой двухсторонней сварки // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 11—15.

2. **Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А.** Автоматизация сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 421 с.

3. **Сидоров В.П., Хурин С.А.** Моделирование провара при дуговой сварке стыковых соединений без разделки кромок // Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 36—42.

УДК 681.5:658.78

Ю.В. Васильков, д-р техн. наук, проф., **В.С. Федотов, Д.И. Алиев**
(Ярославский государственный технический университет)

myvas@gapm.ru

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СКЛАДОМ КАК ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрен динамический склад в качестве составной части производственной системы, в функционировании которой заинтересовано как само производство, так и потребитель продукции со склада. Для анализа особенностей функционирования такого склада использован системный подход, который позволил обосновать выделение трёх зон склада, в которых сталкиваются интересы управления. В итоге выделены требования потребителя к задаче управления процессами на складе, формированию пакетов перевозимых изделий и их перевозке по складу. Показаны подходы к формированию управления в каждой зоне склада.

Ключевые слова: автоматический склад; робот-манипулятор; формирование пакетов; случайный спрос; размещение изделий на складе; условия оптимальности работы склада.

The dynamic warehouse is considered as an integral part of the production system, in the operation of which both the production itself and the consumer of the products from the warehouse are interested. The systematic approach, which made it possible to justify the separation of three warehouse zones in which management interests are encountered was used to analyze the features of the such a warehouse functioning. As a result, the requirements of the consumer for the task of managing processes in the warehouse, the formation of transported products packages and their transportation through the warehouse are dedicated. The approaches to the management formation in each zone of the warehouse are shown.

Keywords: automatic warehouse; robot-manipulator; formation of packages; accidental demand; placement of products in the warehouse; conditions of the optimum warehouse work.

Введение. Автоматические склады широко применяются в современных производствах. Они играют значимую организационную роль, поскольку помимо хранения товаров осуществляют взаимодействие собственно с производством и с потребителями.

Автоматические склады предназначены для приема, хранения, учёта, выдачи на производство сырья, материалов, тары, а также временного хранения и накопления готовых изделий [1]. Затраты на хранение и размещение изделий могут достигать 30...60 % от её конечной стоимости [2]. Чтобы снизить эти затраты, требуется разработка эффективных алгоритмов управления складскими операциями.

Статья посвящена одному из распространенных типов складов напольного хранения, где работают два портальных робота-манипулятора (*A* и *B*). У них общие портал и область работы [3]. Это накладывает ограничения на

перемещение роботов и возможность эффективного размещения изделий на складе.

Рассматриваемый тип склада можно назвать «динамическим»: на него в один «порт» (входной конвейер) ритмично поступают штучные изделия с производства, которые выгружаются (нередко малыми партиями), как правило, с другого «порта» (выходной конвейер) [4]. Для поступления изделий на склад и их выгрузки используются одновременно два робота-манипулятора, которые работают совместно с учётом динамической конфликтности зон деятельности. То есть входные и выходные потоки практически нигде не пересекаются, за исключением внутрискладских операций. Периодичность отгрузки продукции на выходе из склада обусловливает требование более высокой средней скорости отгрузки изделий по сравнению со скоростью их поступления на склад. Невыполнение этого требования приводит к временным переполнениям или опустошениям склада, т. е. отсутствию свободных мест или полному отсутствию изделий на складе. Длительно хранящихся изделий на складе практически нет. Как правило, в таких складах не создаются специальные климатические условия хранения, так как они чаще всего находятся непосредственно на территории предприятия-производителя, где такие условия уже существуют [5].

Нередко на автоматических складах рассматриваемого класса выполняются некоторые дополнительные операции, связанные с контролем качества поступивших изделий. Такие внутренние процессы являются самостоятельными. Они оказывают влияние на возможные выходные потоки (в процессе контроля качества продукция может быть разделена на отдельные категории, например годная и брак, или на более мелкие группы с учётом сортности изделий), но эти операции заранее предусмотрены, спланированы, управление ими реализуется по известным алгоритмам и не добавляет оригинальности в общие алгоритмы управления рассматриваемым классом производственных процессов.

В статье рассматриваются технологические автоматические склады, которые являются частью собственно производства, органически включенной в единую производственную систему. Поэтому анализировать и синтезировать системы управления собственно складом необходимо с учётом системных позиций, заключающихся в рассмотрении склада как производственной единицы, с одной стороны, и как составной части общего производства — с другой. При этом требования к управлению складом тесно связаны с требованиями к управлению предшествующими и последующими технологическими процессами. Кроме этого, и вопросы оценки качества управления складскими операциями должны решаться с учётом взаимодействующих со складом производственных операций. То есть все задачи управления динамическим автоматическим складом должны решаться с учётом требований предыдущего этапа производственного процесса — собственно производства изделий и последующего — отгрузки изделий потребителю.

Общая постановка задачи управления автоматическим технологическим складом. С учётом системности синтеза задачи управления автоматическим технологическим складом оценку эффективности рассмотренной производственной цепочки целесообразно представить как некоторую интегральную оценку с учётом «интересов» всех трёх взаимосвязанных производственных участков: формирования пакета изделий, размещения на складе и отгрузки потребителю.

Первым «стыком интересов» отдельных участков можно считать обеспечение соответствия заданной производительности по потоку продукции возможностям склада, отсутствия «заторов» при поступлении изделий на склад. Время загрузки изделий на склад определяет возможность остановки входного потока, что может вызвать или временную остановку производства, или нарушение технологии, а следовательно, и качества производимой продукции при временном прекращении работы входного транспортёра и «сваливании» с него изделий в неприспособленные места временного хранения, или остановку производства. При этом могут возникнуть экономические потери. Поэтому обеспечению непрерывного входного потока на склад уделяется большое внимание и этот аспект управления является важным для оценки качества работы склада.

Важную роль в ускорении работы склада играет формирование пакетов изделий на входе, что позволяет сокращать время перемещения изделий по складу и отгружать их потребителю без дополнительных операций. Можно, в частности, формировать полностью однородные (или близкие к полностью однородным) отгружаемые изделия в форме пакетов. Такие пакеты можно разгружать с меньшими затратами.

Пусть производство поставляет на склад m типов изделий. Среднюю интенсивность входных потоков обозначим как q_i, возможные потери (затраты на внутрискладские операции формирования пакетов) для каждого потока

$$Z^i = Z^i(q_i,\ U_1,\ U_2), \qquad (1)$$

где U_1 — множество параметров алгоритма управления, определяющих возможность формирования однородных пакетов и устранения образования «заторов» при передаче изделий с участка производства на участок хранения; U_2 — множество параметров алгоритма управления, определяющих время перевозки и размещения на хранение перевозимых изделий на территории склада; $i = 1, 2, ..., m$.

Общие возможные потери (энергии, времени) могут составить

$$Z_1 = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i(q_i) Z^i, \qquad (2)$$

где $\alpha_i(q_i)$ — весовые коэффициенты по каждому виду продукции, зависящие от интенсивности потока производства этой продукции.

Влияние потока изделий на потери очевидно, так как при малых интенсивностях потоков время образования «затора» при входе на склад может не совпасть с моментом нахождения изделия этого типа на подающем транспортёре и «затор» не приведет к сбоям в производстве или дополнительным, не предусмотренным технологией, операциям по временной перекладке изделий с транспортёра.

Несмотря на ритмичность входных потоков, обусловленную ритмичностью производства, в реальных условиях могут существовать некоторые отклонения от плановой ритмичности, связанные с возможными технологическими отклонениями, одновременной выгрузкой изделий на общий входной конвейер, задержками отдельных операций производства. Это приведет к непостоянному временно́му шагу поступления изделий на входной конвейер. Однако данная неритмичность значительно меньше, чем изменчивость спроса на выходящую со склада продукцию, поэтому её в моделях управления можно не учитывать. Но фактически её можно легко учесть техническими подсистемами контроля входного потока в зоне разгрузки.

С помощью выражений (1) и (2) оцениваются не только материальные потери, но и временны́е, связанные со временем выполнения операции разгрузки входного конвейера и временем перемещения изделий по складу.

Другой оценкой качества работы склада являются затраты Z_2 на внутрискладские операции — перевозку изделий от «порта» входного потока в зону «порта» выходного потока. Здесь возможны различные траектории, объёмы перевозимых изделий, координаты мест размещения изделий, которые в итоге определяют затраты:

$$Z_2 = Z_2(X(U_1,\ U_2),\ Y(U_1,\ U_2)). \qquad (3)$$

Вторым «стыком интересов» отдельных участков будем считать обеспечение минимальных затрат на отгрузку изделий потребителю. Здесь затраты связаны как с доставкой изделий с места хранения на выходной транспортёр, так и с простоем транспорта потребителя во время получения изделий. Обе составляющие отражают и временны́е потери, и соответствующие материальные.

Время отгрузки изделий со склада определяет производительность склада с позиции потребителя. Задержка приводит к простою транспортных средств потребителя, возможно, и к его дополнительным потерям. Спрос реализуется партиями, формирование которых в большей мере случайно (в сравнении с поставкой изделий на склад). Размер партии, как правило, определяется интересами потребителя и обусловлен договорными отношениями на достаточно большую партию изделий. Однако могут формироваться локальные партии в связи с существенными перерывами в потреблении. При этом в связи с одновременной работой с разными потребителями также случайным является и ассортимент изделий в каждой запрашиваемой партии, что обусловлено несогласованными во времени запросами потребителей. Поэтому эффективность взаимоотношений с потребителями (прежде всего суммарное время отгрузки партии и затраты на эту отгрузку) также является важной характеристикой управления деятельностью склада. Влиять на эту характеристику можно организацией размещения изделий для их хранения на складе: она должна способствовать эффективной организации оперативной отгрузки путём выбора оптимальных мест (координат размещения пакетов изделий X, Y) для хранения. В общем случае выбор мест расположения изделий должен определяться и законами распределения спроса на изделия, хранящиеся на складе.

Затраты Z_3 можно выразить следующим образом:

$$Z_3 = Z_{3\,\text{отгрузки}}(X(U_2,\ U_3),\ Y(U_2,\ U_3),\ t(U_3)) + \\ + Z_{3\,\Sigma\text{ожидания}}(X(U_2,\ U_3),\ Y(U_2,\ U_3),\ t(U_3)), \quad (4)$$

где $X(U_2,\ U_3)$, $Y(U_2,\ U_3)$ — вектор координат места расположения отгружаемых потребителю изделий, которые зависят от параметров управления U_2, используемого на этапе перевозки изделий по складу, и от управления U_3, которое может быть сведено к формированию требований к координатам размещения изделий на складе с учётом закона распределения спроса на изделия; $t(U_3)$ — суммарное время ожидания транспорта потребителя отгрузки всего объёма изделий в партии.

Видно, что затраты на третьем этапе определяются эффективностью управления на втором этапе, т.е. местами размещения изделий на позиции хранения пакета изделий, которые, в свою очередь, выбираются на втором этапе управления после анализа закона распределения ожидаемого спроса на изделия.

Суммарные затраты можно определить так:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3. \quad (5)$$

На основе проведённого анализа составляющих затрат на функционирование автоматического технологического склада можно считать целесообразной декомпозицию общей задачи управления на три связанные подзадачи, обусловленные, с одной стороны, наличием различных механизмов управления затратами в каждой задаче, а с другой — возможностью управлять процессом в каждой задаче в определённой мере независимо, хотя и с учётом соседних участков, но при этом можно обеспечить автономное управление в каждой задаче при фиксированных значениях управляющих параметров соседних производственных зон [6]. Другими словами, управление всем складом с заинтересованными в его эффективности сторонами (производитель, собственно склад, потребитель) разбивается на взаимосвязанные, но обеспечивающие определённую независимость управления зоны: формирования пакетов изделий, перевозки их по складу и отгрузки потребителю.

Общая задача управления производственной системой с автоматическим складом может быть поставлена следующим образом: минимизировать суммарные затраты (т. е. повысить эффективность производственной системы с автоматическим складом) путём выбора параметров управления в зоне формирования перевозимых пакетов изделий U_1, перевозки изделий на складе U_2 и отгрузки изделий со склада U_3 при ограничении на время перевозки изделий по складу для обеспечения отсутствия «заторов» при разгрузке входного конвейера и на предельные координаты размещения изделий на складе для исключения конфликтных ситуаций между двумя конкурирующими роботами-манипуляторами A и B, а также при известном на текущий момент времени t законе распределения Q частот f_j и требуемого числа M_j появления j-х изделий в спросе. То есть

$$Z \to \min_{U_1,U_2,U_3} / t_{\text{perev}} < t_{\text{cycle}}; \\ (X-1,Y)_A < (X,Y)_B; \bar{Q}_j(f_j, M_j) = \bar{Q}_{\text{zad}\,t}, \quad (6)$$

где t_{perev} — время формирования и перевозки пакета изделий по складу; t_{cycle} — время цикла входного потока для пополнения склада; $(X,\ Y)_{A(B)}$ — координаты роботов-манипуляторов A и B соответственно при каждом движении с перевозимым пакетом изделий.

Рассмотрим общие подходы к декомпозиции задачи управления автоматическим технологическим складом как производственной системой.

Очевидно, что в соответствии с особенностями задач общую задачу (6) можно представить в виде совокупности трёх задач:

задачи минимизации времени ожидания транспорта потребителя и затрат на отгрузку изделий. Исходя из известного текущего закона распределения частоты f_j и числа M_j j-го типа изделий в объёме спроса представим координаты X, Y размещения всех типов изделий как аргумент минимизации суммарных затрат для выгрузки заданного числа p типов изделий со склада. В данном случае минимизация затрат будет совпадать и с минимально возможным временем отгрузки, так как время и затраты на отгрузку определяются координатами мест хранения, точнее, расстоянием от точки хранения до места разгрузки выходным роботом-манипулятором B на выходном транспортёре. Под координатами X, Y будем понимать координаты места расположения сформированного пакета одинаковых изделий j-го типа. Математически эта задача записывается следующим образом:

$$(X,Y)_{j,i}^{\text{treb}} = \\ = \arg\left(\min \sum_{k=1}^{p} Z_{3,k}\right) / \bar{Q}_j(f_j,\ M_j) = \bar{Q}_{zad\,t}; \quad (7) \\ i = 1,\ 2,\ \ldots\ m.$$

Результатом решения этой задачи являются требования к предпочтительным координатам мест расположения пакетов изделий;

задачи определения оптимальных с точки зрения выгрузки координат изделий. Определённые на первом этапе формирования управления предпочтительные координаты размещения пакетов изделий каждого типа являются местом разгрузки для робота-манипулятора A, который их перевозит от входного «порта». Для выбора конкретных значений координат складских ячеек, которые в данной момент свободны, должна быть решена следующая задача оптимизации:

$$\begin{aligned}&(X,Y)_{j,i} = \arg(\max(X,Y))/(X,Y)_{j,i} \subset \\ &\subset \Omega(X,Y)_j^{\text{treb}}; \\ &(X-1,Y)_A < (X,Y)_B;\ t_{\text{perev}} < t_{\text{cycle}}.\end{aligned} \quad (8)$$

Определение координат хранения изделий исходя из обеспечения максимального расстояния до места хранения обеспечивает минимальные суммарные затраты для транспортных операций по отгрузке сформированных пакетов от входного «порта» до наилучшего (с позиции выгрузки) места хранения;

задачи формирования на входе на склад пакетов для перевозки. Пакет должен удовлетворять следующим требованиям:

быть сформированным непосредственно из входящих изделий, без их промежуточного временного хранения;

содержать минимально возможное число типов изделий;

быть полным, т.е. соответствовать полной грузоподъёмности робота-манипулятора A.

