

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 0135-1710

# **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ**

**Всеукраинский межведомственный  
научно-технический сборник**

**Основан в 1965 г.**

**Выпуск 147**

Харьков  
2009

В сборнике представлены результаты исследований, касающихся компьютерной инженерии, управления, технической диагностики, автоматизации проектирования, оптимизированного использования компьютерных сетей и создания интеллектуальных экспертных систем. Предложены новые подходы, алгоритмы и их программная реализация в области автоматического управления сложными системами, оригинальные информационные технологии в науке, образовании, медицине.

Для преподавателей университетов, научных работников, специалистов, аспирантов.

У збірнику наведено результати досліджень, що стосуються комп'ютерної інженерії, управління, технічної діагностики, автоматизації проектування, оптимізованого використання комп'ютерних мереж і створення інтелектуальних експертних систем. Запропоновано нові підходи, алгоритми та їх програмна реалізація в області автоматичного управління складними системами, оригінальні інформаційні технології в науці, освіті, медицині.

Для викладачів університетів, науковців, фахівців, аспірантів.

**Редакционная коллегия:**

*В.В. Семенец*, д-р техн. наук, проф. (гл. ред.), *М.Ф. Бондаренко*, д-р техн. наук, проф., *И.Д. Горбенко*, д-р техн. наук, проф., *Е.П. Пуятин*, д-р техн. наук, проф., *В.П. Тарасенко*, д-р техн. наук, проф., *Г.И. Загарий*, д-р техн. наук, проф., *А.Штефан*, доктор-инженер, *Г.Ф. Кривуля*, д-р техн. наук, проф., *О.Г. Руденко*, д-р техн. наук, проф., *Н.В. Алипов*, д-р техн. наук, проф., *Е.В. Бодянский*, д-р техн. наук, проф., *Э.Г. Петров*, д-р техн. наук, проф., *В.Ф. Шостак*, д-р техн. наук, проф., *В.М. Левыкин*, д-р техн. наук, проф., *В.И. Хаханов*, д-р техн. наук, проф. (отв. ред.).

Свидетельство о государственной регистрации  
печатного средства массовой информации

КВ № 12073-944ПР от 07.12.2006 г.

*Адрес редакционной коллегии:* Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, комн. 321, тел. 70-21-326

© Харківський національний університет  
радіоелектроніки, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>БАБИЧ А.В., ХАХАНОВ В.И., МУРАДАЛИ А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РЕАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ВРЕМЕНИ.....	4
<b>КУЛАК Э.Н., КАМИНСКАЯ М.А., КОНСТАНТИНОВА Ю.К.</b> МЕТОД АНАЛИЗА ТЕСТОПРИГОДНОСТИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ВСТРОЕННОГО САМОТЕСТИРОВАНИЯ.....	9
<b>ДРОЗД А.В.</b> НЕТРАДИЦИОННЫЙ ВЗГЛЯД НА РАБОЧЕЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	15
<b>АРТЮХ А.В., ГИБКИНА Н.В., СИДОРОВ М.В., АГАПОВ Е.Е.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА R-ФУНКЦИЙ К РАСЧЕТУ ТЕЧЕНИЙ В КАНАВКЕ ПОДШИПНИКА....	25
<b>МАРТЫНОВ С.А., ВОРОБЬЕВА В.П., КРУГОЛЬ М.С., ЮРКИН А.Ю., ХАЖМУРАДОВ М.А.</b> МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРСАТРОНА «УРАГАН-2М».....	32
<b>КОШЕВОЙ Н.Д., КОСТЕНКО Е.М., ЗАБОЛОТНЫЙ А.В.</b> ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	38
<b>ВАСЮТА К.С., БУЛАЄНКО М.В.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ.....	42
<b>ПАСТУШЕНКО В.Й., СТЕЦЕНКО А.М.</b> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ КРАПЕЛЬНОМУ ЗВОЛОЖЕННІ.....	46
<b>ХАХАНОВ В.И., ЧУМАЧЕНКО С.В., ЛИТВИНОВА Е.И., ЗАХАРЧЕНКО О.В.</b> ТЕХНОЛОГИЯ ПОКРЫТИЯ ДЕФЕКТНЫХ БЛОКОВ РЕЗЕРВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ.....	52
<b>ГОРОХОВАТСКИЙ А.В.</b> ПРОЕКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ НОРМАЛИЗАЦИИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	64
<b>СОКОЛОВ С.А., СТОКИПНЫЙ А.Л., ГОЛДАЕВ А.В.</b> ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ IP-СЕТИ.....	70
<b>ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., МЕЛЬНИК С.В.</b> ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА.....	76
<b>ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., КОРНИЕНКО Ю.Н.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПЛАНИРОВАНИИ.....	81
<b>ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., КУДРЯШОВ В.Ю.</b> АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ....	85
<b>МІНУХІН С.В., ЗНАХУР С.В.</b> МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПОШУКУ ІНФОРМАЦІЇ В GRID-МЕРЕЖІ.....	89
<b>ТИМОФЕЕВ В.А., ДЕНИСОВА И.Г.</b> ОЦЕНКА ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОТИВОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СУБЪЕКТАМИ КАК ПЕРВОПРИЧИНА КОНФЛИКТОВ ИЛИ СОТРУДНИЧЕСТВА В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....	94
<b>ГИБКИНА Н.В., ВОЛКОТРУБ С.В.</b> ЧИСЛЕННИЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРАХОВОЙ КОМПАНИИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	100
<b>ТЕВЯШЕВ А.Д., ГУСАРОВА И.Г., КАМИНСКАЯ А.В.</b> УЧЕТ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ.....	104
<b>СЛЕСАРЕНКО А.П., РОМАНЧЕНКО М.А., СОРОКА О.С.</b> ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ РЕЖИМАМИ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕХНОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ЗОНАХ ВИРОБНИЧИХ СПОРУД.....	113
РЕФЕРАТИ.....	121

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РЕАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ВРЕМЕНИ**

---

Рассматриваются механизмы процессов передачи данных в реальном масштабе времени, характеристики трафика реального масштаба времени, а также основные требования, предъявляемые к передаче данных в режиме real-time. В качестве реализации рассмотренных механизмов приводится архитектура протокола RTP/RTCP, выполняется анализ соответствия указанной реализации рассмотренным требованиям. Определяются задачи, решение которых в целях обеспечения соответствия требованиям, предъявляемым к передаче данных в реальном масштабе времени, является достаточно актуальным. Для решения указанных задач предлагается использование аппарата речевого интеллекта и системы AntNet.

### **Введение**

Повсеместное и интенсивное расширение высокоскоростных сетевых технологий как в локальных, так и глобальных масштабах, включая линии связи Интернет и других объединенных сетей, сделало возможным использование IP-сетей для переноса мультимедийного трафика, который по своей сути является трафиком реального времени, что обуславливает появление различий в требованиях, предъявляемых к транспортной платформе классическими сетевыми приложениями и сетевыми приложениями реального времени. К примеру, в традиционных Интернет-приложениях, таких как приложения передачи файлов, электронная почта и приложения «клиент-сервер», включая веб-приложения, как правило, важны такие характеристики, как пропускная способность, таймаут и гарантия доставки данных. В отличие от подобных приложений, для приложений реального времени важнее временные параметры. В большинстве случаев имеется требование доставки данных с постоянной скоростью, равной скорости их передачи. В других случаях у каждого блока данных есть граничный срок доставки, т.е. по истечении определенного срока такие данные становятся бесполезными.

В любом случае, наиболее существенное влияние на параметры оказывает среда передачи данных, представляющая собой совокупность пассивного и активного коммуникационного оборудования, входящего в маршрут трафика реального масштаба времени, и протоколов передачи, задействованных на всех уровнях для передачи упомянутого трафика.

Таким образом, исследование процессов передачи данных в реальном масштабе времени в целях определения основных параметров и характеристик, задающих необходимый уровень качества обслуживания, а также формулирование задач, решение которых обеспечит упомянутый необходимый уровень качества обслуживания на всем пути продвижения данных приложений реального времени, является достаточно актуальным направлением.

### **Характеристики трафика реального масштаба времени**

Рассмотрим типичный процесс сетевого приложения реального времени (рис.1). Сервер генерирует аудиоданные, которые должны передаваться со скоростью 64 Кбит/с, минимально допустимой для приложений цифровой передачи речи. Оцифрованный аудиосигнал передается в пакетах, содержащих по 160 байт данных, так что передается по одному пакету через каждые 20 мс. Эти пакеты пропускаются через объединенную сеть и доставляются на мультимедийный персональный компьютер, воспроизводящий этот аудиосигнал в режиме реального времени сразу по прибытию пакета. Однако поскольку объединенная сеть задерживает передаваемые по ней пакеты на непостоянные интервалы времени, пакеты не будут прибывать через фиксированные интервалы времени в 20 мс. Чтобы компенсировать неравномерность поступления данных, входящие пакеты буферизируются, слегка задерживаются, а затем с постоянной скоростью передаются программному обеспечению, воспроизводящему звук.

Возможности компенсации при помощи буфера ограничены. Рассмотрим понятие «флуктуация задержки» (delay jitter), под которой понимается максимальное изменение величины задержки пакетов в течение одного сеанса. Например, если минимальная сквозная задержка каждого пакета равна 1 мс, а максимальная – 6 мс, то флуктуация задержки равна 5 мс. До тех пор, пока буфер задерживает входящие пакеты, по меньшей мере, на 5 мс, в выходной поток буфера попадут все входящие пакеты. Однако если буфер задерживает пакеты только на 4 мс, тогда любой пакет, запаздывающий относительно остальных пакетов более чем на 4 мс (с абсолютной задержкой более 5 мс), отбрасывается, так как пакеты нельзя воспроизводить в неверном порядке.