В этом случае снизятся затраты на разгрузку разнородной продукции в месте хранения. В качестве алгоритмов управления в каждой зоне предпочтительно использовать эвристические алгоритмы [7], что обусловлено сложной структурой задачи, в которой есть как числовые переменные, так и алгоритмические функции.

Заключение. Предложенная на основе системного анализа концепция управления автоматическим технологическим складом как производственной системой позволяет резко снизить за счёт декомпозиции задачи размерность вектора управления и свести задачу к совокупности трёх взаимосвязанных задач, соответствующим этапам работы склада.

Библиографические ссылки

1. **Гаджинский А.М.** Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика: учеб.-практическое пособие. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2005. 176 с.

2. **Фразелли Э.** Мировые стандарты складской логистики / Пер. с англ. М.: Альпина-Паблишер, 2013. 336 с.

3. **Automated** warehouse systems and distribution solutions [Электронный ресурс]. URL: http//www.egemin-automation.com/en/automation/material-handling-automation_hasolutions/automated-warehouse-systems (дата обращения 14.06.15).

4. **Федотов В.С., Васильков Ю.В.** Логистика автоматизированного склада: сб. науч. тр. по материалам VII Междунар. науч.-практ. конф. «Логистика и экономика ресурсосбережения в промышленности»: Ярославль, 2013. 209 с.

5. **Клавдиенко Н.В., Мирошниченко Д.А.** К вопросу определения оптимальных параметров транспортно-складских комплексов // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n4p1y2012/1088 (дата обращения 12.08.15).

6. **Могилевский В.Д.** Методология систем. М.: Экономика, 1999. 252 с.

7. **Мельников Б.Ф.** Эвристические алгоритмы решения задач комбинаторной оптимизации // В мире научных открытий. 2012. № 12.1. С. 86—114.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении
по каталогу «Пресса России» — **индекс 27838.**

УДК 681.121.85

Ж.А. Даев, д-р философии, канд. техн. наук, доц.
(Актюбинский университет им. академика С. Баишева, Республика Казахстан)
zhand@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФУЗОРА С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ В КАЧЕСТВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВ

Рассмотрено применение диффузора с криволинейными образующими в качестве первичного преобразователя расхода и количества жидкостей и газов. Получены основные характеристики расходомерного преобразователя и установлено влияние параметров диффузора на процесс измерения расхода жидкостей и газов. Выполнен анализ неопределённостей измерения расхода.

Ключевые слова: диффузор; измерение расхода; преобразователь; расходомер; переменный перепад давлений; расширение.

The application of a diffuser with curvilinear generatrices in the capacity of a primary converter of the liquids and gases flow and quality is considered. The main characteristics of the flowmeter converter are obtained and the influence of the diffuser parameters on the flow measurement of liquids and gases is established. The uncertainty analysis of flow measurement is realized.

Keywords: diffuser; flow measurement; converter; flowmeter; variable pressure difference; expansion.

Введение. В настоящее время наблюдается мировая тенденция ежегодного увеличения потребления водных и углеводородных ресурсов. Повышение точности и надёжности средств измерения их расхода является сегодня одной из самых актуальных задач. Данная задача приобретает особую актуальность при организации на предприятиях экономии энергоресурсов и реализации автоматизированных технологий с высоким уровнем энергосбережения.

Существует множество методов и средств измерения расхода жидкостей и газов, которые реализуются на ещё большем числе первичных преобразователей расхода. Но производители расходомерного оборудования продолжают поиск и разработку наиболее надёжных и высокоточных методов и средств измерения расхода жидкостей и газов. В соответствии с работой [1] среди методов измерения расхода лидирующее положение занимает метод переменного перепада давлений, особенно широко он распространен в газовой промышленности. В соответствии с данными [1, 2] расходомеры переменного перепада давлений занимают практически одну треть всего мирового парка расходомерных средств и систем (27 %).

Метод переменного перепада давлений основан на создании в измерительном трубопроводе на измерительном преобразователе сужающего типа потери давления, которая пропорциональна измеряемому расходу жидкости или газа. В качестве сужающего устройства используют различные сопла или трубы Вентури, диафрагму.

Данному методу более ста лет. За это время методику выполнения измерения неоднократно совершенствовали. Были выполнены работы по модернизации измерительных преобразователей и улучшению исходных коэффициентов истечения сужающих устройств [3, 4], которые отражены в международных нормативных документах типа [5]. Среди последних работ, посвящённых повышению надёжности и точности метода переменного перепада давлений, можно отметить работы [6, 7], где предлагаются альтернативные уравнения для коэффициентов истечения и проведены дополнительные исследования в целях уточнения параметров, влияющих на процесс измерения расхода. Обобщение полученных результатов можно найти в работах [8, 9].

Но тем не менее метод переменного перепада давлений имеет ряд недостатков: большие потери давления на сужающем устройстве, небольшой диапазон измерений, влияние дефектов поверхности сужающих устройств на процесс измерения, невозможность очистки

измерительного трубопровода без демонтажа сужающего устройства и др. Поэтому в рамках данной статьи рассматривается инверсная задача измерения расхода с преобразователями расширяющего типа в качестве альтернативы традиционным преобразователям сужающего типа. Применение простых конических, ступенчатых и осекольцевого диффузоров в качестве преобразователей расхода рассмотрено в работах [10—12]. Рассмотрим применение в качестве первичного преобразователя расхода диффузора с криволинейными образующими и особенности измерения расхода с помощью такого преобразователя.

Особенности диффузора с криволинейными образующими, применяемого в качестве расходомерного преобразователя. Применение диффузоров в качестве первичных преобразователей расхода предполагает реализацию метода измерения, инверсного существующему методу с сужающими устройствами. В диффузорах, так же как и в любых местных сопротивлениях потока, возникает потеря давления, которая пропорциональна измеряемому расходу жидкости или газа.

В соответствии с работами [10—12] основные уравнения для измерения расхода остаются такими же, как и для метода с сужающими устройствами, кроме уравнений для коэффициента истечения, коэффициента скорости входа и в случае измерения расхода газа уравнения для коэффициента его расширения.

Уравнение для функции преобразования расходомера выглядит следующим образом:

$$Q = \alpha\varepsilon\frac{\pi D_2^2}{4}\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \qquad (1)$$

где α — коэффициент расхода; ε — коэффициент расширения газа; D_2 — диаметр отверстия на выходе диффузора; Δp — перепад давлений, создаваемый устройством; ρ — плотность в рабочих условиях.

Коэффициент расхода

$$\alpha = CE,$$

где C — коэффициент истечения расширяющего устройства, представляющий собой отношение действительного расхода к теоретическому; E — коэффициент скорости на входе в расширяющее устройство.

Коэффициент расхода диффузорного расширяющего устройства при теоретическом методе отбора и стационарном течении жидкости или газа по измерительному трубопроводу вычисляется следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\beta^2 - 1 - \xi}}, \qquad (2)$$

где β — относительный диаметр расширяющего устройства, который представляет собой отношение входного диаметра диффузора к выходному; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Уравнение для коэффициента скорости на входе в расширяющее устройство выводится традиционным способом, но из-за инверсии немного отличается от уравнения для E при прямом методе:

$$E = \frac{1}{\sqrt{\beta^4 - 1}}. \qquad (3)$$

Для реализации метода измерения расхода с использованием в качестве первичного преобразователя диффузора, который имеет криволинейные образующие, необходимо установить взаимосвязь между коэффициентом расхода и параметрами диффузора, связанными с его гидравлическими потерями.

Из известного справочника по гидравлическим сопротивлениям [13] можно найти уравнение и характеристики данного диффузора:

$$\xi = \varphi\sigma d. \qquad (4)$$

Параметры, входящие в уравнение (4), вычисляются по следующим формулам:

$$d = \left(1 - \frac{1}{\beta^2}\right)^2;$$

$$\sigma = 1,43 - \frac{1,3}{\beta^2};$$

$$\varphi = 1,0053 - 0,5335\frac{l}{D_g} + 0,1672\left(\frac{l}{D_g}\right)^2 - 0,0185\left(\frac{l}{D_g}\right)^3,$$

где l/D_g — относительная длина диффузора; l — длина образующей диффузора; D_g — гидравлический диаметр устройства. Подставляя уравнение (4) в уравнение (2), получаем уравнение для коэффициента расхода исследуемого расширяющего устройства.

Таким образом, задача измерения расхода с помощью преобразователей расширяющего типа сводится к нахождению их коэффициента истечения:

$$C = \frac{\alpha}{E} = \sqrt{\frac{\beta^4 - 1}{\beta^2 - 1 - \varphi\sigma d}}. \qquad (5)$$

На рис. 1 приведены графики изменения коэффициента истечения в зависимости от относительного диаметра диффузора при различных значениях его относительной длины. Видно, что графики имеют линейный характер. Это говорит о том, что отношение действительного расхода к теоретическому при реализации рассматриваемого метода будет линейным. Такая зависимость является преимуществом расширяющих устройств, что, несомненно, позволяет расширить номенклатуру первичных преобразователей расхода, в основе которых лежит метод переменного перепада давлений. Из рис. 1 также следует, что влияние относительной длины диффузора является минимальным. Увеличение этого параметра незначительно сдвигает график вправо, что позволяет применять диффузоры практически любой длины, не беспокоясь о её влиянии на процесс измерения.

Уравнения типа (1) легко реализуются в программируемых контроллерах, которые выполняют разработанные алгоритмы вычисления расхода с помощью данных преобразователей.

Оценим неопределённость измерения расхода с помощью диффузора, имеющего криволинейные образующие. Аналитическое выражение для суммарной неопределённости аналогично полученному для расходомеров, основанных на методе переменного перепада давлений с сужающими устройствами, но формулы для коэффициентов чувствительности при стандартных неопределённостях величин, входящих в уравнение (1), получаются очень сложными.

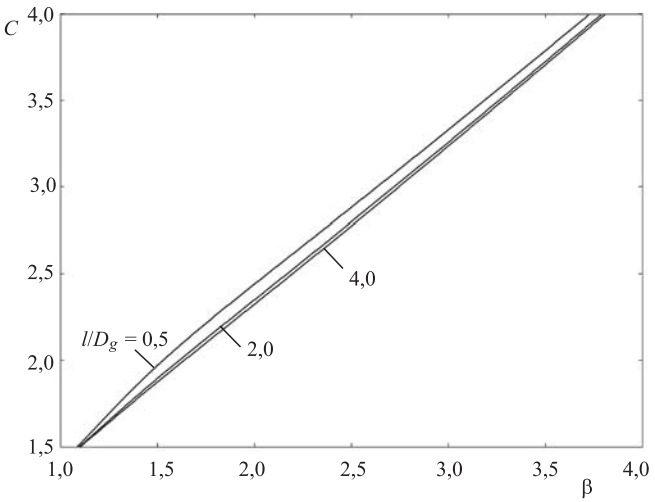


Рис. 1. Зависимость коэффициента истечения от относительного диаметра диффузора

Уравнение для оценки неопределённости расхода жидкости:

$$u_Q^2 = \alpha_1^2 u_{D1}^2 + \alpha_2^2 u_{D2}^2 + \\ + \alpha_3^2 \left(u_l^2 + u_{Dg}^2\right) + 0,25\left(u_{\Delta p}^2 + u_\rho^2\right), \qquad (6)$$

где

$\alpha_1 = \frac{\varphi}{\beta^2}\left(2,6d - 4\sigma d^{0,5}\right) - \frac{2\beta^4}{\beta^4 - 1} - \beta^2\left(\frac{\sqrt{\beta^4 - 1}}{C^2} - 2\left(\beta^4 - 1\right)\right)$ — первый коэффициент чувствительности;

$\alpha_2 = \frac{2\beta^4}{\beta^4 - 1} + \beta^2\left(\frac{\sqrt{\beta^4 - 1}}{C^2} - 2\left(\beta^4 - 1\right)\right) - \frac{\varphi}{\beta^2}(2,6d - 4\sigma d^{0,5}) + 2$ — второй коэффициент чувствительности;

$\alpha_3 = \frac{\sigma d \varphi_0}{C}$ — третий коэффициент чувствительности;

$$\varphi_0 = -0,5335\frac{l}{D_g} + 0,3344\left(\frac{l}{D_g}\right)^2 - 0,0555\left(\frac{l}{D_g}\right)^3;$$

u_Q — неопределённость измерения расхода; u_{D1} — неопределённость измерения входного диаметра диффузора (измерительного трубопровода); u_{D2} — неопределённость измерения выходного диаметра диффузора; u_l — неопределённость измерения длины образующей диффузора; u_{Dg} — неопределённость определения гидравлического диаметра; $u_{\Delta p}$ — неопределённость измерения перепада давлений на диффузоре; u_ρ — неопределённость измерения плотности.

Как видно из уравнения (6), неопределённость измерения расхода u_Q во многом зависит от параметров, которые являются комбинацией геометрических размеров диффузора, таких как его относительный диаметр и относительная длина.

Анализ коэффициентов чувствительности показывает, что α_1 и α_2 имеют одинаковый порядок, но противоположные знаки. С ростом относительного диаметра эти параметры неограниченно растут, но при вычислении общей неопределённости результата измерения расхода они взаимно компенсируются. Итоговая общая неопределённость измерения расхода

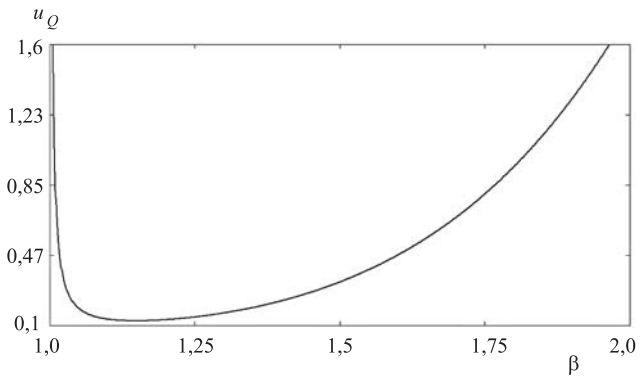


Рис. 2. Зависимость неопределённости измерения расхода от относительного диаметра

также растёт при увеличении относительного диаметра (рис. 2).

На рис. 2 видно, что на кривой имеется небольшой диапазон значений относительного диаметра диффузора, при котором обеспечивается минимальная неопределённость измерения расхода. Данное явление можно использовать для подбора такого соотношения между геометрическими параметрами, при котором преобразователь обеспечивает приемлемую неопределённость измерения. Также на графике, приведённом на рис. 2, видно, что при относительном диаметре диффузора более 1,75 наблюдается резкое увеличение неопределённости: более 1 %. Поэтому рекомендуемые значения относительного диаметра диффузора находятся в пределах $1 < \beta \leqslant 1{,}75$. Увеличение величины β влечет за собой увеличение пропускной способности расходомера с таким диффузорным преобразователем.