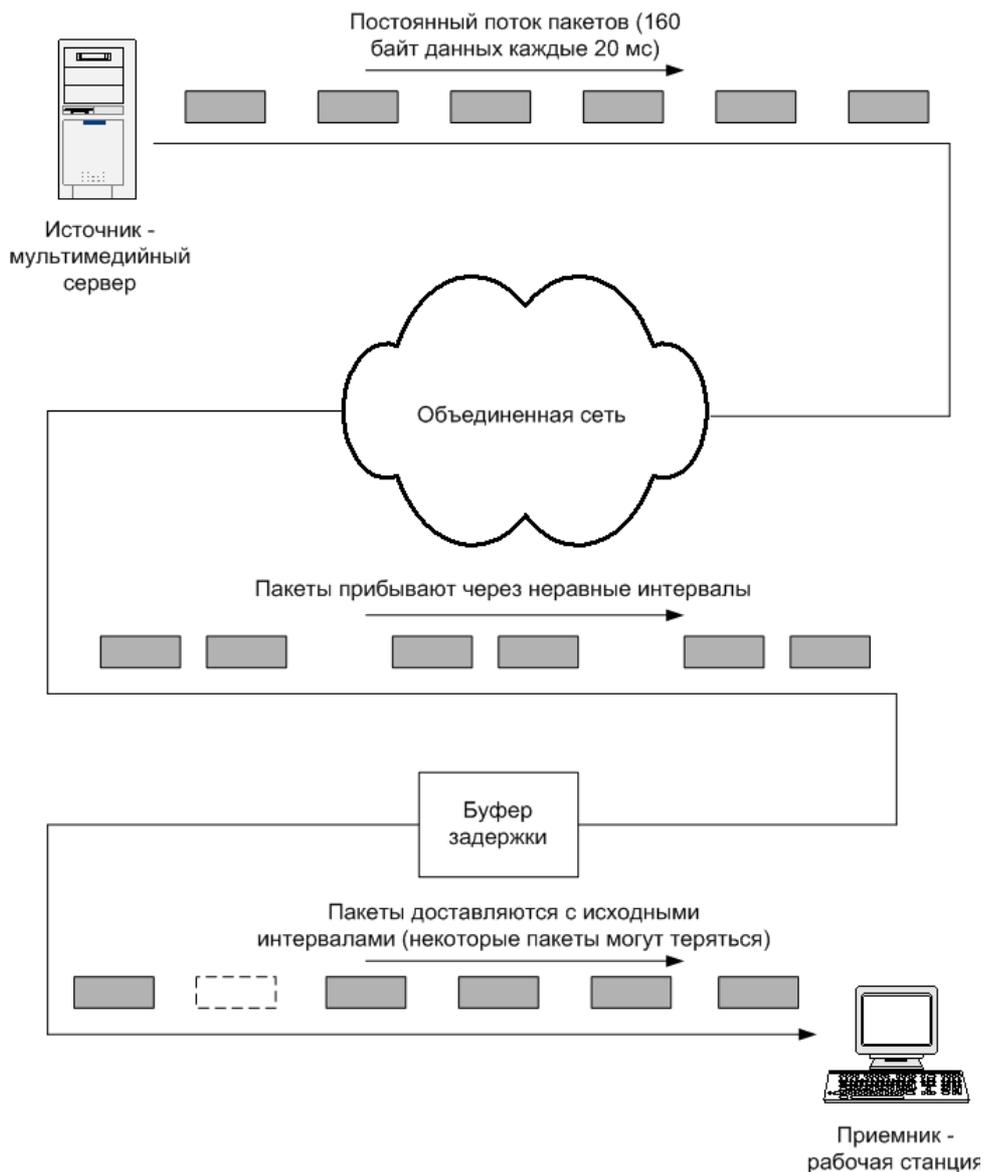


Рис. 1. Передача аудиоданных в реальном режиме времени

Трафик реального времени подразумевает последовательность пакетов равного размера, генерируемых с постоянной частотой. Однако данное описание не всегда соответствует профилю трафика. На рис. 2 показаны некоторые возможные варианты [1].

**Источник монотонных данных.** Пакеты фиксированного размера генерируются через фиксированные интервалы времени. Такая характеристика соответствует приложениям, непрерывно генерирующим данные, которые обладают невысокой избыточностью и слишком важные, чтобы применять к ним алгоритм сжатия с потерями. Среди примеров можно

назвать данные радара, управляющего движением самолетов, а также симуляторы реального времени.

Двухпозиционный источник. Периоды активности источника, в течение которых он генерирует пакеты фиксированного размера через фиксированные интервалы времени, чередуются с периодами бездействия. Данному профилю соответствует такой источник, как телефонный аппарат или аудиоконференция.

Источник пакетов переменного размера. Источник генерирует пакеты переменного размера через равные интервалы времени. Примером такого источника данных является оцифрованное видео с разным коэффициентом сжатия при одном и том же уровне качества выходных данных.

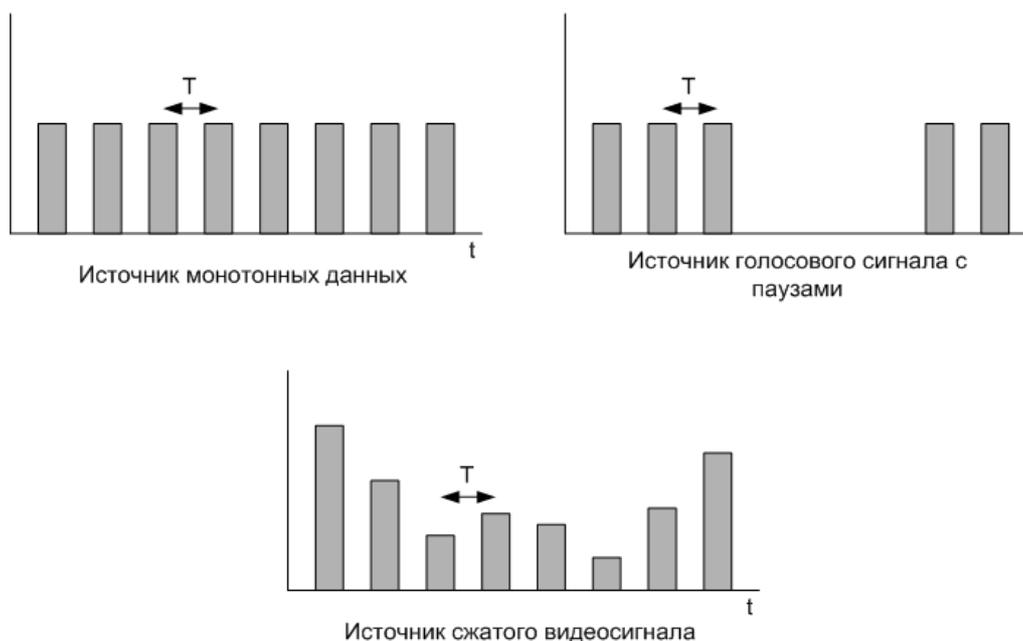


Рис.2. Виды трафика реального времени

В результате даже для трафика реального времени, в зависимости от типа передаваемых данных, могут применяться различные характеристики, задающие уровень качества обслуживания, требуемый в каждом конкретном случае использования приложения реального времени.

В целях структуризации упомянутых характеристик различают жесткие и гибкие приложения реального времени. Гибкие приложения реального времени могут выдержать потерю некоторой части данных, тогда как жесткие приложения реального времени не допускают потери данных. В общем, гибкие приложения реального времени предъявляют меньшие требования к сети и поэтому допускают оптимизацию ее использования даже за счет потери некоторых пакетов или доставки их в неверном порядке. В жестких приложениях реального времени соображения относительно соответствия трафика ограничениям на флуктуацию и соображения относительно его высокой надежности преобладают над проблемой оптимизации утилизации сети.

В [2] приводятся следующие основные требования, предъявляемые к передаче данных в реальном масштабе времени:

- небольшая флуктуация,
- соответствующая производительность для поддержки большого количества соединений в сетях больших размеров,
- высокоэффективная утилизация полосы пропускания,
- умеренные требования к внутрисетевой буферизации,
- низкие накладные расходы на передачу служебного заголовка пакета или ячейки,
- низкие накладные расходы на передачу и обработку пакета внутри сети и на конечной станции.

Указанные требования трудно соблюдать в глобальной или объединенной IP-сети, поскольку транспортные протоколы TCP и UDP сами по себе им не соответствуют. В настоящее время протоколом передачи медиаданных, в большей или меньшей степени отвечающим перечисленным выше требованиям, является протокол RTP. Тем не менее, передача пакетов протокола RTP ведется поверх протокола UDP, работающего, в свою очередь, поверх IP, что объясняется отсутствием собственных транспортных механизмов у протокола RTP. Таким образом, проблемы, присущие IP-сетям, все еще остаются актуальными и требуют решения.

### Структура и механизмы функционирования протокола RTP

Как было сказано ранее, RTP работает поверх UDP и может поддерживать передачу данных в реальном времени между несколькими участниками RTP-сеанса. Для каждого участника RTP-сеанс определяется парой транспортных адресов назначения пакетов (один сетевой адрес — IP и пара портов: RTP и RTCP).

Пакеты RTP содержат следующие поля [3]: идентификатор отправителя, указывающий, кто из участников генерирует данные, отметки о времени генерирования пакета, чтобы данные могли быть воспроизведены принимающей стороной с правильными интервалами, информация о порядке передачи, а также информация о характере содержимого пакета, например, о типе кодировки видеоданных (MPEG, Indeo и др.). Наличие такой информации позволяет оценить величину начальной задержки и объема буфера передачи.

Поскольку RTP определяет и регулирует формат полезной нагрузки передаваемых данных, с этим напрямую связана концепция синхронизации, за которую частично отвечает механизм трансляции RTP — микшер. Принимая потоки пакетов RTP от одного или более источников, микшер комбинирует их и посылает новый поток пакетов RTP одному или более получателям. Микшер может комбинировать данные, а также изменять их формат, например, при комбинировании нескольких источников звука. Предположим, что новая система хочет принять участие в сеансе, но ее канал до сети не имеет достаточной емкости для поддержки всех потоков RTP, тогда микшер получает все эти потоки, объединяет их в один и передает последний новому члену сеанса. При получении нескольких потоков микшер просто складывает значения импульсно-кодовой модуляции. Заголовок RTP, генерируемый микшером, включает идентификатор отправителя, чьи данные присутствуют в пакете.

Более простое устройство — транслятор создает один исходящий пакет RTP для каждого поступающего пакета RTP. Этот механизм может изменить формат данных в пакете или использовать иной комплект низкоуровневых протоколов для передачи данных из одного домена в другой. Например, потенциальный получатель может оказаться не в состоянии обрабатывать высокоскоростной видеосигнал, используемый другими участниками сеанса. Транслятор конвертирует видео в формат более низкого качества, требующий не такой высокой скорости передачи данных (рис.3).