Заключение. Получено решение задачи измерения расхода жидких и газообразных веществ с первичным преобразователем расхода, в качестве которого применяется диффузор с криволинейными образующими. Получено уравнение для коэффициента истечения преобразователя расширяющего типа, установлен характер его изменения в зависимости от относительного диаметра диффузора — линейность в широком диапазоне. Также выполнен анализ неопределённости измерения расхода, который может служить дополнительным критерием для подбора геометрических параметров преобразователя в целях обеспечения оптимального значения неопределённости измерения расхода. Представленные результаты исследований могут быть полезны специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией систем измерения расхода жидкостей и газов.

Библиографические ссылки

1. **Yoder J.** Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma // Control Magazine. 2001. Vol. 9. P. 1—6.

2. **Yoder J.** Measuring gas flows // Flow Control. 2010. Vol. 6. P. 46—48.

3. **Stolz J.** A Universal Equation for the Calculation of Discharge Coefficient of Orifice Plates. Amsterdam, North-Holland, 1978. 32 p.

4. **Reader-Harris M.J., Sattary J.A., Spearman E.P.** The Orifice Plate Discharge Coefficient Equation. East Kilbride, Glasgow: NEL, Progress Report. No. PR14: EUEC/17 (EEC005). 1992.

5. **ISO 5167-1:2003.** Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. 2003. 33 p.

6. **Cristancho D.E., Hall K.R., Coy L.A., Iglesias-Silva G.A.** An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas // Flow Measurement and Instrumentation. 2010. Vol. 21. P. 299—301.

7. **Baker O., Lau P., Tawackolian K.** Reynolds number dependence of an orifice plate // Flow Measurement and Instrumentation. 2013. Vol. 30. P. 123—132.

8. **Даев Ж.А.** Об уточненном уравнении исходного коэффициента истечения стандартных диафрагм по Кристанчо — Холлу // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 8. С. 37—39.

9. **Daev Zh.A.** A Comparative Analysis of the Discharge Coefficients of Variable Pressure-Drop Flowmeters // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. P. 323—326.

10. **Бычков Ю.М.** Датчик давления для расходомера // Патент России № 20157970. 2000. Бюл. № 29.

11. **Daev Zh.A.** The Use of a Step-Down Diffuser as a Flow Transducer // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56. P. 426—428.

12. **Даев Ж.А.** Применение осекольцевого диффузора с обтекателем в качестве преобразователя расхода газа // Приборы. 2014. № 2. С. 16—19.

13. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

УДК 517.4

В.Б. Терентьев, д-р техн. наук, доц.
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлет», г. Ахтубинск)

tav-21 @mail.ru

УПОРЯДОЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассмотрены вопросы многокритериального выбора и упорядочения объектов на примере авиационной техники. Представлена функция, определяющая степень достижимости реализуемым значением показателя заданного критерия. Расширена область применения методов многокритериального анализа для случая заданных значений критериев как позитивного, так и негативного типа, находящихся внутри или вне диапазона варьирования показателей.

Ключевые слова: авиационная техника; эффективность; многокритериальные задачи; критерии; функция достижимости.

The questions of multicriteria choice and ordering of objects on the example of aviation equipment are considered. A function that determines the accessibility degree of the implemented value for designated criterion indicator is introduced. The sphere of multicriteria analysis methods for the designated values of criteria, both positive and negative, that are inside or outside the variation range of indicators is expanded.

Keywords: aircraft equipment; efficiency; multicriteria tasks; criteria; accessibility function.

В современной технологии математического моделирования при решении задачи многокритериального выбора и упорядочения объектов могут использоваться различные методы [1], в том числе метод простого суммарного взвешивания (SAW — Simple Additive Weighting Method) и метод «идеальной точки» TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution). При сравнении образцов авиационной техники (АТ) предпочтительнее применять эти два метода. Они достаточно просты, объективны и легко программируются. Метод SAW позволяет работать как с показателями мажорируемого типа — позитивными, когда максимальная эффективность достигается при наибольшем значении показателя, так и с негативными показателями, когда максимальная эффективность достигается при наименьшем значении показателя. Преимущество метода TOPSIS состоит в том, что наиболее предпочтительная альтернатива должна не только иметь наибольшую близость к идеальному решению, но и быть дальше всех остальных альтернатив от неприемлемого решения. К недостатку метода можно отнести работу только с позитивными показателями.

При сравнении альтернативных вариантов АТ по их эффективности возникает необходимость учитывать не только позитивные или негативные показатели, но и показатели с заданными значениями, т.е. критериями. В конкретных ситуациях возникает необходимость оценивать объекты АТ по степени близости к заданному значению. Следует отметить, что значение критерия может быть в середине диапазона рассматриваемых показателей, т. е. рост эффективности АТ увеличивается при приближении не к минимуму или максимуму, а именно к заданному значению. Кроме того, эффективность АТ, как правило, имеет нелинейную зависимость от значений показателя. Поскольку существующие алгоритмы методов SAW и TOPSIS не позволяют решать такую задачу, то требуется некоторая модернизация этих методов, позволяющая расширить возможности применения метода многокритериального выбора и упорядочения объектов для такого рода сравнения альтернатив.

При применении любых методов вначале строится исходная матрица принятия решения $\mathbf{A_0}$ со значениями показателей. Каждый элемент матрицы $\mathbf{A_0}$ представляет собой исходное значение j-го показателя ($j = \overline{1, m}$) для i-го альтернативного варианта ($i = \overline{1, n}$). Указанные n гипотетических образцов АТ необходимо ранжировать по степени близости к заданным требованиям. Величина n определяет число строк в матрице (альтернативы), а величина m — число столбцов (используемые показатели).

Далее формируется матрица заданных значений показателей $\mathbf{A_z}$ (вектор, преобразованный в матрицу для удобства вычислений в среде Mathcad), которые могут быть позитивного или негативного типа и иметь заданные значения как между максимальными и минимальными значениями показателей, представленными в исходной матрице, так и за этими пределами.

В общем случае, когда идёт речь о степени приближения показателя к заданному значению, желательно использовать функ-

цию, описывающую вероятность достижения получаемым значением заданного. Данная «функция достижимости» должна изменяться в пределах от нуля до единицы с плавным протеканием процесса изменения, отличным от линейного [2]. С этой целью формируется отношение полученного (реализованного в процессе создания образца АТ) значения показателя A_r к его заданному значению A_z:

$$A = \frac{A_r}{A_z}.$$

Это отношение рассматривается как случайная величина (СВ), подчиняющаяся нормальному закону распределения с соответствующей плотностью вероятности $f(A)$ и определяемая в соответствии с теорией как предел отношения вероятности попадания СВ на отрезок к длине этого отрезка, когда длина отрезка стремится к нулю [3],

$$f(A) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(A-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ — среднее квадратичное отклонение СВ;
μ — математическое ожидание СВ.

Если значение показателя не получено (объект АТ не обладает необходимым свойством, которое характеризуется в количественном виде соответствующим показателем), это означает, что оно равно нулю (как и СВ A). В случае достижения заданного значения отношение A_r/A_z становится равным единице. Математическое ожидание СВ приравнивается к единице, поскольку реализованное значение должно достигать заданного (считается наиболее вероятным событием по постановке задачи).

Вероятность того, что СВ примет какое-то промежуточное значение, также изменяется в этих пределах (от нуля до единицы из условия задачи). Функцией, наиболее хорошо описывающей такое поведение СВ, может являться плотность вероятности, но ограниченная указанными пределами. Поскольку максимальная высота функции распределения в этом случае равняется единице, то выражение $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, определяющее в функции распределения её высоту, приравнивается к единице. Отсюда находится среднее квадратичное отклонение σ:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}.$$

При подстановке этой величины в выражение для плотности вероятности она приобретает вид

$$f_1(A) = \mathrm{e}^{-\pi\left(1-\frac{A_r}{A_z}\right)^2}.$$

Формула справедлива, если значение показателя меньше заданного значения критерия. Если значение показателя больше значения критерия, то показатели в данной функции меняются местами:

$$f_2(A) = \mathrm{e}^{-\pi\left(1-\frac{A_z}{A_r}\right)^2}.$$

Определённый интеграл этого выражения в бесконечных пределах, как и обычной плотности вероятности, равен единице, а в пределах от минус бесконечности до единицы он равен 0,5.

В необходимых из постановки задачи пределах от нуля до единицы присутствует небольшая погрешность (отличие от 0,5):

$$F(A) = \int_0^1 \mathrm{e}^{-\pi\left(1-\frac{A_z}{A_r}\right)^2} = 0,4939.$$

Исходя из физического смысла сравнения показателей с такой погрешностью можно согласиться.

Функции f_1 и f_2 позволяют осуществить преобразование исходной матрицы принятия решения в нормированную матрицу **N** с учётом близости к заданным значениям критериев:

$$N_{i,j} = \begin{cases} \mathrm{e}^{-\pi\left(1-\frac{A_z}{A_r}\right)^2}, \text{ если показатель} \\ \text{меньше критерия;} \\ \mathrm{e}^{-\pi\left(1-\frac{A_z}{A_r}\right)^2}, \text{ если показатель} \\ \text{больше критерия.} \end{cases}$$

Данная операция близка по своему смыслу к линейному нормированию, выполняемому в методе SAW (определяющему степень достижения максимума или минимума) [1]. Одновременно она соответствует определению относительного расстояния до идеальной точки в методе TOPSIS. Роль такой точки играет заданное значение критерия. Таким образом, выполненное нелинейное нормирование заменяет, во-первых, линейное нормирование метода SAW, которое не может выполняться для случая заданных значений критериев, расположенных не на минимуме или максимуме, и, во-вторых, нормирование по методу TOPSIS с дальнейшим расчётом идеальной точки и расстояния до неё.

Далее формируется взвешенная нормализованная матрица принятия решений **V** как произведение матрицы **N** на вектор оценок весов выбранных показателей **F**:

$$V_{i,j} = N_{i,j}F_j.$$

Веса могут определяться различными способами: субъективным, основанным на экспертных оценках, или объективным — через расчёт энтропии, или можно задаться равными весами для всех показателей, что иногда в среднем будет соответствовать меньшей ошибке в итоговом расчёте.

Результирующая операция свёртки значений показателей для ранжирования альтернатив выполняется, как в методе SAW:

$$W_i = \sum_{j=1}^{m} V_{i,j}.$$

Метод TOPSIS может применяться, когда для каждого критерия имеет место монотонно возрастающая функция полезности. В других случаях нужно было бы обращаться к методу SAW, который относится к компенсационным методам, т. е. низкие значения одних показателей компенсируются высокими значениями других показателей. Данное обстоятельство иногда незаслуженно относят к недостатку этого метода. Однако, например, при оценке эффективности типовой задачи полёта малая дальность обнаружения наземных объектов может компенсироваться высокой точностью навигационной системы или недостаточная дальность полёта самолёта компенсируется большей дальностью полёта ракеты и т. д. Представленный метод даёт практически полное совпадение результатов расчёта с результатами расчётов методами TOPSIS и SAW для позитивных показателей и незначительное различие с результатами расчёта методом SAW при использовании позитивных и негативных показателей, когда неизвестная функция взаимосвязи эффективности и показателей является нелинейной (линейное и нелинейное нормирование).

Таким образом, предложенный модернизированный вариант метода многокритериального выбора и упорядочения объектов позволяет расширить область применения этого метода для случая заданных значений критериев (позитивных и негативных), находящихся внутри или вне диапазона варьирования показателей.

Библиографические ссылки

1. **Шибанов Г.П.** Современные технологии проведения обликовых исследований // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 4—11.

2. **Терентьев В.Б.** Оптимизация параметров имитаторов воздушных объектов // Сб. докл. Третьей междунар. науч. практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования: новое слово в науке». М.: АНО Изд. дом «Научное обозрение», 2016. С. 103—112.

3. **Яглом А.М., Яглом И.Н.** Вероятность и информация. М.: Мир, 1988. 406 с.

УДК 550.8

Г.Я. Хусаинова, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)
gkama@mail.ru

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ В НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ

Рассмотрен промысловый способ и разработан термодинамический способ определения предельного градиента давления. Составлена программа для определения начального градиента давления по параметрам пласта. Проведён численный эксперимент. Подсчитана максимальная ошибка погрешности вычисления при разных значениях параметров пласта.

Ключевые слова: фильтрация; аномальная жидкость; давление; начальный градиент давления; температурные поля.

The field method is considered and thermodynamic method is developed for determining the limiting pressure gradient. A program for determining the initial pressure gradient by the oil reservoir parameters is formulated. A numerical experiment was carried out. The maximum error of the computing error for different values of the oil reservoir parameters is calculated.

Keywords: filtering; anomalous fluid; pressure; initial pressure gradient; temperature fields.

При разработке некоторых нефтяных месторождений известны факты необычного поведения некоторых пластовых систем. Особенностью фильтрации жидкостей в таких си-

стемах является то, что она начинается после преодоления некоторого градиента давления, которое называется начальным или предельным градиентом давления G_0 [1].

Проявление начального градиента давления при фильтрации нефти существенно влияет на поля давления, температуры и, наконец, на нефтеотдачу [1—3]. Непосредственный интерес представляют определение и изучение проявления начального градиента давления в различных условиях и количественная оценка его влияния на показатели разработки. Существует несколько способов определения начального градиента давления.

В [3] приведён один из гидродинамических способов определения усреднённого значения начального градиента давления G_0. Его суть заключается в следующем: работающая на стационарном режиме добывающая скважина мгновенно останавливается. Датчиком (манометром), установленным в интервале пласта, регистрируется изменение давления. Когда давление устанавливается, осуществляется обратный процесс закачки в пласт некоторого количества той же нефти. В процессе закачки также осуществляется измерение давления манометром. По результатам измерения давления и дополнительных параметров судят о величине начального градиента давления.

Рассмотрим кратко теорию промыслового способа определения начального градиента давления. Пусть на контуре питания давление равно P_k. Через некоторое время после прекращения отбора в пласте установится предельное стационарное давление

$$P = P_k - G_0(R_k - r_0),$$

где r_0, R_k — радиусы скважины и контура соответственно.

При этом давление на забое скважины поднимается до значения

$$P_c' = P_k - G_0 R_k, \qquad (1)$$

которое фиксируется манометром, находящимся на забое скважины.

Если в пласт закачать некоторое количество той же нефти, то её движение начнётся от скважины. Через некоторое время распределение давления будет описываться зависимостью

$$P = P_k + G_0(R_k - r_0).$$

Снимая показания датчика, находим

$$P_c'' = P_k + G_0 R_k. \qquad (2)$$

Вычитая (1) из (2), найдем начальный градиент давления:

$$G_0 = \frac{P_c' - P_c''}{2R_k},$$

где P_c', P_c'' — установившиеся значения показаний датчика (манометра) после прекращения отбора и после прекращения закачки соответственно.

Недостаток рассмотренного гидродинамического метода определения предельного градиента давления из промыслового эксперимента заключается в необходимости осуществления сложных технологических операций, связанных с переводом скважины с режима отбора на режим закачки.

Термодинамический способ определения начального градиента давления свободен от указанного выше недостатка. В его основу положена разработанная в [4, 5] теория нахождения распределения полей температуры для добывающей скважины при аксиально-симметричном течении.