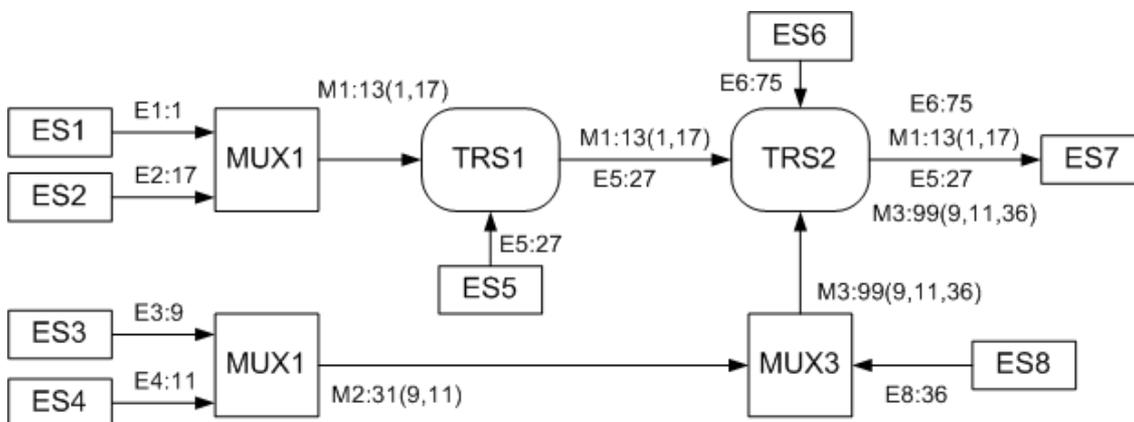


Рис. 3. Пример RTP сети с оконечными системами ES, микшерами MUX и трансляторами TRS

Здесь цифровые обозначения 13, 31 и 99 – идентификаторы синхронизации микшеров MUX1-MUX3, которые служат для идентификации отдельных потоков данных в течение одной RTP-сессии; 1, 9, 11, 17, 27, 36, 75 – идентификаторы синхронизации пакетов оконечных систем ES1-ES8.

### **Методы контроля передачи RTP-трафика**

Задачу обеспечения управления передачей решает протокол RTCP (Real-time Transport Control Protocol). RTCP использует тот же самый базовый транспортный протокол, что и RTP (обычно UDP), но другой номер порта.

RTCP выполняет несколько функций:

1. Обеспечение и контроль качества услуг и обратная связь в случае перегрузки. Так как RTCP-пакеты являются многоадресными, все участники сеанса могут оценить, насколько хороши работа и прием других участников. Сообщения отправителя позволяют получателям оценить скорость данных и качество передачи. Сообщения получателей содержат информацию о проблемах, с которыми они сталкиваются, включая утерю пакетов и избыточную неравномерность передачи. Обратная связь с получателями важна также для диагностирования ошибок при распространении. Анализируя сообщения всех участников сеанса, администратор сети может определить, касается данная проблема одного участника или носит общий характер. Если приложение-отправитель приходит к выводу, что проблема характерна для системы в целом, например, по причине отказа одного из каналов связи, то оно может увеличить степень сжатия данных за счет снижения качества или вообще отказаться от передачи видео — это позволяет передавать данные по соединению низкой емкости.

2. Идентификация отправителя. Пакеты RTCP содержат стандартное текстовое описание отправителя. Они предоставляют больше информации об отправителе пакетов данных, чем случайным образом выбранный идентификатор источника синхронизации. Кроме того, они помогают пользователю идентифицировать потоки, относящиеся к различным сеансам.

3. Оценка размеров сеанса и масштабирование. Для обеспечения качества услуг и обратной связи в целях управления загруженностью, а также в целях идентификации отправителя все участники периодически посылают пакеты RTCP. Частота передачи этих пакетов снижается с увеличением числа участников. При небольшом количестве участников один пакет RTCP посылается максимум каждые 5 секунд. В [3] описан алгоритм, согласно которому участники ограничивают частоту RTCP-пакетов в зависимости от общего числа участников. Цель состоит в том, чтобы трафик RTCP не превышал 5% от общего трафика сеанса.

### **Постановка задачи и дальнейшие исследования**

В свете сказанного можно определить ряд проблем, в настоящее время присущих процессу передачи трафика в реальном масштабе времени посредством использования протоколов RTP/RTCP. Использование многоадресной рассылки, являющейся естественным типом трафика для RTP, в случае передачи управляющего трафика и трафика обратной связи может привести к неоптимальному использованию полосы пропускания полезным потоком данных. Применяемый механизм масштабирования в целях управления загруженностью может привести к тому, что при высокой интенсивности передачи трафика и большом количестве участников передачи данные, переносимые пакетами RTCP, в момент доставки уже могут устареть. Поэтому становится актуальной задача модификации механизма обратной связи в целях повышения его адаптивности и снижения нагрузки на сеть. Требование гибкой адаптации к динамически изменяющимся условиям транспортной платформы и сетевого трафика, приведенное в данной статье, не может быть соблюдено с использованием классических схем маршрутизации в IP-сети [4]. Отсюда определяется актуальность задачи разработки механизмов адаптивной маршрутизации. В качестве базового аппарата предлагается использование роевого интеллекта и системы AntNet, хорошо зарекомендовавших себя в областях, которые требуют решения задач нахождения кратчайших маршрутов к источнику, а также динамического перераспределения и оптимизации этих маршрутов.

## Выводы

Рассмотрены характеристики трафика реального масштаба времени, требования, предъявляемые к приложениям реального времени, выполнен анализ структуры и механизмов функционирования протоколов RTP/RTCP. В результате анализа были определены проблемы, присущие процессам передачи данных в реальном масштабе времени в общем и протоколам RTP/RTCP в частности. В качестве дальнейшего исследования предлагается решение задач модификации механизма обратной связи в целях повышения его адаптивности и снижения нагрузки на сеть, а также разработки механизмов адаптивной маршрутизации на базе аппарата роевого интеллекта.

**Список литературы:** 1. Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003. 783 с. 2. Aras C.M., Kurose J. F., Reeves D.S., Schulzrinne H. Real-Time Communication in Packet-Switched Networks. Proceedings of the IEEE, January 1994. 3. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt>. 4. Бабич А.В., Кудина М.В., Емельянов И.В. Исследование методов решения задач инжиниринга трафика в сетях следующего поколения // АСУ и приборы автоматики. 2008. №145. С. 8-13.

Поступила в редколлегию 06.06.2009

**Бабич Анна Витальевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: сетевые технологии, технологии дистанционного образования. Увлечения: активный отдых, путешествия, иностранные языки. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: babich@kture.kharkov.ua

**Хаханов Владимир Иванович**, декан факультета КИУ, доктор технических наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и тестирование цифровых систем. Увлечения: футбол, горные лыжи, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

**Мурад Али А.**, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: компьютерные сети следующего поколения. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326.

---

УДК 519.713:681.326

*Э.Н. КУЛАК, М.А. КАМИНСКАЯ, Ю.К. КОНСТАНТИНОВА*

## МЕТОД АНАЛИЗА ТЕСТОПРИГОДНОСТИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ВСТРОЕННОГО САМОТЕСТИРОВАНИЯ

---

Предлагается метод анализа тестопригодности для сложных цифровых комбинационных схем. Приводится алгоритм модификации устройства и генерации взвешенного теста для улучшения показателей тестопригодности. Присутствуют результаты моделирования схемы в системе SIGESTEST. Предложенный метод сравнивается с двумя аналогичными методами анализа тестопригодности.

### 1. Введение

С увеличением интеграции кремниевых структур отношение числа вентилях к числу выводов схемы существенно возрастает, что уменьшает наблюдаемость и управляемость внутренних узлов схемы. Это в свою очередь затрудняет проведение процедуры тестирования, увеличивает время тестирования и объем тестов. Простым решением проблемы повышения качества теста является введение в схему точек контроля и использование стандартов тестопригодного проектирования и технологий встроенного самотестирования [1,2].

*Цель работы:* существенное уменьшение времени верификации, синтеза тестов и/или повышение степени покрытия неисправностей для заданных входных наборов путем модификации структуры цифрового устройства на основе анализа его тестопригодности и использования генератора взвешенного теста. Задачи: 1) разработка вероятностного метода анализа тестопригодности, ориентированного на взвешенное тестирование; 2) разработка стратегии выбора точек для модификации комбинационных и последовательностных схем,

а также способа их модификации; 3) организация тестирования модифицированных схем, экспериментальное подтверждение его эффективности; 4) реализация метода в рамках системы SIGETEST. Объект исследования: комбинационные и последовательностные схемы, представленные на системном (алгоритмическом), регистровом и вентильном уровне, не ограниченные решениями методов DFT, а также в DFT-системах для комбинационных схем или их частей, плохо поддающихся псевдослучайному тестированию. В работе предлагается использование генератора взвешенного теста.

## 2. Анализ тестопригодности схемы

Предлагаемый метод заключается в вычислении значений управляемости и наблюдаемости узлов схемы, формирующих оценку тестопригодности. Предложенный метод может быть использован как на досинтезной структуре цифровых устройств, так и на более детализированных уровнях представления – вентильном уровне и уровне регистровых передач. Метод основан на вероятностном подходе вычисления показателей тестопригодности узлов устройства.

*Вычисление управляемости.* Значения управляемости на первичных входах равны 0.5 (так как первичные входы устройства или его входные порты стопроцентно управляемы). Значения управляемости вычисляются от первичных входов схемы до первичных выходов и изменяются в диапазоне от 1 до 0. Вычисление управляемости для схем вентильного уровня описано в [11].

Для определения управляемости выхода цифрового устройства необходимо, используя аналитическое выражение, описывающее это устройство, составить выражение, в котором управляемость единицы выхода образуется следующим образом: из аналитического выражения вместо инверсии входа подставляется управляемость нуля, а вместо входа без инверсии – управляемость единицы этого входа. Конъюнкция определяет умножение, дизъюнкция – сложение.

Данный метод позволяет вычислять управляемость выходов комбинационных устройств уровня регистровых передач.

Для дешифратора 2 в 4:

$$Y_0 = \bar{A} \wedge \bar{B}, Y_1 = \bar{A} \wedge B, Y_2 = A \wedge \bar{B}, Y_3 = A \wedge B,$$

где A, B – входы дешифратора;  $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3$  – выходы дешифратора.

Управляемости выходов:

$$\text{для выхода } Y_0: C^1(Y_0) = C^0(A) \cdot C^0(B), C^1(Y_0) = 1 - (C^0(A) \cdot C^0(B));$$

$$\text{для выхода } Y_1: C^1(Y_1) = C^0(A) \cdot C^1(B), C^0(Y_1) = 1 - (C^0(A) \cdot C^1(B));$$

$$\text{для выхода } Y_2: C^1(Y_2) = C^1(A) \cdot C^0(B), C^0(Y_2) = 1 - (C^1(A) \cdot C^0(B));$$

$$\text{для выхода } Y_3: C^1(Y_3) = C^1(A) \cdot C^1(B), C^0(Y_3) = 1 - (C^1(A) \cdot C^1(B)).$$

В общем случае управляемость каждого выхода дешифратора:

$$C^1(Y_n) = \frac{1}{2^n},$$

где n – количество входов дешифратора.