Пусть в полубесконечном горизонтальном пласте происходит плоскорадиальное фильтрационное течение. Распределение температуры при работе добывающей скважины определяется по формуле [4]

$$T = G_0(\varepsilon - \eta)\left(\sqrt{r^2 + \frac{c_l}{c_s}\frac{Q}{\pi h}t} - r\right) + \frac{\varepsilon\mu}{4}\frac{Q}{\pi k h}\ln\left(\frac{r^2 + \frac{c_l}{c_s}\frac{Q}{\pi h}t}{r^2}\right); \quad r \geqslant r_0; \quad t > 0, \qquad (3)$$

где T — температура пласта; G_0 — начальный (предельный) градиент давления; ε — коэффициент Джоуля—Томсона; η — коэффициент адиабатического охлаждения; c_s, c_l — теплоёмкости скелета и жидкости соответственно; Q — объёмный расход жидкости; h — толщина пласта; μ — динамическая вязкость жидкости; k — коэффициент проницаемости.

Зависимость (3) положена в основу термодинамического способа определения начального градиента давления. Термометрами, установленными в скважине, измеряется температура непосредственно на забое после пуска её в работу, которая является исходной информацией.

Задача формулируется следующим образом: на основе измерения зависимости температуры по времени найти начальный градиент давления G_0.

Для обработки исходной информации используется много методов. Наиболее простым является метод наименьших квадратов. Он реализуется следующим образом: строится функция суммарного квадратичного отклонения экспериментальных и расчётных значений температуры, затем сумма минимизируется по значению начального градиента давления G_0:

$$\frac{\partial}{\partial G_0}\sum_{i=1}^{n}\left[\widehat{T}_i - T(r_0, t_i, G_0)\right]^2 = 0,$$

где n — число замеров; $\widehat{T}_i$ — замеренные значения температуры на скважине в моменты времени t_i; r_0 — радиус скважины.

Теоретические значения $T(r_0, t_i, G_0)$ вычисляются по формуле (3). После дифференцирования формулы (3) и несложных преобразований для вычисления G_0 получаем формулу

$$G_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left\{\left[\widehat{T}_i + \frac{\mu Q\varepsilon}{4\pi kh}\ln\frac{r_0^2}{r_0^2 + \frac{c_l}{c_s}\frac{Q}{\pi h}t_i}\right]\left[\sqrt{r_0^2 + \frac{c_l}{c_s}\frac{Q}{\pi h}t_i} - r_0\right]\right\}}{(\eta - \varepsilon)\sum_{i=1}^{n}\left[\sqrt{r_0^2 + \frac{c_l}{c_s}\frac{Q}{\pi h}t_i} - r_0\right]^2}. \quad (4)$$

На основе формулы (4) составлена программа на языке Turbo Pascal для определения начального градиента давления. Осуществлено её тестирование при различных значениях параметров, входящих в (4). Тестирование программы проводилось следующим образом. В качестве экспериментальных данных использовались значения $T(r_0, t_i, G_0)$, вычисленные по формуле (4), с наложением шума.

Конкретные значения G_0, задаваемые при вычислении $T(r_0, t_i, G_0)$, принимались в качестве эталонных $G_{0э}$. Затем, используя программу, по зашумленным значениям определялся градиент давления $G_{0п}$ — экспериментальный или практический. На основании сравнения $G_{0э}$ и $G_{0п}$ оценивалось качество работы программы.

В таблице приведены результаты сопоставления полученных экспериментально значений начального градиента давления $G_{0э}$ и вычисленных по программе $G_{0п}$. Видно, что в диапазоне дебитов от 1 до 100 м^3/сут при начальном градиенте давления $G_0 = 1\cdot10^5$ и $2\cdot10^5$ Па/м и при 5 %-ном шуме погрешность вычисления не превышает 1,8 %, при 10 %-ном — 3,3 %, при 15 %-ном — 4,8 %, при 20 %-ном — 5,2 % и программа определяет значения G_0 с

Результаты сопоставления $G_{0э}$ и $G_{0п}$

Номер измерения	Известные параметры		Относительный шум в температурной кривой, %							
			5		10		15		20	
	Дебит, м^3/сут	$G_{0э}$, Па/м	$G_{0п}$, Па/м	Относительная погрешность	$G_{0п}$, Па/м	Относительная погрешность	$G_{0п}$, Па/м	Относительная погрешность	$G_{0п}$, Па/м	Относительная погрешность
1	1	100 000	100 806	0,008	99 374	0,006	96 413	0,036	101 979	0,020
2	5	100 000	98 245	0,018	102 801	0,028	97 256	0,027	96 012	0,040
3	8	100 000	99 461	0,005	102 772	0,028	103 838	0,038	98 087	0,019
4	10	100 000	99 994	0,000	99 417	0,006	103 336	0,033	102 093	0,021
5	20	100 000	98 673	0,013	101 647	0,016	98 058	0,019	98 144	0,019
6	50	100 000	100 305	0,003	101 526	0,015	103 924	0,039	103 627	0,036
7	80	100 000	99 460	0,005	96 729	0,033	101 229	0,012	98 717	0,013
8	100	100 000	100 005	0,000	101 923	0,019	98 567	0,014	105 238	0,052
9	1	200 000	199 575	0,002	201 832	0,009	209 581	0,048	200 417	0,002
10	5	200 000	201 075	0,005	202 538	0,013	199 511	0,002	189 256	0,054
11	8	200 000	200 719	0,004	202 877	0,014	205 600	0,028	204 978	0,025
12	10	200 000	199 019	0,005	194 518	0,027	205 337	0,027	203 815	0,019
13	20	200 000	197 035	0,015	206 426	0,032	209 126	0,046	201 306	0,007
14	50	200 000	199 538	0,002	203 543	0,018	204 592	0,023	199 800	0,001
15	80	200 000	200 316	0,002	201 542	0,008	195 677	0,022	198 395	0,008
16	100	200 000	200 975	0,005	199 621	0,002	208 977	0,045	214 500	0,052

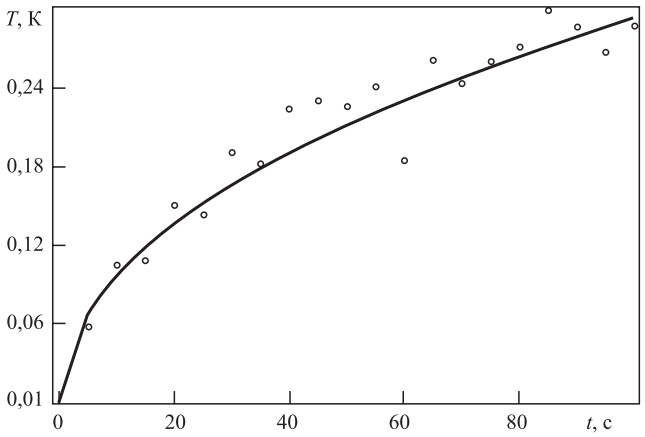


Рис. 1. Сопоставление теоретической кривой (—) с экспериментальными значениями (○)

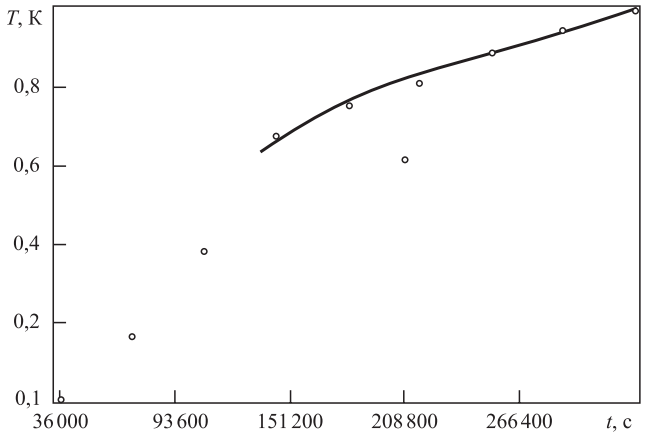


Рис. 2. Пример обработки экспериментальной кривой

точностью не выше 6 % при значениях погрешности измерения температуры ≈20 %. Это свидетельствует о высокой точности программы.

На рис. 1 приведены теоретическая кривая (сплошная линия) и экспериментальные значениями (кружки). Из рис. 1 следует, что результаты решения обратной задачи хорошо согласуются с использованными для интерпретации значениями температуры. Это свидетельствует об удачном выборе интерпретационной модели и удовлетворительной работе использованной программы.

На рис. 2 приведён пример обработки экспериментальной кривой (скважина № 219, Западно-Сургутская площадь). При интерпретации использованы следующие параметры пласта и насыщающей жидкости [7, 8]: $k = 5{,}7 \cdot 10^{-10}$ м^2; $\mu = 0{,}01$ Па·с; $Q = 100$ м^3/сут; $\eta = 1{,}5 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7}$ К/Па. После введения экспериментальных данных в программу и обработки определили начальный градиент давления для данной нефти: $G_0 = (2{,}6 \pm 0{,}3)$ Па/м. Полученное значение удовлетворительно согласуется с результатами гидродинамического определения начальных градиентов давления для нефтяных месторождений Западной Сибири.

Отметим, что термодинамическим способом начальный градиент давления определён впервые и представленное здесь значение, видимо, следует рассматривать как оценочное.

Заключение. Разработан термодинамический способ определения начального градиента давления. Составлена программа, которая на основе экспериментальных входных данных определяет начальный градиент давления. Осуществлено тестирование программы при различных значениях параметров пласта и подсчитана максимальная ошибка погрешности вычисления при разных значениях параметров пласта. Получена зависимость погрешности вычисления от числа измерений.

На основе разработанной теории определён начальный градиент давления по результатам экспериментальных данных.

Библиографические ссылки

1. **Мирзаджанзаде А.Х., Баренблатт Г.И., Ентов В.М.** и др. О возможном влиянии начального градиента давления на разработку многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений при водонапорном режиме // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. 1970. № 1. С. 39—49.

2. **Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.П., Зайцев Ю.В.** Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра, 1972. 200 с.

3. **Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.

4. **Хусаинова Г.Я.** Исследование температурных полей при фильтрации аномальных жидкостей: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 1998. С. 14.

5. **Филиппов А.И., Хусаинова Г.Я.** Развитие термодинамики аномальных жидкостей // Матер. II Уральской региональной межвуз. науч.-практ. конф. Уфа, 1997. С. 34.

6. **Филиппов А.И., Хусаинова Г.Я., Девяткин Е.М.** К термодинамике аномальных нефтей в пластах // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. 1997. № 2. С 38—46.

7. **Кикоин И.К.** Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

8. **Чертов А.Г.** Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы). М.: Высш. шк., 1990. 335 с.

УДК 621.396.6.019.3

М.А. Шалумов, канд. техн. наук
(Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (Владимирский филиал))

ALS140965@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ И КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены вопросы автоматизации комплексного моделирования электрических, тепловых и механических процессов в радиотехнических устройствах и анализа показателей надёжности.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; электронная модель; база данных; Spice-модель.

The automation problems for complex modeling of electrical, thermal and mechanical processes in radio engineering devices and analysis of reliability indicators are considered.

Keywords: radio engineering device; modeling; electronic model; database; Spice model.

В настоящее время существует необходимость проектирования сложных радиотехнических устройств (РТУ) с обеспечением заданных параметров, высокого качества и надёжности.

На российских предприятиях, создающих РТУ и проектирующих электронные схемы, практически не проводится комплексное моделирование электрических, тепловых и механических процессов с передачей данных в карты рабочих режимов электронных компонентов и для анализа показателей надёжности. Это приводит к низким качеству и надёжности электронной аппаратуры, а также увеличению сроков её проектирования из-за множества итераций, связанных с доработкой по результатам испытаний опытных образцов.

Основными причинами, не позволяющими проводить комплексное моделирование, являются:

отсутствие технологии информационной поддержки комплексного моделирования РТУ и, как следствие, отсутствие интегрированной базы данных (БД) электронных компонентов по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим, надёжностным параметрам и механизма её постоянного обновления;

отсутствие технологии создания электронной модели РТУ на принципах CALS-технологий, включающей как геометрические модели, создаваемые в CAD-системах, так и модели электрических, тепловых, механических и других физических процессов, а также модели надёжности.

Устранить эти причины можно лишь при использовании в процессе проектирования новых подходов, включающих моделирование РТУ, в том числе с применением их электронной модели.

Первой задачей является создание инновационной технологии информационной поддержки комплексного моделирования РТУ, структурная схема которой приведена на рис. 1. Рассмотрим более подробно эту технологию.

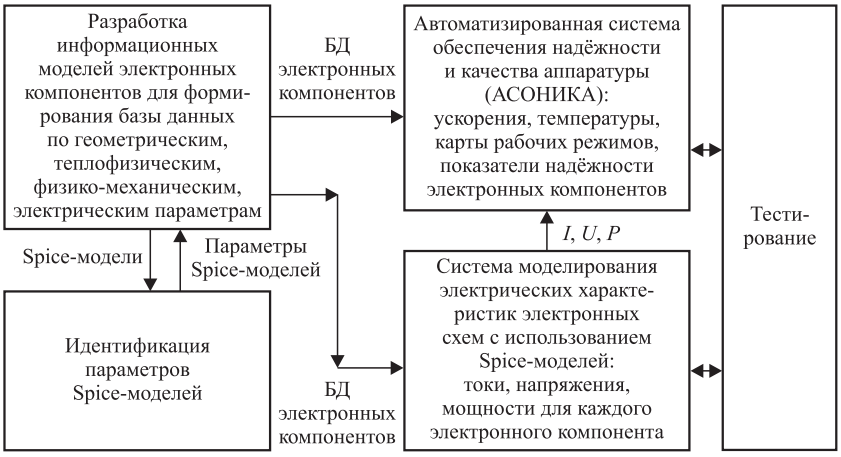


Рис. 1. Структурная схема инновационной технологии информационной поддержки комплексного моделирования РТУ

Spice-модель — это математическая модель компонентов для программы моделирования электронных устройств типа PSpice.

С её помощью рассчитываются переходные процессы при действии различных входных сигналов, их спектры, режимы по постоянному току, частотные характеристики, спектральные плотности внутренних шумов и другие характеристики нелинейных и линеаризованных аналоговых и цифровых устройств, а также смешанных аналого-цифровых устройств [1]. Такие модели создаются для каждого компонента. Например, модель диода содержит такие параметры, как объёмное сопротивление, коэффициент неидеальности, параметр тока рекомбинации, время переноса заряда, показатель степени фликкер-шума и др. Вольт-амперные характеристики диода, ёмкость перехода, линеаризованная схема замещения диода, температурные зависимости параметров записываются с помощью специальных соотношений.

В настоящее время наблюдается проблема недостаточности или отсутствия параметров моделей элементов РТУ, необходимых для проведения моделирования. Поэтому требуется разработать информационные модели электронных компонентов по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим параметрам.

Существуют многочисленные базы данных и библиотеки, построенные по принципу аналогов, которые содержат необходимые параметры моделей. Однако их использование при моделировании может приводить к погрешностям вследствие недостаточной достоверности содержащихся в них параметров. Поэтому необходимо проводить идентификацию параметров моделей элементов РТУ.