Для одного разряда сумматора:

$$S = (\bar{A} \wedge \bar{PI} \wedge B) \vee (\bar{B} \wedge A \wedge \bar{PI}) \vee (\bar{A} \wedge \bar{B} \wedge PI) \vee (A \wedge B \wedge PI),$$

$$PO = (\bar{A} \wedge \bar{PI} \wedge B) \vee (B \wedge \bar{A} \wedge PI) \vee (A \wedge \bar{B} \wedge PI) \vee (A \wedge B \wedge PI),$$

здесь A, B – операнды; PI – вход предыдущего разряда; S – полученная сумма; PO – перенос в следующий разряд.

Определим управляемости выхода S одного разряда сумматора:

$$C^1(S) = C^0(A) \cdot C^0(PI) \cdot C^1(B) + C^0(B) \cdot C^1(A) \cdot C^0(PI) + \\ + C^0(A) \cdot C^0(B) \cdot C^1(PI) + C^1(A) \cdot C^1(B) \cdot C^1(PI)$$

Для нуля:

$$C^0(S) = 1 - (C^0(A) \cdot C^0(PI) \cdot C^1(B) + C^0(B) \cdot C^1(A) \cdot C^0(PI) + C^0(A) \cdot C^0(B) \cdot C^1(PI) + C^1(A) \cdot C^1(B) \cdot C^1(PI))$$

Для выхода РО:

$$C^1(P) = C^0(A) \cdot C^0(PI) \cdot C^1(B) + C^0(B) \cdot C^1(A) \cdot C^0(PI) + C^0(A) \cdot C^0(B) \cdot C^1(PI) + C^1(A) \cdot C^1(B) \cdot C^1(PI),$$

$$C^0(P) = 1 - (C^0(A) \cdot C^0(PI) \cdot C^1(B) + C^0(B) \cdot C^1(A) \cdot C^0(PI) + C^0(A) \cdot C^0(B) \cdot C^1(PI) + C^1(A) \cdot C^1(B) \cdot C^1(PI))$$

*Вычисление наблюдаемости.* Наблюдаемость  $O(X_i)$  – количественная мера способности устройства транспортировать состояние рассматриваемой линии на внешние выходы схемы. Наблюдаемость может принимать относительное значение, лежащее в промежутке  $[0;1]$ .  $O(x_i) = 1$  для внешнего выхода.  $O(x_i) = 0$ , если невозможно обеспечить такие условия, при которых изменение значения в узле приводило бы к изменению значения на первичном выходе. Практически, значения управляемости большинства линий лежат между границами промежутка  $[0;1]$ . Наблюдаемость узлов в схеме уменьшается от первичных выходов к первичным входам. Определение наблюдаемости для схем вентильного уровня описано в [11]. Для схем уровня регистровых передач наблюдаемость вычисляется аналогично. Например, для демультиплексора наблюдаемость информационного входа определяется как отношение суммы произведений наблюдаемостей выходов на управляемости адресных входов, обеспечивающих активизацию выхода к количеству выходов.

Если у элементов отсутствуют входы активизации, а следовательно, и за, то  $g = 1$ . Примером таких элементов являются инвертор и повторитель. У них один вход и один выход, причем наблюдаемость входа равна наблюдаемости выхода. Для таких случаев, как ветвление выхода или сходящиеся разветвления, наблюдаемость вычисляется, как показано в [11].

*Определение тестопригодности.* Простая мера тестопригодности узла может быть получена перемножением значений его управляемости и наблюдаемости:

$$T^1 = C^0(Y) \cdot O(Y), T^0 = C^1(Y) \cdot O(Y), T(Y) = T^1(Y) + T^0(Y) / 2,$$

где  $0$  – тестопригодность (1- тестопригодность) узла  $Y$ ;  $T(Y)$  – тестопригодность узла  $Y$ . Общий показатель тестопригодности всей схемы должен представлять собой меру средней трудоемкости получения теста для узла схемы, следовательно, эта мера может быть представлена как среднее арифметическое значение тестопригодностей всех узлов схемы, т.е.

$$T_{sh} = [\sum_{i=1}^N T(Y_i)] / N,$$

где  $T_{sh}$  – тестопригодность всей схемы;  $n$  – количество узлов схемы. Для удобства интерпретации результатов берется корень восьмой степени значений управляемости, наблюдаемости, тестопригодности.

Пример. Рассмотрим схему, представленную на вентильном уровне на языке описания аппаратуры VHDL(рис.1).

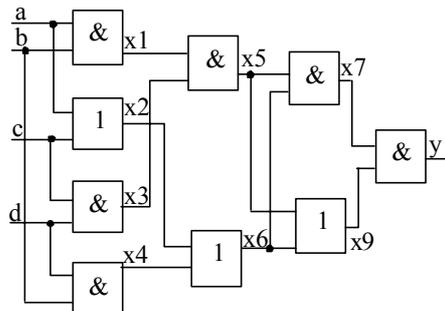


Рис. 1. Пример схемы для анализа

Таблица 1. Показатели тестопригодности по методу ССОРРoГТА

Линия	C <sup>0</sup>	C <sup>1</sup>	O	T <sup>0</sup>	T <sup>1</sup>	T
a	0,500	0,500	0,375	0,312	0,312	0,312
b	0,500	0,500	0,375	0,312	0,312	0,312
c	0,500	0,500	0,375	0,312	0,312	0,312
d	0,500	0,500	0,375	0,312	0,312	0,312
x1	0,750	0,250	0,236	0,572	0,190	0,381
x2	0,250	0,750	0,233	0,572	0,190	0,381
x3	0,750	0,250	0,248	0,187	0,563	0,375
x4	0,750	0,250	0,248	0,187	0,563	0,375
x5	0,062	0,937	0,055	0,886	0,059	0,472
x6	0,937	0,062	0,003	0,062	0,934	0,498
x7	0,058	0,941	0,058	0,886	0,055	0,470
x8	0,941	0,058	0,941	0,003	0,055	0,029
y	0,055	0,944	1,000	0,944	0,055	0,500

В табл.1 представлены результаты анализа тестопригодности для схемы на рис.1.

### 3. Стратегия выбора контрольных точек и тестирования

Проведенные эксперименты показали, что разработанный метод позволяет осуществлять простую процедуру выбора точек для модификации схемы.

Современные технологии позволяют компоновать число вентилях до нескольких миллионов. В связи с этим дополнительные аппаратные затраты, связанные с использованием генератора взвешенного теста и пути сканирования, не

являются критичными. Гораздо важнее пригодность схемы к адекватной проверке. Поэтому вполне достаточно использование избыточных, но простых и регулярных подходов и структур для уменьшения времени разработки и производства изделия.

Используется ряд подходов для получения оптимального для разработчика качества теста. Например, в [5] предлагается использование на первом этапе псевдослучайного теста – генерация теста и процедура тестирования прекращается, когда получено 80-85% покрытия неисправностей. Затем этот тест дополняется детерминированным тестом для получения 100% покрытия. Авторы предлагают реализацию встроенных генераторов теста в каждом ядре, при этом псевдослучайные последовательности генерируются с помощью внешних генераторов, а детерминированные – генерируются с помощью встроенной BIST и хранятся в системе.

В [8] предлагается стандартный подход. 1. На начальном этапе тестирования используется заданный эталон или начальный тест. Проводится тестирование с этим эталоном. 2. Если степень покрытия неисправностей не удовлетворяет разработчика, создается новый тест на основе использования полученных в процессе предварительного тестирования ошибок. В данной работе предлагается подход, описанный ниже. 1. Предварительно проводится анализ тестопригодности по предложенному в работе методу. 2. Генерируется псевдослучайный тест для заданной схемы. 3. Проводится анализ неисправностей этим тестом. Если степень покрытия неисправностей не удовлетворяет разработчика, то, на основе полученных показателей тестопригодности, выбираются критические точки в схеме и генерируется новый, взвешенный тест, использующий полученные показатели тестопригодности. Для этого необходимо выбрать 3-5% линий с низким показателем управляемости нулем и единицей наблюдаемости.

На рис. 2 представлена общая схема организации тестирования устройства при наличии пути сканирования.

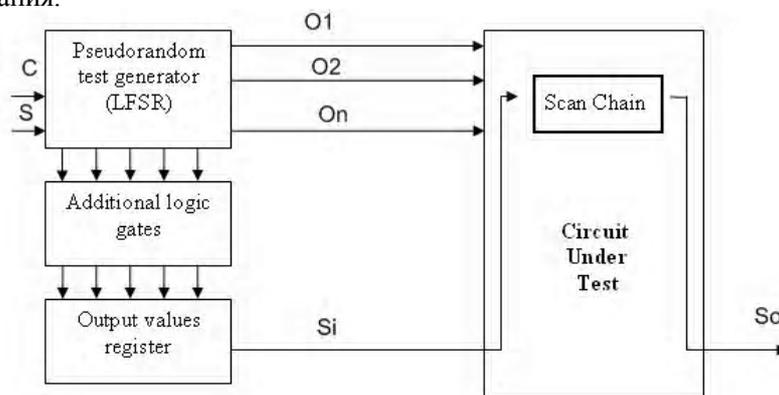


Рис. 2. Общая схема организации тестирования устройства

*Способ модификации схемы.* Способ модификации схемы состоит в следующем: на каждую выбранную линию схемы ставится ячейка, которая должна обеспечить 100%-ную наблюдаемость и 100%-ную управляемость выбранной линии, при этом она должна быть абсолютно прозрачной для нормального режима работы схемы, а также должна просто тестироваться.

Для уменьшения числа дополнительных входов и выходов эта ячейка должна с остальными ячейками объединяться в сдвиговый регистр, аналогичный пути сканирования в структурных методах тестопригодного проектирования. Ячейка регистра граничного сканирования удовлетворяет перечисленным требованиям, за исключением её размера.

Для уменьшения аппаратных затрат и обеспечения адекватной проверки ячейки предлагается использовать ячейку, которая состоит из двухступенчатого синхронного D – триггера и мультиплексора. Схема подключения ячеек должна быть такая, как в [9].

Можно организовать также параллельную загрузку тестовых данных в путь сканирования. В этом случае не будет использован регистр выходных значений Output value register.

*Использование генератора взвешенного теста.* В работе предлагается использование генератора взвешенного теста, построенного таким образом, что выбранные в схеме линии будут непосредственно управляемыми, т.е. на линию с низкой управляемостью нуля ( $C_0$ ) будет подаваться тестовая последовательность, содержащая в себе преимущественно логический ноль. В свою очередь, линии, содержащие низкую управляемость единицы ( $C_1$ ), будут непосредственно управляемы логической единицей. Для внедрения генератора взвешенного теста выбираются внутренние линии с низкими показателями управляемости. При этом линии с низким значением управляемости нуля будут управляемы дополнительным элементом AND (NOR), встроенным в генератор тестовой последовательности. Таким же образом должна будет улучшена управляемость единицы – путем использования дополнительных элементов NAND (OR).