Для идентификации нужно использовать специально созданные программные продукты, а также проводить измерения параметров. Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования позволяет определить неизвестные параметры материалов конструкций РТУ и Spice-моделей.

Задача идентификации формулируется в следующем виде: необходимо найти такие значения параметров математической модели, которые удовлетворяют минимуму функции цели и лежат в области допустимых значений параметров, т. е. задача идентификации сводится к задаче оптимизации.

Предложенная информационная технология предполагает обратную связь при идентификации параметров Spice-моделей: значения геометрических, теплофизических, физико-механических и электрических параметров, содержащихся в разработанных информационных моделях электронных компонентов, идентифицируются, а затем возвращаются для сохранения в базе данных.

В автоматизированной системе обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) существует БД электрорадиоизделий (ЭРИ) и материалов, используемых в РТУ, построенная на основе клиент-серверной технологии, благодаря которой можно редактировать данные с клиентских мест [2, 3]. Используется система управления базой данных PostgreSQL.

Содержащаяся в БД информация по теплофизическим и физико-механическим параметрам должна быть достоверной. Значения этих параметров либо выбираются из справочников или технических условий (ТУ) на ЭРИ и материалы, либо идентифицируются. Данные в БД вводятся в основном вручную. Но этот процесс можно автоматизировать. Можно создавать специальные файлы, в которые нужно записывать данные об ЭРИ по шаблону, а затем автоматизированно заносить эту информацию в БД. Также необходимо создавать конвертеры для идентификации параметров и последующего занесения в БД их достоверных значений.

Помимо этого нужно создавать конвертеры с программами расчёта электрических схем: с системой моделирования электрических характеристик электронных схем с использованием Spice-моделей. Такие конвертеры будут передавать результаты расчётов электрических схем (токи, напряжения, мощности для каждого ЭРИ) в подсистемы моделирования АСОНИКА-Т (моделирования тепловых процессов в шкафах и блоках РТУ), АСОНИКА-М-3D (моделирования механических процессов в шкафах и блоках РТУ), АСОНИКА-ТМ (моделирования тепловых и механических процессов в печатных узлах РТУ). Это позволит задавать точные данные для расчётов и в итоге повисит точность и правильность расчётов и, таким образом, позволит моделировать высоконадёжные РТУ.

Данные из БД ЭРИ и данные, полученные в результате расчётов, используются для формирования карт рабочих режимов (КРР) в АСОНИКА.

В комплект КРР на сборочную единицу РТУ низшей ступени, не имеющей в своём составе другой сборочной единицы (например, ячейку, типовой элемент замены и т. п.), входят титульный лист (форма 1а); содержание (форма 2а); карта оценки номенклатуры применённых ЭРИ и сведения о соответствии условий их эксплуатации и показателей надёжности требованиям нормативно-техниче-

ской документации (НТД) (форма 4); карты ЭРИ, применённые при механических воздействиях, не соответствующих требованиям НТД на них (форма 5); карты режимов работы ЭРИ, входящих в состав сборочной единицы (формы 6—87).

Комплект КРР в окончательном виде представляется разработчиком аппаратуры на стадии разработки рабочей документации (по результатам испытаний опытного образца). Возможно составление КРР на более ранних стадиях разработки аппаратуры путём проведения расчётов по схемам или по результатам инструментальных измерений на макетах с последующей их корректировкой (по результатам измерений в опытном образце).

КРР содержат как требования НТД на условия эксплуатации и режимы работы компонентов РТУ, так и данные о реальных условиях эксплуатации, электрических и температурных режимах работы компонентов РТУ в виде числовых значений. Карты рабочих режимов заполняются автоматизированно с помощью подсистемы АСОНИКА-Р. В ней содержатся все возможные формы КРР.

Карты рабочих режимов содержат две колонки: «По НТД» и «В схеме». Эти данные автоматически сравниваются. Если значения, содержащиеся в колонке «В схеме», превышают соответствующие данные, содержащиеся в колонке «По НТД», то они выделяются красным цветом.

Перечень ЭРИ, для которых нужно получить КРР, может быть введён как вручную пользователем, так и путём конвертирования из выходных файлов системы P-CAD, в редакторе ilp-файлов (IlpEditor), в Microsoft Excel и других системах, например АСОНИКА-ТМ.

Кроме того, конвертация перечней ЭРИ из любой системы может осуществляться в рамках интегрированной информационной среды предприятия (PDM-системы) через промежуточный текстовый файл (формат ilp). Возможен экспорт параметров ЭРИ в автоматизированную подсистему анализа показателей безотказности РТУ АСОНИКА-Б.

Созданные в АСОНИКА-Р карты рабочих режимов сохраняются в формате Microsoft Word для последующей распечатки.

После проведения компьютерного моделирования создаётся опытный образец, который подвергается различным испытаниям. Результаты испытаний сравниваются с результатами компьютерного моделирования. Таким образом, проводится тестирование результатов, полученных на каждом этапе представленной инновационной технологии информационной поддержки комплексного моделирования РТУ.

Второй задачей является разработка методов создания интегрированной базы данных ЭРИ по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим и надёжностным параметрам для комплексного моделирования физических процессов в РТУ.

В системе АСОНИКА, как уже было отмечено раннее, создана БД, содержащая геометрические, теплофизические, физико-механические, электрические и надёжностные параметры. Ранее при создании БД не стояла задача работать со всеми параметрами Spice-моделей для каждого ЭРИ. Поэтому она не содержит громадного числа параметров для каждого компонента. Возникает необходимость доработать структуру БД таким образом, чтобы в неё можно было занести многочисленные параметры всех ЭРИ. Это достаточно сложная работа, требующая анализа структуры БД, таблиц, полей.

Третья задача — разработка методов комплексного моделирования физических процессов в электрических схемах и конструкциях РТУ с учётом внешних воздействующих факторов. Для этого можно использовать уже существующий математический аппарат, заложенный в подсистемы АСОНИКА-Т, АСОНИКА-М-3D, АСОНИКА-ТМ.

АСОНИКА-Т может быть использована для моделирования тепловых процессов в типовых конструкциях РТУ (блоках этажерочной и кассетной конструкции, шкафах, стойках). Также можно строить топологическую модель тепловых процессов в виде графа для нетиповых (произвольных) конструкций РТУ. С помощью этой подсистемы можно моделировать тепловые процессы в произвольных конструкциях. АСОНИКА-Т позволяет моделировать стационарные и нестационарные тепловые режимы в воздушной среде при различном атмосферном давлении. Учитывается охлаждение естественной или вынужденной конвекцией. Результаты отображаются в удобной для последующего анализа форме.

АСОНИКА-М-3D автоматизирует процесс моделирования произвольных конструкций РТУ при механических воздействиях. Подсистема позволяет получать ускорения в местах крепления конструкций, механические напряжения и резонансные частоты. С её помощью можно выбрать лучший вариант конструкции из нескольких по механическим режимам работы. Можно моделировать шкафы, блоки РТУ (этажерочные, цилиндрические, кассетные, сложные). Поддерживаются следу-

ющие виды воздействий: гармоническая вибрация, случайная вибрация, удары, линейные ускорения.

Для расчёта конструкции необходимо иметь её эскиз или чертёж, знать наименования материалов, а также указать тип воздействия и его количественную характеристику.

В результате моделирования пользователю становятся доступны поля напряжений, перемещений, ускорений. В контрольных точках можно просмотреть графики зависимости перемещений, ускорений и напряжений от частоты и времени.

Подсистема АСОНИКА-М-3D позволяет рассчитывать стойкость произвольных блоков конструкций РТУ к механическим воздействиям. Конечно-элементная модель любого прибора, равно как и детали при сборке, строится автоматически.

АСОНИКА-ТМ предназначена для моделирования тепловых и механических процессов в печатных узлах РТУ, состоящих из электрорадиоизделий, креплений, проводников, тепловых шин, рёбер жесткости, теплостоков, радиаторов. Возможно моделирование при механических воздействиях (гармонической вибрации, случайной вибрации, одиночном ударе, многократном ударе, линейном ускорении, акустическом шуме), стационарных и нестационарных тепловых воздействиях, а также комплексных механических и тепловых воздействиях. Подсистема может применяться для многослойных конструкций при неравномерном распределении проводников.

Результаты расчёта представляются в виде графиков температур, ускорений, прогибов, напряжений, перемещений в контрольных точках и на отдельных ЭРИ, полей тепловых и механических характеристик, деформации конструкции печатного узла, таблицы максимальных и допустимых напряжений, а также карт механических и тепловых режимов с указанием коэффициентов нагрузок и перегрузок.

Следующая задача — разработка технологии создания электронной модели РТУ на принципах CALS-технологий, включающей как геометрические модели, создаваемые в CAD-системах, так и модели электрических, тепловых, механических и других физических процессов, а также модели надёжности [4]. Процесс формирования электронной модели РТУ представлен на рис. 2.

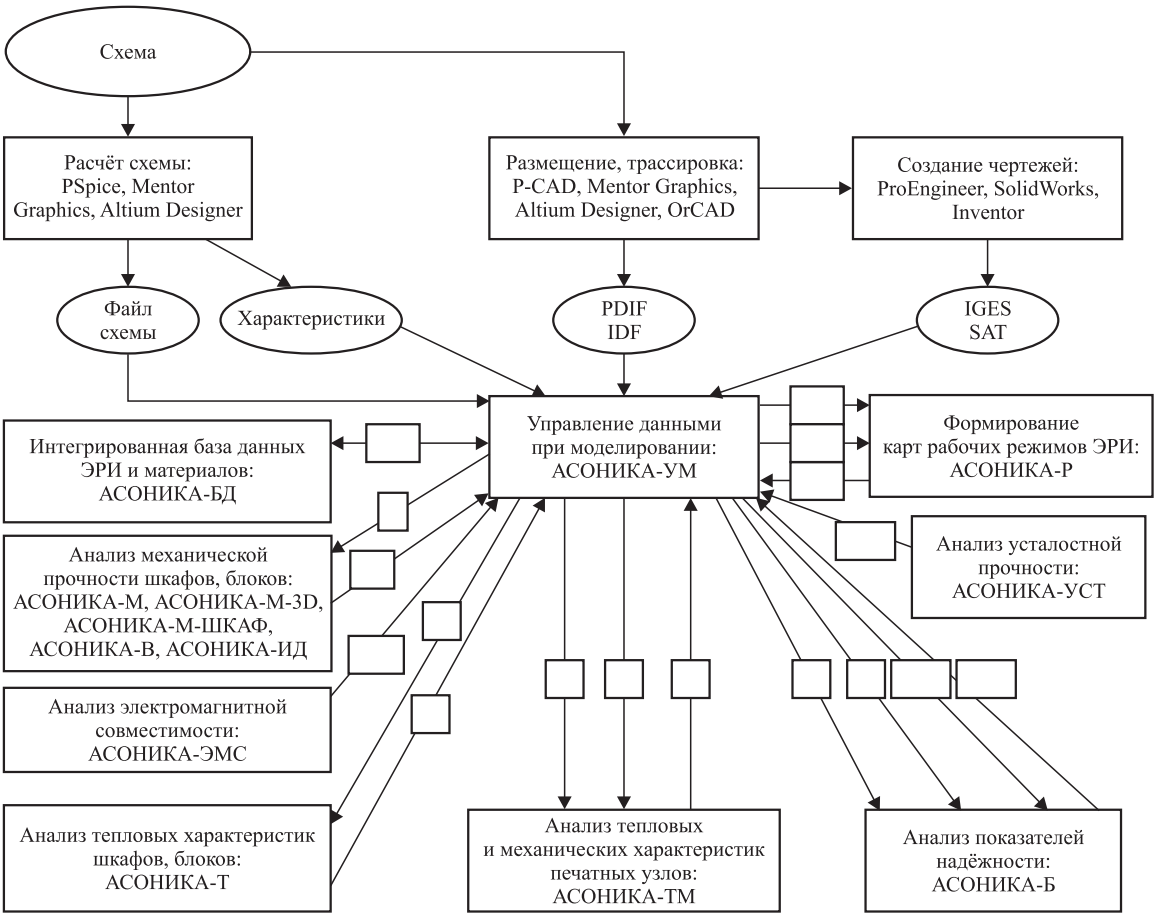


Рис. 2. Процесс формирования электронной модели РТУ

CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) — непрерывная информационная поддержка жизненного цикла (ЖЦ) изделия или продукта. Эту стратегию можно эффективно использовать для решения задачи хранения всей информации о компонентах РТУ и их параметров благодаря технологии информационной интеграции совместного (безбумажного) использования и обмена информацией об изделии РТУ и его компонентах, среде и процессах, происходящих в ходе ЖЦ РТУ.

Основой CALS являются использование комплекса единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и её корректной интерпретации, обеспечение безопасности информации, юридические аспекты совместного использования информации (в том числе интеллектуальной собственности), использование на различных этапах ЖЦ РТУ автоматизированных программных систем (CAD/CAM/CAE, PDM и др.), позволяющих формировать информацию и обмениваться ею в формате CALS.

При организации совместного использования информации встаёт вопрос информационной совместимости моделей. Для его решения система должна поддерживать нейтральную модель данных, пригодную для представления самых различных данных об изделии. В качестве такой модели в настоящее время выступает международный CALS-стандарт — ISO 10303 — STEP (российский аналог — ГОСТ Р ИСО 10303).

Стандарт регламентирует логическую структуру БД, номенклатуру информационных объектов, хранимых в БД, их атрибуты и связи. Стандарт предусматривает способы взаимодействия с БД — с помощью текстового обменного файла STEP (ISO 10303-21) и через программный интерфейс SDAI (ISO 10303-22). Отличительной особенностью стандарта STEP является наличие методики расширения информационной модели данных. Это позволяет адаптировать стандартную информационную модель под нужды конкретной отрасли или предприятия.

Функции PDM-системы выполняет АСОНИКА-УМ. Она обеспечивает следующую функциональность: поддержку неограниченной глубины вложенности структуры изделия, возможность многовариантного проектирования, возможность создания конфигурации изделия на основе существующей информации, использование правил применяемости блоков в изделии по дате или серийному номеру с применением механизма проведения изменений, возможность визуального сравнения конфигураций двух и более изделий. Такие возможности обеспечивают удобство работы пользователя-конструктора, позволяя ему без лишних усилий управлять всеми вариантами конфигурации РТУ, автоматически корректируя её, в соответствии с установленными пользователем (менеджером по конфигурации) правилами применяемости входящих в данное изделие узлов.

АСОНИКА-УМ позволяет хранить различные типы электронных документов. При этом документ ассоциирован с любым приложением, как с любой подсистемой моделирования системы АСОНИКА, так и с любой программой Microsoft Office или любой другой программой. На рис. 2 хорошо видно, как обеспечиваются связь и передача данных между программами, использующимися в процессе проектирования РТУ: системами моделирования электрических характеристик электронных схем типа PSpice, Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD; системами проектирования печатных плат типа P-CAD, Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD; CAD/CAM/CAE-системами типа ProEngineer, SolidWorks, Inventor; а также подсистемами моделирования системы АСОНИКА, такими как АСОНИКА-М, АСОНИКА-М-ШКАФ, АСОНИКА-М-3D, АСОНИКА-В, АСОНИКА-ИД, АСОНИКА-ЭМС, АСОНИКА-Т, АСОНИКА-ТМ, АСОНИКА-УСТ, АСОНИКА-Б, АСОНИКА-Р, а также базой данных АСОНИКА-БД.