*Использование пути сканирования.* В качестве дополнительной стратегии предлагается использовать метод модификации, как представлено в [9]. Для этого необходимо выбрать 3-5% линий с низким показателем наблюдаемости.

Для схемы из примера исчерпывающий тест составляет 16 векторов.

Таблица 2. Результаты моделирования неисправностей схемы до модификации

№	Тест-вектор	Качество теста, Q%	Проверяемые неисправности на тест-векторе
1	0000	3.846	y-1
2	0001	11.538	x5-1, x7-1
3	0010	11.538	
4	0011	15.385	x1-1
5	0100	15.385	
6	0101	15.385	
7	0110	15.385	
8	0111	19.231	a-1
9	1000	19.231	
10	1001	19.231	
11	1010	19.231	
12	1011	23.077	b-1
13	1100	26.923	x2-1
14	1101	30.769	c-1
15	1110	34.615	d-1
16	1111	76.923	c-0 a-0 b-0 d-0 x1-0 x6-0 x5-0 x7-0 x8-0 y-0

Схема преднамеренно была выбрана избыточной для более наглядного представления результатов моделирования при использовании АС-НОС технологий на основе предложенного метода.

Из результатов моделирования видно, что линии x3, x4 не проверяются тестом вообще, а на линиях x6, x8 отсутствует проверка неисправности «константа 1».

Для модификации удобно ввести в схему дополнительные наблюдаемые выходы. В общем случае дополнительные выходные линии определяются путем вычисления наблюдаемости  $O(X_i)$ . В данной схеме непроверяемыми являются линии  $x_4$  и  $x_3$ . По существующему ограничению на количество дополнительных выводов схемы (5%), зависящее от количества выводов и вентилях схемы и её размера, в схеме из примера наблюдаемой линии можно выбрать только одну из множества внутренних линий  $\{a, b, c, d, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, y\}$ . Сначала выбирается линия  $x_3$  и проводится моделирование неисправностей на заданном тесте (исчерпывающий тест 16 векторов). В табл. 2 представлены результаты моделирования с выбранной линией  $x_3$  в качестве дополнительного наблюдаемого выхода. Затем выбирается линия  $x_4$  и аналогично проводится моделирование неисправностей.

Моделирование на выбранных линиях не дало ожидаемого результата, дополнительный вход  $x_3$  дает качество теста  $Q=84,769\%$  и 21 проверяемую неисправность из 26. Дополнительный выход  $x_4$  дает качество теста  $Q=80,769\%$  и 21 проверяемую неисправность из 26. Даже обе линии  $x_3, x_4$  не дают ощутимого улучшения качества теста и повышения процента проверяемых неисправностей. Так, при моделировании схемы с выбранными дополнительными выходами  $x_3$  и  $x_4$  было получено качество теста  $Q=92,308\%$  и 24 проверяемые неисправности из 26. На производстве оптимальным является качество теста в диапазоне от 95 до 99% [3]. Таким образом, полученное качество теста не превышает даже минимального порога 95%. В [3] также упоминается, что точками контроля (дополнительные линии) лучше выбирать не те линии, которые не проверяются заданным тестом, а те, которые находятся в схеме сразу за этими линиями (линии, которые ближе к выходу). Предлагаемый метод разработан таким образом, чтобы низкая наблюдаемость указывала на именно такие линии, которые являются оптимальными для выбора их наблюдаемыми. Из табл. 2 видно, что наихудшую наблюдаемость имеет линия  $x_6$ . Таким образом, линия  $x_6$  выбирается как дополнительный наблюдаемый выход. Далее проводится моделирование неисправностей с дополнительным выходом  $x_6$ . Качество теста в этом случае  $Q=96,154\%$ , проверяется 25 неисправностей из 26.

Начальное качество теста на схеме до модификации  $Q=76,923\%$ , при дополнительном выходе  $x_3$ , выбранном как непроверяемая линия,  $Q=84,615\%$ , при дополнительном выходе  $x_4$   $Q=80,796\%$ , при дополнительном выходе  $x_6$ , выбранном по предлагаемому методу,  $Q=96,154\%$ . Выбор линий по предлагаемому методу анализа тестопригодности дал на схеме из примера увеличение на 19, 231%. Выбор непроверяемых линий в качестве дополнительных наблюдаемых выходов дал повышение качества теста на 7,692%.

Если разработчик ограничен во введении дополнительных линий наблюдения, предлагается использование генератора взвешенного теста, построенного на основе показателей управляемости.

#### **4. Результаты и выводы**

*Научная новизна.* Предложен метод анализа тестопригодности, а также стратегия поиска контрольных точек и модификации устройства на вентиляльном уровне и уровне регистровых передач.

*Практическая значимость полученных результатов:* 1. До внедрения в схему генератора теста система на кристалле должна быть разбита на подсхемы и для каждой подсхемы выбран определенный метод анализа и генерации тестов. Метод может быть использован на схемах, содержащих более 100000 – 1000000 вентилях, что позволит упростить разбиение схемы на подсхемы в случае использования технологий BIST, в то время как ранее представленные методы [4,8] дают недопустимые показатели наблюдаемости и, соответственно, тестопригодности уже на схемах, содержащих 20000 вентилях (TADATPG) и 243 логических вентилях (CAMELOT метод). 2. Метод может быть использован на всех стадиях проектирования – на системном (алгоритмическом) уровне, на уровне регистровых передач (послесинтезное структурное описание), на вентиляльном уровне описания устройства. 3. Предлагаемый метод имеет более распределенные значения в интервале  $[0;1]$ , по сравнению с ранее упомянутыми методами, что позволяет более адекватно выбирать точки контроля, по сравнению с ранее разработанными методами. 4. Аппаратурные затраты при использовании взвешенного теста составляют порядка 30-35%

от общего количества вентилях в схеме. В [4,6] описаны аппаратные затраты на путь сканирования – 60 – 110% (для комбинационных схем) и до 250% для последовательных схем. Анализ можно проводить как на досинтезной структуре, так и на устройстве, обработанном средствами синтеза (устройство может быть разложено до вентиляльного уровня, для которого и предполагается внедрение генератора взвешенных тестов).

**Список литературы:** 1. *IEEE Std 1149.1-2001, IEEE Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture.* New York. 2001. 208p. 2. *IEEE P1500/D11, Draft Standard Testability Method for Embedded Core-based Integrated Circuits,* New York. 2005. 138p. 3. *Stroud C.E. A Designer's Guide to Built-in Self-Test.* Kluwer Academic Publishers, 2002. 320 p. 4. *Kulak E.N., Kaminska M.O., Hassan Kteiman, Wade Ghribi.* Heuristic method of testability analysis for digital system testing by deterministic test // *Padioelectronics and informatic.* № 3. Kharkov. 2005. P. 113-119. 5. *Беннеттс Р. Дж.* Проектирование тестопригодных логических схем: Пер. с англ. М.: Радио и связь; 1990. 176 с. 6. *Gert Jervan, Petru Eles, Zebo Peng, Raimund Ubar, Maxim Jenihhin.* Hybrid BIST time minimization for Core-Based systems with STUMPS Architecture // *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Defect and Tolerance in VLSI Systems.* 2003. 4p. 7. *Gert Jervan, Petru Eles, Zebo Peng, Raimund Ubar, Maxim Jenihhin.* Test Time minimization for Hybrid BIST of Core-Based Systems // *Proceedings of the 12th Asian Test Symposium.* 2003. 4p. 8. *Richard Mundhen.* ASIC and FPGA Verification: A guide to Component Modeling // Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, United States of America. 9. *Кулак Э.Н., Каминская М.А.* Модификация цифровых схем с использованием метода анализа тестопригодности TADATPG (часть 2) // *Радиоэлектроника и информатика.* 2005. № 4. С. 60-68. 10. *Bennetts R.G., Maunder C. M., and Robinson G. D.* CAMELOT: A Computer-Aided Measure for Logic Testability. *IEEE Proc., Vol. 128, Part E,* No. 5, pp. 177-189, 1981. 11. *Каминская М.А., Кулак Э.Н.* Использование анализа тестопригодности для повышения качества теста и производительности встроенных средств самотестирования // *Вестник восточнoукраинского национального университета.* 2008. №12(130). С. 24-33.

*Поступила в редколлегию 11.06.2009*

**Кулак Эльвира Николаевна,** доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: тестопригодное проектирование цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. 70-21-326.

**Каминская Марина Александровна,** ассистент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: тестопригодное проектирование цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326.

**Константинова Юлия Константиновна,** студентка группы СКСм-08-1 факультета компьютерной инженерии и управления ХНУРЭ. Научные интересы: тестопригодное проектирование цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326.

УДК 681.325

*А.В. ДРОЗД*

## **НЕТРАДИЦИОННЫЙ ВЗГЛЯД НА РАБОЧЕЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Рассматриваются вопросы рабочего диагностирования вычислительных устройств. Показывается, что его развитие проходило под действием модели точных данных, которая определила цель, основное требование к методам, оценку их эффективности только для частного случая обработки точных данных. Рассматриваются особенности приближенных вычислений, которые указывают на необходимость пересмотра основных положений рабочего диагностирования. Анализ настоящей цели рабочего диагностирования выявил низкую достоверность традиционных методов при их использовании в условиях роста значимости обработки приближенных данных.

### **Введение**

Одним из наиболее устойчивых ранних стереотипов, добротнo закрепляемых школьным образованием, является негативное отношение к ошибке. Нас не только приучают к мысли, что ошибки следует исключать. Создается устойчивое убеждение, что это возможно.

Вместе с тем, ошибка является одной из основ нашего мира, вне которой этот мир просто не существует, не развивается и не познается.

Ошибка – это разница между абсолютной и относительной истинами, т. е. мир познается посредством ошибки, путем ее бесконечного преодоления.

Методом проб и ошибок происходит развитие мира. Например, в живой природе такой ошибкой является мутация, которая при определенных условиях закрепляется в ходе естественного отбора как основной путь дальнейшей эволюции. И нет другого способа развития мира, нежели путем искажения, т.е. ошибки.

Однако все это следует из невозможности самого существования вне ошибки.

Изготовление любого изделия предполагает соблюдение всех его характеристик в определенных пределах – допусках. Если изделие выполнено в пределах допусков, то оно имеет право на существование, а иначе отбраковывается. Все в этом мире существует в пределах допусков.

Право на ошибку – это право на существование в пределах допусков, которые составляют жизненное пространство существования. Если температура тела человека была бы задана в одной точке  $36,6^{\circ}\text{C}$  без права на какие-либо отклонения, то право человека на существование было бы сведено на нет. Таким образом, мир не существует вне ошибки.