Логически документ (электронный технический документ) состоит из двух частей: содержательной и реквизитной. В качестве содержательной части может выступать любой файл, способный храниться в компьютере: 3D-модель, файл мультимедиа, растровое изображение (например, отсканированный чертёж). Реквизитная часть содержит аутентификационные и идентификационные данные документа, в том числе может содержать одну или несколько электронных подписей. Информационный объект «документ» имеет дерево версий, среди которых одна является актуальной (активной). Каждая версия документа, в свою очередь, имеет дерево итераций (изменений), среди которых одна, по умолчанию последняя, является актуальной. Механизм итераций предназначен для отслеживания последовательных изменений версий документа и обеспечения возможности отката изменений.

Совокупность перечисленных выше задач составляет суть методологии проектирования и обеспечения надёжности РТУ в виртуаль-

ной среде на основе комплексного моделирования схем и конструкций.

Практическая ценность представленной в статье работы состоит в создании математического, методического, программного, информационного обеспечения процесса проектирования РТУ; повышении эффективности и качества процесса проектирования РТУ; реализации инновационной технологии информационной поддержки комплексного моделирования РТУ; практической реализации интегрированной базы данных ЭРИ по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, электрическим и надёжностным параметрам для комплексного моделирования физических процессов в РТУ; разработке технологии создания электронной модели РТУ на принципах CALS-технологий, включающей как геометрические модели, создаваемые в CAD-системах, так и модели электрических, тепловых, механических и других физических процессов, а также модели надёжности; реализации методологии проектирования и обеспечения надёжности РТУ в виртуальной среде на основе комплексного моделирования схем и конструкций.

Исследования и практическую реализацию рассмотренной информационной технологии планируется проводить в ходе реализации трёх проектов создания и обеспечения функционирования инновационного центра «Сколково»: «Автоматизированная система комплексного моделирования микросхем на внешние тепловые, механические, электромагнитные воздействия» — компания «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА», кластер информационных технологий; «Прорывная технология комплексного моделирования физических процессов в электроэнергетике для мониторинга оборудования» — компания «Научно-технический центр «Энергомодель», кластер энергоэффективных технологий; «Автоматизированная система комплексного моделирования влияния внешних воздействующих факторов на космическую и авиационную радиоэлектронную аппаратуру АСКМ «Прогресс» — компания «АСКМ «Прогресс», кластер космических технологий и телекоммуникаций, а также проекта «Инновационная технология информационной поддержки комплексного моделирования электронной аппаратуры» в рамках инновационного территориального кластера «Зеленоград».

Библиографические ссылки

1. **Разевиг В.Д.** Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 вып. Вып. 2: Модели компонентов аналоговых устройств. М.: Радио и связь, 1992. 64 с.

2. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

3. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Т. 1/ А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

4. **Шалумов М.А., Шалумов А.С.** Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций,
ищущих новые рынки для реализации своей продукции,
услуги по размещению рекламы и объявлений.
Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 007

Ю.Н. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.
(Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва)
jkondr@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

Рассмотрены вопросы организации информационного обеспечения модульных распределённых систем управления проектами. Приведена логическая структура данных модуля, содержащая типовые элементы структурной схемы технической системы, проектные и технологические параметры этих элементов, типовые операции разработки, используемые ресурсы. На основе типовых элементов сформированы конкретные варианты проектных решений и сетевые графики процессов их разработки. Рассмотрены вопросы построения прогнозных моделей ресурсных и временны́х характеристик типовых операций разработки как функций проектных и технологических параметров с использованием методов Data Mining.

Ключевые слова: система управления проектами; информационное обеспечение; структура данных; прогнозирование затрат ресурсов и времени, методы Data Mining.

The issues of information ensuring organization for modular distributed systems for project management are considered. The logical structure of the module data, containing typical elements of the technical system structural scheme, design and technological parameters of these elements, typical development operations, and utilized resources, is adduced. Specific variants of project solutions and network schedules of their development processes are formed on the basis of typical elements. The questions of the predictable models construction for resource and time characteristics of typical development operations as functions of design and technological parameters through the use of Data Mining methods are considered.

Keywords: project management system; information ensuring; data structure; predicting the resources and time charges, Data Mining methods.

В работах [1, 2] рассмотрены принципы построения модульных распределённых автоматизированных систем управления проектами, гибко настраиваемых на организационные структуры предприятий, занимающихся разработкой и производством сложных технических систем (ТС). Выделены инвариантные задачи планирования, решаемые на базовых информационных структурах (элементы структурной схемы ТС, операции разработки, ресурсные характеристики, календарная структура) в элементах организационной системы, разработаны принципы построения и функционирования модульных распределённых автоматизированных систем управления проектами, структура которых может гибко формироваться для конкретных типов ТС и разрабатывающих предприятий. Планирование рассматривается как единый процесс развития проектов, включающий задачи планирования в элементах организационной системы и задачи согласования планов, решаемые на базовых информационных структурах.

Решение задач планирования в элементах организационной системы базируется на предложенном новом методе планирования с использованием многопроектных ресурсных календарных моделей. Задача планирования сводится к задаче нелинейного программирования с использованием хорошо интерпретируемых безразмерных аргументов и позволяет гибко формировать плановое решение, чувствительное к набору параметров, отражающих широкий спектр реальных содержательных факторов планирования в подразделениях разрабатывающего предприятия.

Согласование плановых решений между элементами организационной системы строится на основе алгоритма итеративного агрегирования в типовой двухуровневой организационной структуре, адаптированного для решения плановых задач с использованием ресурсных календарных моделей. Алгоритм позволяет путём агрегирования и дезагрегирования сетевых моделей, их аргументов и ограничений сформировать для каждого элемента локальную задачу планирования на соответствующих подмножествах аргументов и ограничений и обеспечивает в итерационном процессе получение согласованного планового решения. Для получения согласованного решения в иерархической системе разработаны процедуры взаимодействия типовых двухуровневых организационных структур. В це-

лом строится итерационный процесс решения комплекса взаимосвязанных задач, реализуемый на согласованных вариантах данных и направленный на получение рационального и согласованного планового решения.

В настоящей статье рассматриваются вопросы организации информационного обеспечения предлагаемых модульных распределённых систем управления проектами.

Как было показано в [2], элементам распределённой системы ставятся в соответствие элементы базовых информационных структур. Уровень элемента распределённой системы определяет соответствующие уровню элементы базовых информационных структур (элементы структурной схемы ТС, операции процесса разработки, элементы ресурсной и временно́й структур).

Базовые информационные структуры, связи между элементами структур и алгоритмы их обработки представляются в инвариантной относительно уровней и элементов распределённой системы форме. При формировании модуля распределённой системы базовые информационные структуры заполняются типовыми элементами ТС данного уровня, типовыми операциями процесса их разработки, видами используемых ресурсов, настраивающими модуль на возможные типы элементов структурной схемы ТС и процессов их разработки. В свою очередь, эта информация представляется в инвариантной форме относительно формируемых на её основе конкретных типов вариантов проектных решений, процессов их разработки и ресурсных и временны́х характеристик операций разработки.

Такой подход предполагает, что конкретное проектное решение и структура процесса его разработки в элементе распределённой системы формируются на основе типовых элементов базовых информационных структур и содержат только ссылки на типовые инвариантные элементы. Это обеспечивает удобство задания структуры варианта проектного решения, процесса его разработки и определения прогнозных ресурсных и временны́х характеристик операций, а также снижает вероятность ошибок при подготовке информации для решения плановых задач.

Что касается прогнозных значений ресурсных и временны́х характеристик операций разработки вариантов проектных решений, то для их определения, в частности, могут использоваться статистические зависимости ресурсных и временны́х характеристик операций от проектных параметров соответствующих типовых элементов структурной схемы ТС и/или от технологических параметров операций их разработки. Для получения таких зависимостей необходима информация по реализованным разработкам аналогичных типов элементов структурной схемы ТС (ретроспективная информация), которая обрабатывается методами статистического анализа.

Следует отметить, что построение и использование статистических моделей для определения временны́х и ресурсных характеристик операций сетевого графика процесса разработки — достаточно сложная и трудоёмкая задача, что сдерживает практическое использование универсальных календарных моделей.

Изложенное обусловливает следующие необходимые функции информационного обеспечения элементов распределённой системы:

формирование каталогов возможных типов элементов структурной схемы ТС (подсистем, узлов, агрегатов и т.д.) и их проектных и технологических параметров;

формирование для каждого типа элемента структурной схемы ТС каталога операций процессов их разработки;

формирование каталога ресурсных характеристик операций разработки элементов структурной схемы ТС;

накопление ретроспективной информации о значениях временны́х и ресурсных характеристик операций процессов разработки элементов структурной схемы ТС и значениях их проектных и технологических параметров;

формирование на основе ретроспективной информации статистических моделей ресурсных и временны́х характеристик операций;

формирование структуры варианта проектного решения и определение значений проектных параметров;

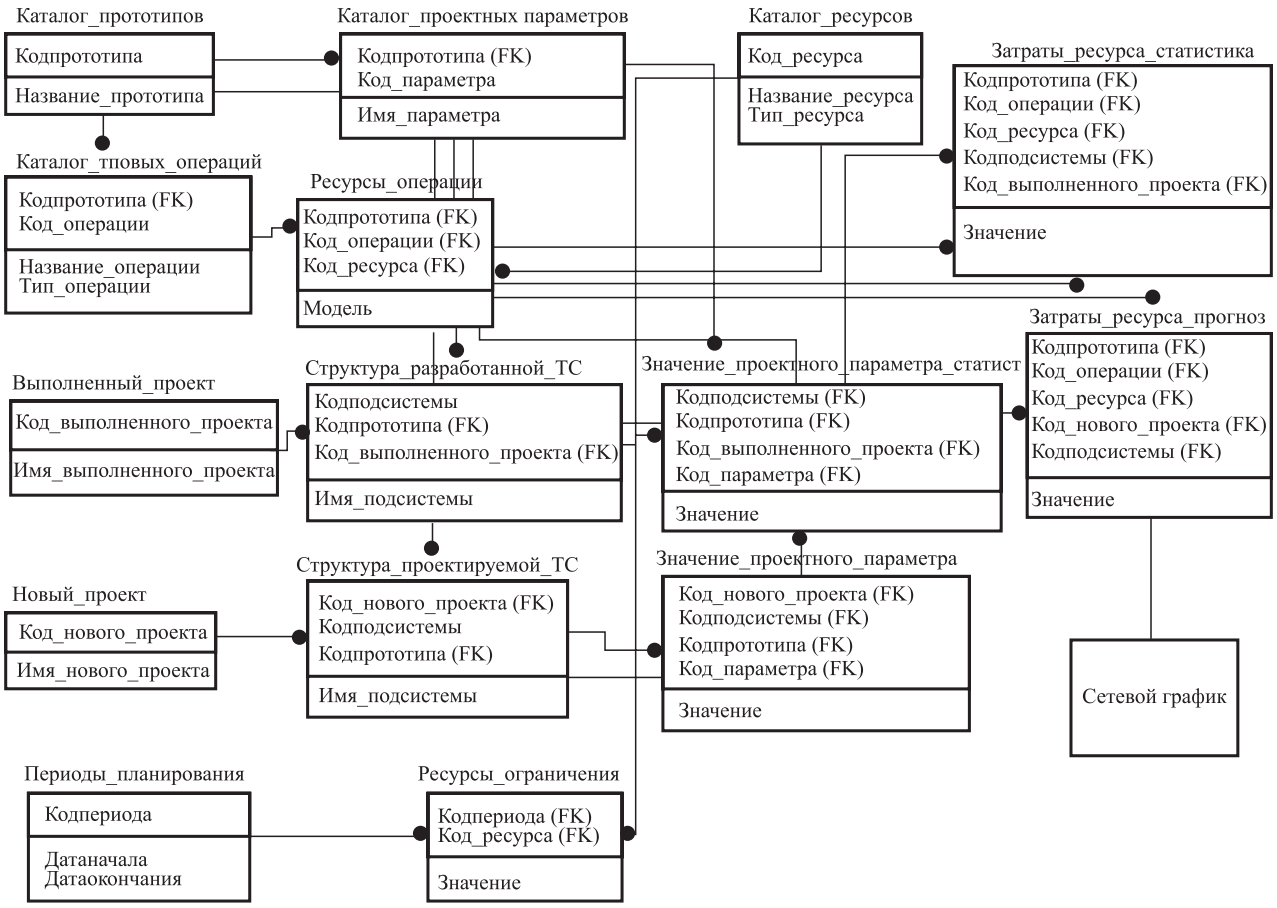
формирование сетевой структуры процесса разработки варианта проектного решения;

определение прогнозных значений ресурсных и временны́х характеристик операций процесса разработки вариантов проектных решений.

Реализация перечисленных функций позволяет создавать в элементах распределённой системы нормативную базу, необходимую для решения плановых задач.

Логическая структура данных отражает общий состав информационных компонент элемента распределённой системы и связи между ними. Логическая модель в нотации IDEF1X приведена на рисунке.

Содержание рассматриваемых далее инвариантных каталогов определяется уровнем элемента в распределённой системе, и заполнение этих каталогов обеспечивает настройку модуля системы на соответствующие данному уровню элементы структурной схемы ТС, операции



Логическая структура данных

их разработки и виды используемых ресурсов. Взаимные связи каталогов устанавливаются в рамках автоматизированных процедур создания нормативной базы элемента распределённой системы и поддерживаются специальными программными средствами. На основе таких инвариантных каталогов формируются варианты проектных решений и структуры процессов их разработки (сетевые графики).

Множество типов элементов структурной схемы ТС представляется набором прототипов, являющихся инвариантными информационными шаблонами. Прототипы объединяются в каталог, элементы которого идентифицируются именами прототипов (Каталог прототипов).

Каждому прототипу ставятся в соответствие набор определяющих проектных параметров и набор типовых операций разработки, объединённых в каталоги, элементы которых идентифицируются именами (Каталог типовых операций и Каталог проектных параметров).

Следует отметить, что Каталог типовых операций процесса разработки каждого из прототипов может содержать два вида операций: макрооперации и элементарные операции (атрибут Тип операции). Макрооперации не имеют ресурсных и временно́й характеристик и используются для задания правил объединения фрагментов сетевых структур разработки элементов структурной схемы ТС более низких уровней. Элементарные операции имеют ресурсные и временну́ю характеристики.

При автономном использовании модулей системы поддержки решений (вне иерархической организационной структуры) одна и та же типовая операция может быть представлена в виде макрооперации или элементарной операции и соответствовать различным степеням детализации структуры процесса разработки в зависимости от уровня развития проекта. Задание элементарной операции при формировании структуры процесса разработки означает, что степень детализации структуры процесса разработки определяется данной операцией. Заданная макрооперация детализируется на следующем уровне детализации структурной схемы ТС.