Количественные оценки сущего – это числа с допуском, т.е. имеющие жизненное пространство, они являются приближенными данными – результатами измерений и их обработки. Таким образом, наш мир является миром приближенных данных, и все, что в нем находится, структурируется под его реалии. Поэтому доля обработки приближенных данных, т.е. данных «от Бога», постоянно растет и будет только возрастать. Это можно проследить на примере развития персональных компьютеров в части аппаратной поддержки арифметики с плавающей точкой, используемой для приближенных вычислений: от сопроцессоров необязательной поставки (Intel8087/287/387) до встроенных конвейеров FPU с плавающей точкой в составе Intel486, Pentium и т.д. [1].

Следует отметить, что человек живет в своем мире чисел, которые сводятся к точным данным.

Точные данные – целые по своей природе. К ним относятся только номера элементов множеств, которые естественно описывать порядковыми числительными.

Приближенные данные из Мира подменяются номерами. Например,  $36,6$  – это 366-е по значимости числовое значение из диапазона  $0 - 999$ .

Компьютерная техника поддерживает такое восприятие данных, поскольку представление информации двоичными или другими кодами, т.е. кодирование данных, является нумерацией.

Все, что можно записать в разрядную сетку компьютера, – точные данные, поскольку их значения можно поставить в соответствие порядковым номерам, т.е. пронумеровать. Например, в 3-битовой разрядной сетке могут быть записаны двоичные коды, значения которых  $0, 1, \dots, 7$  могут быть отождествлены с их номерами: от нулевого до седьмого. Это распространяется и на представление в компьютере приближенных данных в форматах с плавающей точкой, поскольку мантисса записывается в определенную разрядную сетку, и все ее значения могут быть пронумерованы.

Так, компьютерной техникой была закреплена сложившаяся к этому времени модель точных данных, которая состоит в том, что все числа, независимо от их настоящей природы, рассматриваются как точные данные.

Многие представления, в первую очередь связанные с компьютером, находятся в плену модели точных данных. Никто не объявлял эту модель, однако она ограничила развитие компьютера. Можно утверждать, что проектирование, диагностика и эксплуатация компьютера складывались и развиваются в настоящее время в рамках модели точных данных, иными словами, все или почти все в этих и других областях сделано только для случая точных данных, т.е. данных «не от Мира сего». Для снятия этого ограничения, как минимум, необходимо его осознать и признать.

Сегодня задачи, решаемые с использованием компьютерной техники, за редким исключением, не выявляют противоречия между моделью точных данных и приближенным характером обрабатываемых данных. Однако противоречие есть, и с нарастанием значимости обработки приближенных данных оно усиливается. Не преодолевая его, невозможно подняться над уровнем сегодняшних задач.

Насколько серьезны заблуждения, порождаемые моделью точных данных, можно проследить на примере развития рабочего диагностирования (РД) вычислительных устройств (ВУ). По сей день находятся вне обсуждения исторически сложившиеся ошибочно сформулированные основные понятия, включая цель РД, ряд «неоспоримых» догм, оценки эффективности методов, оставляющие РД в рамках действия модели точных данных.

### 1. Из истории рабочего диагностирования

Рабочее диагностирование ВУ имеет много названий, и принято считать, что оно заключается в контроле правильности работы ВУ (его цифровой схемы) на рабочих воздействиях, т.е. в процессе использования по назначению [2]. Такой контроль осуществляет обнаружение ошибок одновременно с работой ВУ (concurrent checking [3], concurrent error detection [4]), дает оперативную оценку его технического состояния и потому называется также оперативным (on-line testing) [5]. Условия его выполнения подразумевают аппаратную реализацию и неразрывную связь с контролируемым ВУ, за что данный контроль называют также аппаратным [6], аппаратным или оперативным аппаратным [7] в отличие от программного и встроенным в противоположность выносному контролю. По отношению к тестовому диагностированию основным отличительным признаком РД является характер входных воздействий: РД осуществляется на рабочих входных воздействиях, а для тестового диагностирования на вход ВУ поступают тесты. Рабочее диагностирование называют также функциональным, подчеркивая, что оно выполняется в процессе функционирования ВУ, т.е. на фактических данных [8].

Изначально РД заимствовало методы и средства из теории и практики связи для передачи сообщений на расстояния. В условиях помех эфира сообщения необходимо кодировать, используя избыточные коды (обнаруживающие ошибки в сообщении и корректирующие для восстановления искаженного сообщения). Передатчик сообщений включает в себя функции кодирующего устройства – кодера, а приемник – декодирующего устройства, т.е. декодера.

Пусть, например, передаваемые сообщения используют алфавит из 8 букв (8, а не 33 взято для упрощения примера). Пронумеруем буквы двоичными кодами от  $000_2$  до  $111_2$ . Для их избыточного описания используем групповой код [9], порождающая матрица которого имеет вид, показанный в табл. 1.

Групповой код (табл. 2) содержит нулевое слово 0, слова порождающей матрицы 1, 2 и 4, а также слова 3, 5, 6 и 7, которые получаются при выполнении операции сложения по модулю 2 над словами порождающей матрицы. Так, слово 3 получается суммой по модулю 2 слов 1 и 2. Слово содержит информационные и проверочные разряды. Информационные разряды 1, 2 и 3 описывают букву сообщения. Проверочные разряды 4, 5 и 6 делают код буквы избыточным. Если в принятом сообщении все слова принадлежат групповому коду, то это сообщение считается правильным.

Принадлежность слова групповому коду может быть проверена с помощью уравнения линейного синдрома. Такие уравнения составляются для каждого проверочного разряда путем его определения в виде суммы по модулю 2 информационных разрядов порождающей матрицы. Для рассматриваемого группового кода уравнения имеют следующий вид:

$$4 = 2 \oplus 3;$$

$$5 = 1 \oplus 3;$$

$$6 = 1 \oplus 2.$$

Слово принадлежит групповому коду, т.е. является кодовым, если справедливы все уравнения линейного синдрома. В противном случае обнаруживается ошибка.

По уравнениям строится декодер – схема контроля (СК), выполненная на сумматорах по модулю 2, элементе ИЛИ и формирующая сигнал контроля Е (рис. 1).

Таблица 1  
Порождающая матрица

№	Разряды					
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1	0
2	0	1	0	1	0	1
4	1	0	0	0	1	1

Таблица 2  
Групповой код

№	Разряды					
	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	0
2	0	1	0	1	0	1
3	0	1	1	0	1	1
4	1	0	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1
6	1	1	0	1	1	0
7	1	1	1	0	0	0

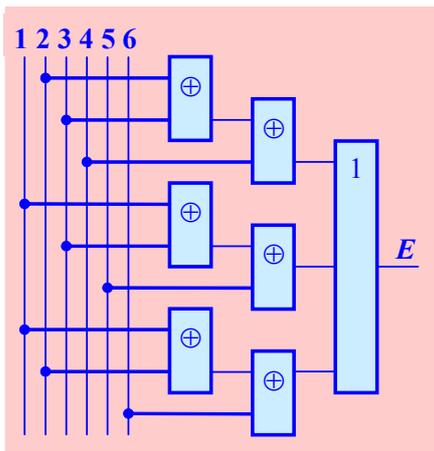


Рис. 1. Схема контроля

Схема является самотестируемой для множества неисправностей  $F$ , если для каждой из них на выходе схемы вычисляется некодовое слово хотя бы для одного входного кодового слова.

Схема является полностью самопроверяемой, если защищена и самотестируема.

Пусть пары кодовых слов отличаются на кодовое расстояние  $d$ , т.е. в  $d$  разрядах.

Если неисправность вызывает ошибку в  $t$  разрядах и  $t < d$ , то схема является защищенной, поскольку вычисляет на выходе некодовое слово. Кодовое расстояние  $d$  обеспечивается введением проверочных разрядов. Поэтому защищенность схемы определяет информационную избыточность, необходимую для обнаружения одной неисправности по первой ошибке.

Самотестируемость схемы направлена на создание условия для обнаружения первой неисправности до возникновения второй. Условие предполагает, что в интервале времени между этими неисправностями появятся все входные кодовые слова. Это возможно при редком появлении неисправностей и работе схемы на высокой частоте, т.е. при высокой надежности и производительности ВУ, что уже было достигнуто к концу 60-х годов.

Схема на рис. 1 не является самотестируемой для множества одиночных константных неисправностей.

Действительно, неисправность «0» на выходе схемы определяет нулевое слово  $E = 0$  для всех входных кодовых слов. Неисправность «0» на входах элемента ИЛИ также делает схему несамотестируемой и несопроверяемой.

Для получения самопроверяемой схемы (рис. 2) разряды 4, 5 и 6 дополняются инверсными разрядами  $\bar{4}$ ,  $\bar{5}$  и  $\bar{6}$ . Вводятся также узлы Картера (УС), преобразующие две пары разрядов  $X1 = \bar{X}2$  и  $Y1 = \bar{Y}2$  в одну такую пару  $F1 = \bar{F}2$ .

На выходе СК вычисляет двухразрядный код  $E\{1, 2\}$ . В случае обнаружения ошибки  $E\{1\} = E\{2\}$ , а иначе  $E\{1\} = \bar{E}\{2\}$ .

В следующих десятилетиях и по настоящее время основное развитие РД шло по пути разработки самопроверяемых схем.

Используя контроль по паритету, по модулю и другие методы, самопроверяемые схемы были разработаны для комбинационных схем [12], синхронных и асинхронных автоматов [13], а также сумматоров, умножителей, делителей, АЛУ и т.д. [14].

Теория самопроверяемых схем сыграла важную роль, определив понятия РД, по которым

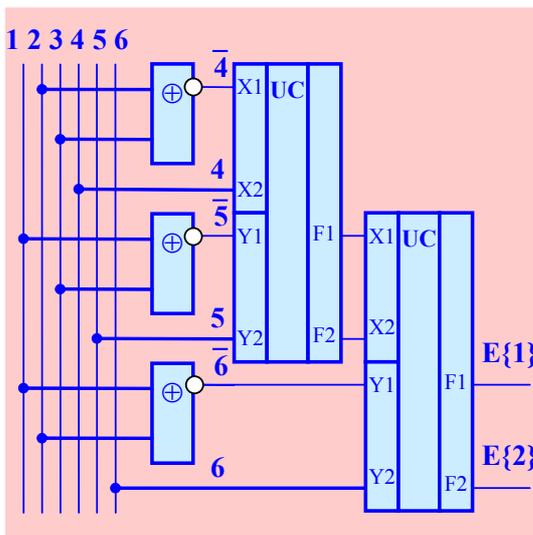


Рис. 2. Самопроверяемая схема

происходит его развитие по сей день. Были сформулированы цель РД, основное требование к его методам и др., что, однако, пришло время обсудить.

## 2. Догмы рабочего диагностирования

Определения самопроверяемых схем зафиксировали ряд сложившихся к этому времени догм, которые кажутся неоспоримыми по сей день:

- Цель РД – оценка исправности схемы путем обнаружения ее неисправностей.
- Основное требование, предъявляемое к методам РД, – обнаружение неисправности схемы по первой ошибке.

- Исправная схема вычисляет только достоверные результаты, а недостоверные результаты вычисляются только неисправной схемой.

Вместе с тем, объявленная цель, которая должна достигаться в процессе вычислений:

- противоречит здравому смыслу;
- опровергается практикой;
- недостижима для самопроверяемых схем.

Действительно, уподобим вычислительный процесс полету самолета. Поиск неисправностей в процессе полета немало удивил бы пассажиров. Уж если задаться целью обнаружить неисправность, то для этого лучший способ – создание критических условий! Например, фигуры высшего пилотажа, а для схемы – колебания питания, вибрация и т.п. Конечно же, цель состоит в другом – долететь, дорешать вычислительную задачу, которая состоит в выполнении определенного объема вычислений за заданное время с получением достоверных результатов. При ограниченной надежности средств решения задачи часть результатов может быть недостоверна. Для их выявления и необходимо РД. А обнаруживать неисправности следует до начала работы методами тестового диагностирования.

Неисправную схему можно представить минным полем.

Неисправность – мина.

Тесты – саперы, которые выявляют мину до начала вычислений.

Фактические данные – хлебопашцы, ради которых «разминируется» схема. Поиск неисправностей на фактических данных противоречит здравому смыслу, также как поиск мин в процессе земледелия.

Ошибки вызываются сбоями и отказами.

Сбой возникает намного чаще, чем отказ. Поэтому, как правило, первая обнаруживаемая ошибка вызывается сбоем. Сбой действует короткий период времени, после чего схема снова исправна. Поэтому обнаружение сбоя далее не подтверждается. Из этого следует, что, на практике, первая ошибка обнаруживается не в целях оценки исправности схемы, а для ответа на вопрос: «Можно ли использовать вычисленный результат или он недостоверен и требует пересчета?».

Более того, по первой ошибке нельзя судить о неисправности самопроверяемой схемы и в случае отказа, поскольку его невозможно идентифицировать по одной ошибке (то ли одиночной в случае сбоя, то ли первой из серии ошибок, генерируемых отказом).

Настоящая цель РД – оценка достоверности вычисляемого результата.

Следует отметить, что, согласно объявленной цели, напротив, оценка результата служит для определения исправности самопроверяемой схемы, т.е. цель и средства поменяны местами.

Когда у РД оказываются две цели, возникают естественные вопросы:

- 1) Почему объявлена ненастоящая цель? Кто виноват?
- 2) В какой степени различаются объявленная и настоящая цели?

Виновником заблуждений является модель точных данных. Никто не объявлял эту модель, но она определила:

- логику, положенную в основу теории самопроверяемых схем;
- цель РД;
- основное требование к методам РД;
- развитие РД.

Логика, на которой основывается теория самопроверяемых схем, состоит в том, чтобы вычислять достоверные результаты только на исправной схеме. Это следует из догмы о получении достоверных результатов на исправной схеме, а недостоверных – на неисправ-

ной. Однако эта догма, как это будет показано ниже, справедлива только для точных данных.

Точное данное становится недостоверным при любом его искажении. Поэтому обнаруженная ошибка одновременно указывает и на неисправность схемы, и на недостоверность точного результата. Это отождествляет объявленную и настоящую цели для случая точных данных, где поиск неисправностей позволяет оценивать достоверность результата.

Основное требование к методам РД – обнаруживать первую ошибку – исходит из того, что каждая ошибка делает результат недостоверным, что справедливо только для точных данных.

Таким образом, можно утверждать, что РД разработано только для частного случая обработки точных данных.

### 3. Особенности обработки приближенных данных

Как влияет на РД приближенный характер обрабатываемых данных? Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть особенности обработки приближенных данных.

Первой особенностью является использование операции умножения в записи приближенного данного в наиболее распространенной нормальной форме, например, в форматах с плавающей точкой число записывается в виде произведения  $m \cdot q^p$ , где  $m$  – мантисса,  $q$  – основание системы счисления,  $p$  – показатель степени [15]. Произведение двух операндов удваивает длину результата двуместной операции. Согласно теории ошибок, количество верных разрядов результата не превышает количество верных разрядов операнда. Поэтому наиболее распространены форматы одинарной точности, для которых младшая половина вычисленного результата отбрасывается.

Второй особенностью обработки приближенных данных является нарушение ассоциативного закона. Рассмотрим сложение миллиона с миллионом единиц, используя двуместные операции и разрядную сетку длиной  $n < 20$ . Сумма миллиона и единицы равна миллиону, поскольку единица теряется при выравнивании порядков. Миллион таких операций также определяет результат, равный первому числу, т.е. одному миллиону. Правильный результат – два миллиона – можно получить, изменив порядок вычислений. Сначала следует сложить пары единиц, затем полученные двойки и так продолжать до вычисления миллиона, который далее складывается с первым числом.

Вычисление одного миллиона вместо двух показывает несостоятельность догмы, утверждающей, что исправная схема вычисляет достоверный результат.

Третьей особенностью является выравнивание порядков, которое выполняется в наиболее часто используемых операциях сложения.

Приближенный результат содержит старшие верные и младшие неверные разряды [16].

*Определение.* Ошибка, вызванная неисправностью вычислительной схемы, является существенной, если снижает количество верных разрядов результата, и несущественной в противном случае.

Особенности обработки приближенных данных определяют факторы, снижающие долю существенных ошибок.

Первая особенность приводит к исключению **несущественных** ошибок, возникающих в отбрасываемой половине вычисляемого результата. Первый фактор определяет долю оставляемых ошибок по формуле  $K_1 = n / n_c$ , где  $n$  и  $n_c$  – количество оставляемых и вычисляемых разрядов результата.  $K_1 = 0,5$  для  $n_c = 2n$ , т.е. половина всех ошибок относится к несущественным.

Для восстановления действия ассоциативного закона используются расширенные форматы, удлиненные за счет младших неверных разрядов, что приводит к увеличению доли несущественных ошибок. Второй фактор определяет долю существенных ошибок в расширенном формате по формуле  $K_2 = n_E / n$ , где  $n_E$  и  $n$  – количества разрядов мантиссы в базовом и расширенном форматах. В форматах с плавающей точкой разрядность мантиссы увеличивается в 2,7 раза с 24 бит в одинарном формате до 64 бит в двойном расширенном формате [15], что определяет  $K_2 = 0,37$ .

При выравнивании порядков мантисса числа с меньшим порядком сдвигается вправо с потерей младших разрядов. При этом исключаются из вычислений младшие разряды результатов всех предшествующих операций. Ошибки в этих разрядах, перешедших из

верных в неверные, становятся несущественными. Третий фактор  $K_3$  можно оценить по формуле  $K_3 = 1 - 0,25 O_C / O_O$ , где  $O_C$  – количество оборудования узлов ВУ, предшествующих сдвигу мантииссы;  $O_O$  – общее количество оборудования ВУ [17].

В случае нескольких операций  $K_3$  определяется как произведение факторов каждой из них.

Перечисленные факторы можно рассматривать как действующие независимо. Поэтому вероятность того, что ошибка является существенной, можно оценить долей существенных ошибок в общем количестве ошибок по формуле  $P_C = K_1 K_2 K_3$ , которая показывает, что  $P_C \ll 1$ , и существенные ошибки значительно менее вероятны, чем несущественные [17].

#### 4. Достоверность методов рабочего диагностирования

Различие объявленной и настоящей цели можно проследить по тому, как они определяют достоверность методов РД. Для этого рассмотрим квадрат с единичной длиной сторон и, соответственно, единичной площадью (рис. 3).

	$P_C$	$P_H = 1 - P_C$
$P_O$	$P_{OC} = P_O P_C$ 1	$P_{OH} = P_O P_H$ 2
$P_{\Pi} = 1 - P_O$	$P_{\Pi C} = P_{\Pi} P_C$ 3	$P_{\Pi H} = P_{\Pi} P_H$ 4

	$P_C$
$P_O$	$P_{OC}$ 1
$P_{\Pi}$	$P_{\Pi C}$ 3

Рис. 3. Вероятности обнаружения и пропуска ошибок

Рис. 4. Случай точных данных

На горизонтальной стороне квадрата откладываются вероятности  $P_C$  и  $P_H = 1 - P_C$  того, что возникшая ошибка является существенной и несущественной, а на вертикальной стороне – вероятности  $P_O$  и  $P_{\Pi} = 1 - P_O$  ее обнаружения и пропуска. При этом квадрат разбивается на четыре части, определяющие вероятности  $P_{OC}$  и  $P_{OH}$  обнаружения существенных и несущественных ошибок, а также вероятности  $P_{\Pi C}$  и  $P_{\Pi H}$  их пропуска, для которых выполняется соотношение

$$P_{OC} + P_{OH} + P_{\Pi C} + P_{\Pi H} = 1,$$

где  $P_{OC} = P_O P_C$ ;  $P_{OH} = P_O P_H = P_O (1 - P_C)$ ;  $P_{\Pi C} = P_{\Pi} P_C = (1 - P_O) P_C$ ;  $P_{\Pi H} = P_{\Pi} P_H = (1 - P_O) (1 - P_C)$ .

Согласно объявленной цели, метод РД является достоверным, если обнаруживается неисправность, независимо от того, является ли вызванная ею ошибка существенной или нет. Это определяет показатель достоверности метода РД как сумму частей 1 и 2 квадрата по следующей формуле:

$$D_O = P_{OC} + P_{OH}.$$

Согласно настоящей цели, метод РД является достоверным, если правильно оценивает вычисляемый результат: достоверный результат определяет достоверным, а недостоверный результат – недостоверным. Оценка достоверности результата производится путем обнаружения или пропуска ошибки, а действительным признаком достоверного или недостоверного результата является отсутствие или наличие существенной ошибки.

В части 1 квадрата метод РД обнаруживает существенную ошибку, справедливо определяя результат недостоверным. В части 2 квадрата обнаруживается несущественная ошибка, что приводит к отбраковке достоверного результата – метод РД дает ошибочную оценку результата. Часть 3 квадрата также указывает на ошибку метода РД, поскольку пропущена существенная ошибка, и недостоверный результат не выявлен. В части 4 квадрата метод РД игнорирует несущественную ошибку, справедливо подтверждая достоверность вычисляемого результата. Поэтому показатель достоверности метода РД складывается из частей 1 и 4 квадрата и определяется по следующей формуле:

$$D = P_{OC} + P_{\Pi H}.$$

Объявленная и настоящая цели различаются в оценке достоверности метода РД: показатели достоверности  $D_0$  и  $D$  отличаются друг от друга на части 2 и 4 квадрата.