В логической структуре данных между соответствующими элементарной операцией и макрооперацией может быть установлена информационная связь. В этом случае ресурсные и временна́я характеристики элементар-

ной операции в ретроспективных проектах могут определяться на основе ресурсных и временны́х характеристик детализирующих макрооперацию операций разработки элементов структурной схемы ТС более низкого уровня. Это позволяет формировать статистические модели ресурсных и временны́х характеристик операций процесса разработки элементов структурной схемы ТС, не имеющих аналогов, на основе ретроспективной информации о процессах разработки элементов структурной схемы более низких уровней. Такая информация, как правило, является более представительной и обеспечивает более точное прогнозирование временно́й и ресурсных характеристик операций новых проектов.

Множество ресурсных характеристик (виды используемых ресурсов) всех операций образует Каталог ресурсов, элементы которых (конкретные ресурсы) идентифицируются именами, а также указателем типа ресурса (распределяемый или специализированный).

При разработке логической модели ресурсные и временна́я характеристики объединены в одной сущности (для упрощения логической структуры) Каталог ресурсов. Первый элемент каталога (Код ресурса = 1, Название ресурса = 'Время').

Каждой типовой операции ставятся в соответствие ресурсные и временна́я характеристики (сущность Ресурсы операции, которая определяет используемые операцией ресурсы, а также способ определения значений временно́й и ресурсной характеристик операции — атрибут Модель[1]).

Возможны следующие способы определения значений ресурсных и временно́й характеристик операции, используемой в сетевом графике разработки нового проекта:

экспертная оценка с использованием аналогов (реализованных разработок с использованием данного типа элемента структурной схемы ТС, в которых выполнялась данная операция);

вычисление значений характеристик.

Во втором случае значения ресурсных и временно́й характеристик операции могут определяться с использованием расчётных или статистических моделей. Такие модели могут быть подготовлены автономно или сформированы программными средствами обработки статистической информации, входящими в состав программного обеспечения модуля системы (будут рассмотрены далее). В частном случае, временна́я или ресурсная характеристика операции может иметь хранимое константное значение (не зависит от значений проектных и/или технологических параметров прототипа или не может быть определена другими способами из-за отсутствия необходимой информации).

В общем случае вычислительная модель является выражением $F(C, X)$, где C — вектор константных параметров; X — вектор аргументов, представляющих собой подмножество проектных и/или технологических параметров прототипа. Приведённый выше атрибут Модель может, в частности, содержать ссылку на соответствующий реализующий программный модуль.

Техническая система представляется состоящей из подсистем. В общем случае может формироваться иерархическая структура любой сложности[2]. Вид подсистемы определяется её прототипом.

Необходимая для формирования статистических моделей или экспертно-аналогового определения значений временно́й и ресурсных характеристик типовых операций ретроспективная информация имеет следующую структуру: сущности Выполненный проект, Структура разработанной ТС (множество реализованных элементов структурной схемы ТС на основе соответствующих прототипов), Значение проектного параметра статистика, Затраты ресурса статистика. Эти сущности и их взаимосвязи позволяют хранить информацию о прототипе, на основе которого выполнен проект ТС, известные значения проектных параметров элемента структурной схемы ТС, построенного на базе прототипа, известные значения временно́й и ресурсных характеристик типовых операций прототипа, входящих в выполненный проект. Эта информация используется для построения статистических моделей или экспертно-аналогового определения значений временно́й и ресурсных характеристик типовых операций в новых проектах.

Аналогичную структуру имеет информация о прогнозных значениях временно́й и ресурсных характеристик типовых операций в новых проектах: сущности Новый проект, Структура проектируемой ТС, Значение проектного параметра, Затраты ресурса прогноз. Из экземпляров типовых операций данной сущности строится сетевой график процесса разработки ТС.

Сущность Периоды планирования используется для формирования системы ограничений при планировании проектов (сущность Ресурсы ограничения).

---

[1] Данный атрибут демонстрирует ссылку на модель и не соответствует её логической и физической реализациям в базе данных.

[2] В приведённой логической модели показаны только два уровня (ТС, подсистемы).

Кроме того, на основе приведённых сущностей могут строиться варианты программы разработок и варианты ресурсных ограничений (в логической структуре данных не приведены).

Рассмотренная логическая структура данных может реализовываться на различных системах управления базами данных (СУБД). Используется СУБД MS SQL Server.

Как было отмечено выше, прогнозные значения ресурсных и временно́й характеристик операции разработки нового проектного решения могут определяться с использованием статистических моделей для типовых операций прототипов, из которых формируется структура проектного решения. Для каждой типовой операции определяются временна́я t_i и ресурсные ψ_{ir} характеристики, где $r \in R_i$ — подмножество потребляемых типовой операцией видов ресурсов. Значения характеристик являются функциями проектных и технологических параметров прототипа $t_i(X)$, $\psi_{ir}(X)$, где X — вектор проектных и технологических параметров.

Наиболее распространенный способ определения функциональных зависимостей $t_i(X)$ и $\psi_{ir}(X)$ основывается на анализе и обработке информации о реализованных аналогичных разработках (ретроспективная информация). Следует отметить, что определение с достаточной степенью достоверности временны́х и ресурсных характеристик разработки элемента структурной схемы ТС в целом на основе ретроспективной информации практически невозможно. Это объясняется тем, что неоправданно усредняются закономерности различающихся операций разработки (проектные расчёты, выпуск проектно-конструкторской документации, испытания, сборка опытных образцов и др.), оценки интегральных характеристик зависят от многих случайных факторов, полный систематический учёт которых не представляется возможным и, кроме того, для уникальных ТС часто сложно найти их реализованные аналоги. В то же время прогнозирование временны́х и ресурсных характеристик для отдельных операций на основе ретроспективной информации может дать удовлетворительные результаты. Вместе с тем эти результаты не следует отождествлять с абсолютно точными оценками-нормативами, с которыми обязательно будут совпадать фактические значения ресурсных и временны́х характеристик операций. Получаемые прогнозные оценки могут рассматриваться как исходные значения, которые будут корректироваться в процессе развития проекта, но они необходимы для решения плановых задач на ранних этапах реализации проекта.

Определение функциональных зависимостей на основе ретроспективной информации включает такие взаимосвязанные этапы, как выделение подмножества значимых переменных из всего множества характеризующих объект переменных (необходимо выявить подмножество значимых проектных параметров из всего множества проектных параметров прототипа, которые оказывают влияние на значения временно́й и ресурсных характеристик операции) и определение вида функциональных зависимостей и коэффициентов функции. Классические статистические методы для решения этой задачи требуют представительной выборки ретроспективной информации.

Для рассматриваемой задачи это означает наличие большого числа реализованных проектов элементов структурной схемы ТС данного типа, в которые входила анализируемая типовая операция. Для сложных ТС (например, летательных аппаратов), учитывая их частую уникальность и длительность создания, получить представительную выборку практически невозможно. В этом случае используется эвристический метод, сочетающий формальные методы статистического анализа с неформальными экспертными оценками.

Модель — функциональная зависимость временно́й и ресурсных характеристик типовых операций разработки прототипа значений проектных и/или технологических параметров прототипа элементов структурной схемы ТС формируется в виде произведения одномерных функций (мультипликативная модель) [3]. Функции выбираются из набора опорных функций, которые являются стандартными одномерными функциями (линейная, квадратичная, степенная и др.), и последовательно присоединяются к модели с выбором вида функции. Коэффициенты функции определяются методом наименьших квадратов.

Последовательность присоединения функции для конкретного проектного параметра прототипа определяется его сравнительной значимостью в формируемой мультипликативной модели. Если функция для k-го проектного параметра предшествует в статистической модели функции для n-го проектного параметра, то k-й проектный параметр оказывает большее влияние на значение рассматриваемой ресурсной или временно́й характеристики типовой операции, чем n-й проектный параметр. Последовательность присоединения функции от того или иного проектного параметра определяется с помощью сравнения значений остаточной дисперсии. Чем меньше значение остаточной дисперсии, тем больше

значимость проектного параметра на данном шаге формирования статистической модели.

Вид каждой присоединяемой к модели функции выбирается на основе содержательной оценки исходной информации и анализа геометрической структуры исходных данных (этап неформального экспертного анализа исходных данных). Если такой анализ порождает несколько возможных видов функции, то вид присоединяемой к модели функции может выбираться путём сравнительной оценки значений остаточной дисперсии для набора опорных функций. Наилучшей из сравниваемого набора одномерных опорных функций является функция, для которой получено наименьшее значение остаточной дисперсии. Эта функция и присоединяется к модели.

Таким образом, исходя из значения остаточной дисперсии на каждом шаге формирования мультипликативной модели можно выбрать из нескольких возможных функций и нескольких проектных параметров ту функцию и тот проектный параметр, которые обеспечивают наименьшее значение остаточной дисперсии. Эта функция от соответствующего проектного параметра присоединяется к мультипликативной модели.

В процессе формирования модели на каждом шаге проверяется условие снижения остаточной дисперсии при включении в модель новой функции некоторого проектного параметра. В противном случае включение функции в мультипликативную модель ухудшает её точность. Это же условие ограничивает число функций в мультипликативной модели и обеспечивает включение в неё только значимых проектных параметров. На первом шаге формирования модели условием присоединения функции к модели является уменьшение выборочной дисперсии.

Также формально проверяется необходимый набор выборки (объём хранимой информации в базе данных по выполненным проектам) по значению суммарного числа связей, накладываемых на каждом шаге формирования модели.

При этом чем больше объём информации о выполненных проектах в базе данных, тем большее число проектных параметров (при условии их значимости) можно ввести в статистическую модель и, следовательно, учитывать влияние более широкого набора проектных параметров на ресурсные и временны́е характеристики типовых операций разработки прототипов. Имеется возможность последовательно совершенствовать рассматриваемые модели по мере накопления информации о выполненных проектах. Это подтверждается существующей практикой использования системы планирования проектов.

Альтернативным и более перспективным направлением для определения функциональных зависимостей временно́й и ресурсных характеристик типовых операций разработки ТС является использование методов Data Mining. Data Mining — это технология, которая предназначена для поиска в больших объёмах данных объективных и полезных на практике закономерностей. Разработано множество различных методов и алгоритмов решения задач Data Mining [4].

Современные широко используемые СУБД (например, Microsoft SQL Server, которая используется в рассматриваемой системе управления проектами) включают развитые аналитические сервисы, поддерживающие решение задач Data Mining. В SQL Server реализованы следующие методы Data Mining [5]:

метод дерева принятия решений — делает прогноз на основе связей между столбцами в наборе данных и моделирует эти связи в форме древовидной последовательности разбиений для конкретных значений. Поддерживает прогнозы как дискретных, так и непрерывных атрибутов;

упрощенный метод Байеса — оценивает вероятность связи между всеми входными данными и столбцом прогнозируемых данных. Поддерживает только дискретные или дискретизированные атрибуты. Рассматривает все входные атрибуты как независимые;

метод временны́х рядов — анализирует данные, относящиеся ко времени, используя линейное дерево принятия решений. Для предсказания будущих значений во временно́й последовательности используются найденные закономерности;

метод кластеризации — определяет связи в наборе данных, которые невозможно логически получить с помощью случайного наблюдения. Использует итерационный метод для группирования в кластеры записей с похожими характеристиками;

метод линейной регрессии — если имеется линейная зависимость между целевой и анализируемыми переменными, алгоритм находит наиболее эффективную связь между целью и входными данными. Поддерживает прогнозы непрерывных атрибутов;

метод логистической регрессии — анализирует факторы, влияющие на результат, если результат принимает только два значения — обычно это наличие или отсутствие события. Поддерживает прогнозы как дискретных, так и непрерывных атрибутов;

метод взаимосвязей — строит правила, описывающие элементы, которые, вероятнее всего, появятся вместе в транзакции;

метод кластеризации последовательностей — определяет в последовательности кластеры событий, упорядоченных похожим образом. Обеспечивает сочетание анализа последовательности и кластеризации;

метод нейронной сети — анализирует сложные входные данные или бизнес-проблемы, для которых имеется значительный объём обучающих данных, но трудно вывести правила, используя другие алгоритмы. Применяется для классификации дискретных атрибутов и регрессии непрерывных атрибутов. Может предсказывать несколько атрибутов.

Из перечисленных методов для решения задачи определения функциональных зависимостей временно́й и ресурсных характеристик типовых операций разработки ТС от проектных и технологических параметров прототипа и прогнозирования на их основе требуемых ресурсов и времени выполнения операции могут использоваться метод дерева принятия решений (для числовых непрерывных значений проектных и технологических параметров прототипа), метод линейной регрессии и метод нейронной сети.

Метод линейной регрессии является наиболее простым и может использоваться при относительно небольшом объёме информации по реализованным проектам разработки ТС, но не обеспечивает достаточно хорошего качества прогнозной модели. Кроме того, этот метод может выдать относительно простую модель, без включения в неё всех значимых проектных и технологических параметров прототипа, которые могут быть выявлены другими методами.

Метод дерева принятия решений строит достаточно представительную модель (включаются значимые проектные и технологические параметры прототипа). Однако качество прогнозной модели сильно зависит от объёма информации по реализованным проектам.

Метод нейронной сети создаёт хорошую модель при относительно небольшом объёме исходных данных, но неявный вид модели затрудняет интерпретацию полученного результата.

При построении информационного обеспечения целесообразна комбинация перечисленных методов.

MS SQL Server имеет набор средств для создания структур и моделей Data Mining, управления моделями и их использования. Поддерживается двухуровневая структура: структура анализа — модель (для каждой канонической структуры можно создать несколько моделей). Однако такая структура недостаточна для отображения возможных вариантов при определении функциональных зависимостей временно́й и ресурсных характеристик типовых операций разработки ТС. Реализована расширенная иерархическая структура хранения и обработки информации для задач и методов Data Mining.

Структура имеет следующие уровни: задача построения функциональной зависимости временно́й или ресурсной характеристики конкретной типовой операции разработки прототипа, представление данных, выборка, наложенный фильтр и/или переразметка, структура анализа, модель, вариант алгоритма, параметры алгоритма. Такая структура более адекватна процессу построения функциональной зависимости и позволяет повысить его эффективность. Имеется возможность сравнения качества создаваемых моделей и фиксации «лучшей» для хранения в базе данных (БД) и дальнейшего использования при прогнозировании ресурсных и временны́х характеристик операций разработки ТС.

Реализованы структуры данных в БД для решения рассмотренных задач и методов Data Mining, алгоритмы преобразования структуры хранения данных в БД в требуемые структуры анализа с поддержкой указанных иерархических структур вариантов решения задач построения прогнозных моделей. Имеется возможность сравнительной оценки применения тех или иных используемых методов Data Mining для конкретной характеристики типовой операции разработки ТС.

В целом можно констатировать, что использование методов Data Mining для построения прогнозных моделей ресурсных и временны́х характеристик операций сетевого графика процесса разработки ТС повышает качество прогнозирования сроков и затрат ресурсов на реализацию новых проектов и качество процессов планирования и управления разработками сложных технических систем.

Библиографические ссылки

1. **Кондрашов Ю.Н., Чашин М.О.** Модель согласования планов в иерархической организационной системе. Управление экономическими системами [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://uecs.ru/instrumentalnii-metody-ekonomiki/item/3347-2015-02-07-09-07-12 (дата обращения 02.03.2017).

2. **Кондрашов Ю.Н.** Автоматизация управления проектами в организационных структурах. М.: Изд. дом «БИБЛИО-ГЛОБУС», 2016. 180 с.

3. **Прикладная** статистика / под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 281 с.

4. **Анализ** данных и процессов: учеб. пособие / А.А. Барсегян и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

5. **SQL Server 2008.** Data mining интеллектуальный анализ данных / Дж. Макленнен и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 720 с.

УДК 629.331:004

А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф., **Е.В. Чернышова, Е.В. Быстрянцев, В.С. Логойда**
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)

elenabok@mail

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Прогнозирование информационного обеспечения автомобильного транспорта должно учитывать объёмы перевозок, численность работающих и другие важнейшие показатели его работы и состояния. Прогнозирование развития систем часто проводят экстраполяционными методами, что бывает правомерным при их экстенсивном развитии. На современном этапе такой подход к прогнозированию развития автомобильного транспорта не является убедительным.

Ключевые слова: дорожное проектирование; информационное обеспечение; транспорт; автоматизированные системы управления.

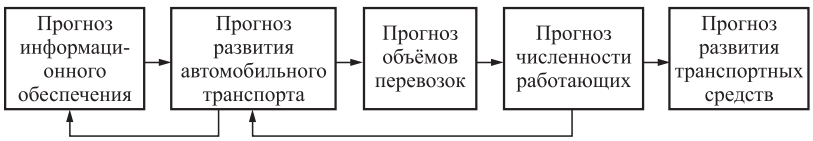
The forecasting of information ensuring should take into account the volumes of traffic, the number of transport workers and other key indicators of motor transport performance and the state. Forecasting the systems development is often carried out by extrapolation methods and is legitimate at the extensive development of systems. At the present stage, this approach to forecasting the development of motor transport is not convincing.

Keywords: road design; information ensuring; transport; automated control systems.

Реальные взаимосвязи прогноза информационного обеспечения с прогнозами развития автомобильного транспорта можно представить в виде схемы, приведённой на рисунке. Прогнозы объёмов перевозок и численности работающих влияют на прогноз развития автомобильного транспорта, а следовательно, и на прогноз параметров информационного обеспечения. На схеме видно, что результат прогнозирования по любому из блоков (на выходе) является начальным условием (на входе) для последующего блока. Обязательной составляющей начальных условий для прогноза численности работающих и развития транспортных средств является информация о росте производительности труда (таблица).

В процессе исследования были выявлены основные направления развития автомобилизации, которые могут влиять на результаты прогнозирования и быть объектами прогнозирования.

Система автомобильного транспорта как объект прогнозирования характеризуется резко возрастающими потребностями народного хозяй-



Взаимосвязи прогнозов информационного обеспечения и автомобильного транспорта

Прогноз информационного обеспечения

Вид прогноза	На входе	На выходе
Прогноз развития автомобильного транспорта	Опережающая информация о новых направлениях развития автомобильного транспорта (функция определяется по анализу развития автомобилизации)	Прогноз основных направлений развития автомобильного транспорта
Прогноз объёмов перевозок	Информация о росте объёмов перевозок грузов и пассажиров (функция определяется по анализу потребностей народного хозяйства в перевозках грузов и пассажиров всеми видами транспорта, в том числе автомобильным)	Прогноз развития автомобильных перевозок
Прогноз численности работающих	Информация о росте объёмов перевозок, повышении производительности труда, росте числа работающих (функция потребности в кадрах)	Прогноз численности работающих
Прогноз развития транспортных средств	Информация о росте объёмов перевозок, специализации и концентрации, анализ типажа автомобилей и прицепного состава (функция улучшения структуры автомобильного парка)	Прогноз развития транспортных средств

ства в грузовых и пассажирских перевозках; образованием крупных объединений; повышением уровня научных и проектных решений, безопасности движения, квалификации работников автомобильного транспорта; увеличением выпуска грузовых и легковых автомобилей; дизелизацией парка; выпуском автомобилей и автопоездов большой грузоподъёмности; организацией перевозок на уровне международных требований; созданием мощных автоматизированных систем управления.

В современном инженерном прогнозировании многие параметры можно определить аналитически. Эти возможности широко используются в исследовательской работе. Однако в некоторых случаях такие методы не приводят к желаемым результатам, и тогда необходимо использовать возможности научно-технической экспертизы. Методы экспертизы можно рассматривать как интеллектуальный эксперимент, который создаёт благоприятные условия для сопоставления результатов аналитического и экспериментального исследований.

С необходимостью сравнения и оценки централизованного информационного обеспечения приходится сталкиваться в повседневной практической деятельности. Это сравнение необходимо, во-первых, для оценки качества информационного обеспечения и проверки степени соответствия его современным требованиям автомобилизации, во-вторых, для чёткой организации текущего и перспективного планирования с учётом технического прогресса в области автомобильного транспорта, в-третьих, для прогнозирования информационного обеспечения.

Поставим задачу построения таблицы (нормированный тезаурус), позволяющей давать количественные оценки содержанию данного вида информации. Такая оценочно-определительная таблица составляет значительную часть модели инженерного прогнозирования. Достоинство таблицы заключается в том, что после верификации (проверки) она становится довольно надёжным инструментом, позволяющим переводить материалы информационного обеспечения в параметрические характеристики. Минимальная оценка в таблице, равная 1, будет соответствовать наименее совершенному способу организации производства и технологии управления автомобильным транспортом. Максимальная оценка даётся наиболее совершенному способу. Оценочно-определительная таблица включает в себя характеристики прогнозирования, веса характеристик, пункты и оценки.

Характеристики определяют основные требования к важнейшим направлениям развития автомобильного транспорта. Они чётко определяют и разграничивают требования к объектам исследования, могут выражаться как в параметрической (1, 2, 3, ..., n), так и в индексной (i_1, i_2, ..., i_n) форме. Вес характеристики означает место, занимаемое ею в установленной последовательности. Абсолютные веса характеристик $\varphi(i_1)$, $\varphi(i_2)$, ..., $\varphi(i_n)$ изменяются от 1 до 0, т. е. $0 < \varphi(i_n) < 1$, а относительный вес определяется долями единицы. Пункты (P_1, P_2, ..., P_n) расчленяют характеристики на более мелкие рубрики. Пункты, так же как и характеристики, ранжируют, причём каждый последующий пункт включает содержание предыдущего. Оценка указывает вес характеристик в баллах, причём минимальный балл равен 1, а максимальный — числу пунктов [1].

На основании указанных условий и требований составим оценочно-определительную таблицу информационного обеспечения работников автомобильного транспорта. Для удобства пользования и простоты расчётов представим таблицу в виде матрицы, т. е. в виде определителя (отсюда и название таблицы). В полученной матрице строки занимают характеристики прогнозирования, а столбцы — пункты. На пересечении столбцов и строк указываются оценки. Таблица составлена так, что число пунктов в каждой характеристике равно числу характеристик, поэтому получилась квадратная матрица, позволяющая построить строгую систему оценок, легко поддающихся расчёту.

Оценочно-определительная таблица строится так, чтобы на ней можно было любой вид информационного обеспечения рассмотреть с позиций его значимости в будущем. При оценке пунктов подразумевается, что распределение веса каждого элемента равномерное.

Так как в таблице n характеристик и p пунктов, можно найти b — степень реализации оценки:

$$b = \frac{p}{n}.$$

Чтобы учесть многофакторное воздействие информационного обеспечения на автомобильный транспорт, необходимо составить две таблицы, одна из которых будет учитывать основные направления развития автомобильного транспорта, а другая — самого информационного обеспечения. Первая оценочно-определительная таблица, составленная в приблизительно ранжированном виде, как наиболее важная и наиболее трудно поддаю-

щаяся обработке, направляется квалифицированным экспертам для расположения характеристик в последовательности наибольшей важности для автомобильного транспорта и указания удельного веса каждой характеристики во всех рассматриваемых направлениях развития автомобилизации (в процентах или долях единицы).

От качества составления таблиц зависят дальнейшие результаты работы с ними. При составлении таблиц в качестве характеристик берут основные направления развития автомобильного транспорта и его информационного обеспечения в порядке убывания их значимости. Для проверки правильности составления таблиц привлекаются компетентные специалисты, определяющие социальную, экономическую, техническую политику транспорта, т. е. все организации, составляющие внешнюю и внутреннюю среду управления автомобильным транспортом.

Самостоятельной задачей является определение достаточного числа экспертов. Минимальное их число различными специалистами определяется по-разному. В работе [2] указано, что число экспертов зависит от числа оцениваемых событий. По мнению авторов [3], их должно быть не менее 7.

Для расчёта числа экспертов применяется формула

$$\gamma = \Sigma K_{\text{кв}} K_{\text{в}} \cdot 100\ \%,$$

где γ — число экспертов; $K_{\text{кв}}$ — коэффициент квалификации эксперта; $K_{\text{в}}$ — коэффициент веса.

Коэффициент квалификации эксперта определяется с помощью разработанной таблицы [4, 5], в которой различным категориям специалистов в зависимости от стажа и проводимой ими научной и производственной работой даны количественные оценки. Такие же оценки даны организациям в зависимости от их общественного, научного, социального, экономического и технического уровня. Такая подробная структура и введение весовых коэффициентов позволяют нивелировать разницу в компетентности между отдельными специалистами и организациями.

Учитывая, что информационное обеспечение отражает разнохарактерную и разноплановую деятельность самых разных подразделений автомобильного транспорта, а также то, что даже у крупных специалистов иногда существуют прямо противоположные взгляды на одну проблему, для получения более качественных и сопоставимых данных число экспертов выбирают со значительным запасом. В результате исследования получено большое число оценок самых разных специалистов. Большинство этих оценок является коллективными, полученными в результате обсуждений на заседаниях кафедр, комиссий и т. д., что увеличивает их достоверность.

Ошибки, которые могут произойти при оценке предложения, не могут быть больше одной ступени (одного пункта характеристики). Так, при пятистрочной матрице ошибка составляет 100/25 = 4 %. Это вполне допустимо для прогноза потребностей в средствах информационного обеспечения. Следует также учесть, что с помощью небольшой по объёму, пятистрочной матрицы любой вид информационного обеспечения оценивается по 25 пунктам (5 × 5).

В перспективе оценочно-определительные таблицы (при систематическом их использовании) можно применять для определения тем, необходимых работникам автомобильного транспорта в данный момент (методом исключения). По мере накопления опыта экспертизы такие таблицы можно будет использовать для оценки отдельных направлений развития автомобилизации (перевозки, безопасность движения, управление и т. д.). Направления, которые получат наименьшую оценку в баллах, вероятно, будут нуждаться в усилении средствами информационного обеспечения. Аналогичный анализ можно провести по темам одного направления. Таким образом, предложенные оценочно-определительные таблицы открывают реальную возможность чёткого планирования и определения тем средств информационного обеспечения, которые нужны в данный момент специалистам автомобильного транспорта. Более «тонкая» разработка таблиц позволит планировать развитие системы информационного обеспечения по годам на достаточно длительную перспективу.

Качество средств информационного обеспечения определяется, главным образом, по важности рассматриваемых целей функционирования автомобильного транспорта. По оценочно-определительным таблицам можно оценить качественную сторону средств информационного обеспечения. Если перечень характеристик сформулирован верно, то качество целей оценивается по их значимости, относительному положению и важности каждой характеристики.

Первым этапом в оценке качества по оценочно-определительным таблицам является определение границ характеристик. На втором этапе ранжируются отобранные качества по их относительной важности, определяется

их количественная оценка, на третьем этапе выясняется, в какой степени специалист должен освоить каждое из перечисленных качеств или составных элементов процесса обучения (сложность материала, степень усвоения, определяемая по тестам, и т. д.).

При количественной оценке качества конкретных тем оценочно-распределительную таблицу можно представить в виде анкеты, в которой каждую характеристику можно оценивать по n-балльной системе, где n — число пунктов. Таким образом, каждая тема может быть оценена при $n = i$ от 10 до 50 баллов, которые при необходимости могут быть легко переведены в матричную форму.

Используя оценочно-определительные таблицы, представленные в виде анкет, можно количественно оценивать годовые и перспективные тематические планы. В данном случае анкета ещё более упрощается, а её информативная ёмкость возрастает. В боковике анкеты указываются характеристики (можно даже без разбивки на пункты), а в шапке — номер темы по плану. Эксперт по такой анкете по 5-балльной системе оценивает каждую тему либо несколько отдельных тем в зависимости от своей компетенции.

По предложенной методике проведена оценка тематического плана выпуска литературы по автомобильному транспорту в 2013 г. различными издательствами.

Оценка тематического плана в целом и его конкретных тем в отдельности имеет бесспорное преимущество перед существовавшей до настоящего времени оценкой. Преимущество предложенного метода заключается прежде всего в том, что эксперт вынужден давать полную количественную оценку, вместо традиционных, даваемых ранее: «По плану замечаний не имеется», «Тема заслуживает внимания» и т. д. Анализ множества количественных субъективных оценок даёт довольно объективную суммарную характеристику темы или всего плана, позволяет определить полноту изложения темы и указать автору, в каком направлении следует доработать тему. Делается это с помощью коэффициента полноты $K_{\text{п}}$, который определяется по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{n}{N},$$

где n — число баллов, которое получила тема; N — максимальное число баллов, которое могла получить тема.

Анализ оценок конкретных характеристик темы по указанной методике позволяет определить направление доработки для получения наивысшего качества и воздействия на автомобильный транспорт для повышения его эффективности.

Заключение. Представленные оценочно-определительные таблицы и анкеты, позволяют объективно определять качество как отдельного источника, так и всего информационного обеспечения автомобильного транспорта, а также проверять ориентировочную предварительную относительную эффективность функционирования различных средств информационного обеспечения автомобильного транспорта. Получив возможность оценки информационного обеспечения, его восприятия и понимания, можно ввести количественные характеристики в качественно сформулированную цель. По таблице, например, можно проверять любое авторское предложение, его соответствие современному уровню развития науки и техники, рассчитать предполагаемый относительный экономический эффект по сравнению с другими аналогичными предложениями и принять решение о целесообразности издания той или иной книги, учитывая все основные показатели деятельности автомобильного транспорта.

Библиографические ссылки

1. **Скрыпников А.В., Умаров М.М., Арутюнян А.Ю., Чернышова Е.В.** Анализ методов оценки надёжности сложных технических комплексов // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса». Воронеж, ВГУИТ, 2015. С. 76—81.

2. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Ширинкин Н.В., Стукалов Р.В.** Исследование задач проектирования комплексного технического обеспечения и обобщенная модель их решения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4 (66). С. 93—98.

3. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Эль Иаали Т.** Технологии безопасности распределённых информационных систем на базе грид-технологий // Тенденции инновационных процессов в науке: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. М.: РИО ЕФИР, 2015. 200 с.

4. **Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Zemlyanukhin M.Yu.** Firewall as a tool of implementation of security policy // Science and education: materials of the VIII International research and practice conference. Munich, March 19—20, 2015 / Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, Munich, Germany, 2015. P. 345—350.

5. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Смирнова О.О.** Разработка алгоритмов обучения и распознавания с точки зрения повышения информационной безопасности // Национальная ассоциация учёных (НАУ). 2015. № 2 (7). С. 54—56.