Каковы размеры различающих частей квадрата?

Для ответа на этот вопрос следует принять во внимание высокую вероятность обнаружения ошибок, достигнутую в современных методах РД, т.е.  $P_0 \gg P_{\Pi}$ .

В случае точных данных вероятность  $P_C = 1$ , поскольку все ошибки являются существенными. Из этого следует, что  $P_{OH} = P_0 (1 - P_C) = 0$  и  $P_{\Pi H} = (1 - P_0) (1 - P_C) = 0$ . Иными словами, для случая точных данных части 2 и 4 исключаются из квадрата, как это показано на рис. 4, а показатели достоверности  $D_0$  и  $D$ , описываемые частью 1 квадрата, совпадают и являются высокими. Это еще раз свидетельствует о том, что РД разработано для частного случая обработки точных данных и в этих рамках обеспечивает высокую эффективность.

Для общего случая необходимо учесть соотношение  $P_C \ll P_H$ , присущее обработке приближенных данных.

На рис. 5 показана реальная картина разбиения квадрата на части. Размеры части 1 квадрата значительно сокращаются вследствие малого значения вероятности  $P_C$ , а часть 2, напротив, увеличивает свои размеры и становится основной частью квадрата, описывая совершенно новое качество методов РД отбраковывать достоверные результаты при обнаружении несущественных ошибок.

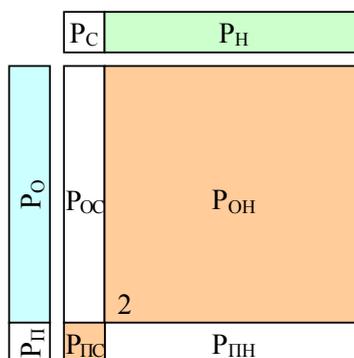


Рис. 5. Реальная оценка обнаружения и пропуска ошибок

Ранее, т.е. в рамках действия модели точных данных, достоверные результаты вычислений могли быть отбракованы только при условии, что ошибка находится в контрольных кодах и вызвана неисправностью средств контроля (ошибка второго рода). Сам метод РД не мог отбраковать достоверный результат по причине отсутствия несущественных ошибок в результате обработки точных данных.

Реальная оценка вероятностей обнаружения и пропуска существенных и несущественных ошибок позволяет сделать следующие выводы:

- объявленная и настоящая цели РД различаются на самую большую часть 2 квадрата, которая практически совпадает с самим квадратом, т.е. для приближенных данных цели становятся диаметрально противоположными;
- показатель достоверности методов РД является высоким в рамках объявленной цели и низким для настоящей цели.

Анализируя квадрат, можно предложить три пути повышения достоверности  $D$  методов РД [18]:

- увеличить часть 1 квадрата, повышая вероятность  $P_C$  (рис. 6);
- увеличить часть 4 квадрата, снижая вероятность  $P_0$  (рис. 7);
- увеличить части 1 и 4 квадрата, делая вероятность  $P_0$  различной для обнаружения существенных ( $P_{0-C}$ ) и несущественных ошибок ( $P_{0-H}$ ),  $P_{0-C} > P_{0-H}$  (рис. 8).

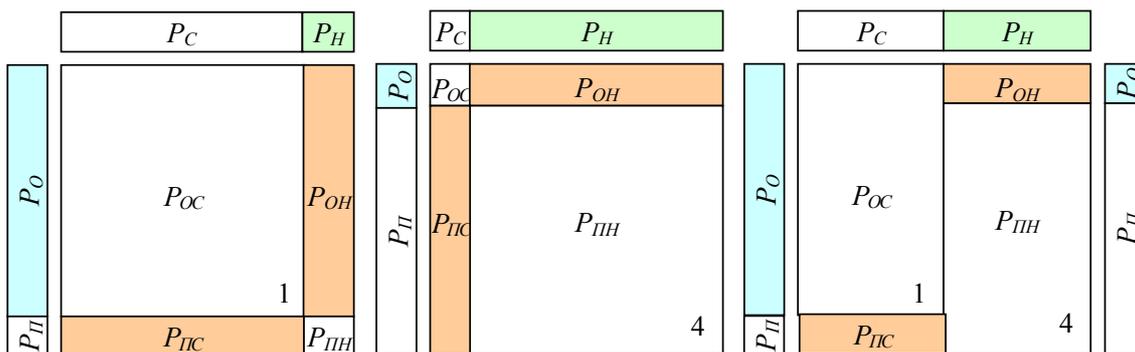


Рис. 6. Первый путь повышения D

Рис. 7. Второй путь повышения D

Рис. 8. Третий путь повышения D

### Заключение

В табл. 3 взгляд на РД, сложившийся под действием модели точных данных, сравнивается с реальностью.

Таблица 3  
Различные взгляды на РД

Под влиянием модели	Реальность
Рабочее диагностирование (РД) разработано для всех типов данных	Рабочее диагностирование разработано только для случая точных данных
Цель РД – оценка исправности схемы	Цель РД – оценка достоверности результата
Все обрабатываемые числа рассматриваются как точные данные	В большинстве случаев обрабатываемые числа – приближенные данные
Все ошибки являются существенными	Большинство ошибок относится к несущественным
Традиционные методы РД имеют высокую достоверность, обнаруживая почти все ошибки и неисправности	Традиционные методы РД имеют низкую достоверность контроля результата, в основном обнаруживая несущественные ошибки

Осталось выяснить последнюю серию вопросов: «Почему наши заблуждения нам прощаются, и как долго это будет происходить?».

Человечество уже вступило в эру принятия ответственных решений, и от способности просчитывать их последствия зависит, насколько долго она продлится. Защищенность общества определяется умением решать задачи на пределе возможностей, что требует создания своей теории и реализаций на практике.

Методы РД демонстрируют достоверность контроля результатов на уже происшедшей ошибке, поэтому влияние достоверности на решение вычислительных задач зависит от вероятности появления ошибок.

Сегодняшние вычислительные задачи решаются в условиях низкой вероятности появления ошибок, поэтому показанная в работе низкая достоверность традиционных методов РД, отбраковка достоверных результатов, выполняемая почти по каждой ошибке, остается незамеченной.

При решении вычислительной задачи на пределе возможностей ограничением степени распараллеливания вычислений является сложность средств решения задачи, а ограничением сложности – их надежность. Таким образом, решение сложных задач происходит в условиях плотного потока неисправностей, что приводит к значительной доле результатов, посчитанных с ошибками. Пересчет ошибочных результатов может существенно удлинить время решения задачи, исключая саму возможность ее решения в реальном масштабе времени.

Несущественные ошибки и обеспечение высокой вероятности их пропуска составляют важную предпосылку для решения сложной задачи, поскольку большинство результатов, посчитанных под действием проявившихся в виде ошибки неисправностей, являются достоверными. Однако для реализации этой предпосылки необходимо высвободить методы РД из «плена» модели точных данных. Следует разрабатывать методы РД, которые признают за числом его право на существование в пределах допусков, т.е. право оставить-

ся достоверным при возникновении несущественных ошибок. Методы РД должны уметь различать существенные и несущественные ошибки результатов обработки приближенных данных.

Если без ошибок существование невозможно, то ошибку необходимо сделать союзником, и использовать жизненное пространство, предоставляемое ею числу, для расширения возможностей решать сложные задачи.

**Список литературы:** 1. Гук М. Процессоры Intel: от 8086 до Pentium II. СПб: Питер, 1997. 224 с. 2. Гуляев В. А., Макаров С. М., Новиков В. С. Диагностика вычислительных машин. К.: Техника, 1981. 167 с. 3. Metra C., Favalli M. and Ricco B. Concurrent Checking of clock signal correctness // IEEE Design & Test October 1998. P. 42 – 48. 4. Touba N. A. and McCluskey E. J. Logic synthesis techniques for reduced area implementation of multilevel circuits with concurrent error detection // Proc. IEEE Inf. Conf. on Computer Aided Design. 1994. P. 651 – 654. 5. Metra C., Schiano L., Favalli M and Ricco B. Self-checking scheme for the on-line testing of power supply noise // Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf. Paris (France). 2002. P. 832 – 836. 6. Nicolaidis M. and Zorian Y. On-line testing for VLSI – a compendium of approaches // Electronic Testing: Theory and Application (JETTA). 1998. V. 12. P. 7 – 20. 7. Журавлев Ю. П., Котелюк Л. А., Циклинский Н. И. Надежность и контроль ЭВМ. М.: Сов. радио, 1978. 416 с. 8. Основы технической диагностики / В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян, В. Ф. Халчев. М.: Энергия, 1976. 464 с. 9. Кузьмин И.В., Кедров В.А. Основы теории информации и кодирования. 2-е изд. Киев: Вища шк., 1986. 238 с. 10. Carter W., Schneider P. Design of Dynamically Checked Computers // Proc. IFIP Congress 68. Edinburgh (Scotland). 1968. P. 878 – 883. 11. Anderson D. A., Metze G. Design of totally self-checking check circuits for m-out-of-n codes // IEEE Trans. Comput. 1977. V. C – 22, N 3. P. 263 – 269. 12. Smith J. E. and Metze G. The design of totally self-checking combinational circuits // in Proc. Int. Symposium on Fault Tolerant Computing Dig. – Los Angeles (USA). 1977. P. 130 – 134. 13. Ozguner F. Design of totally self-checking asynchronous and synchronous sequential machines // in Proc. Int. Symposium on Fault Tolerant Computing Dig. Los Angeles, USA. 1977. P. 124 – 129. 14. Nicolaidis M., Bedder H. Efficient Implementation of Self-checking Multiply and Divide Arrays // in Proc. 1994 European Design and Test Conf. – Paris, France. 1994. P. 134 – 137. 15. ANSI/IEEE Std 754-1985. IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic. IEEE, New York, USA, 1985. 18 p. 16. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз, 1966. 664 с. 17. Drozd A. On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing // Radioelectronics & Informatics. 2003. № 3. P. 113 – 116. 18. Drozd A., Lobachev M., Drozd J. The problem of on-line testing methods in approximate data processing // Proc. 12<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Symposium, Como, Italy. 2006. P. 251 – 256.

Поступила в редколлегию 07.06.2009

**Дрозд Александр Валентинович**, д-р. техн. наук, профессор Одесского национального политехнического университета. Научные интересы: техническая диагностика, отказоустойчивые вычислительные устройства проектирования. Адрес: Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА R-ФУНКЦИЙ К РАСЧЕТУ ТЕЧЕНИЙ В КАНАВКЕ ПОДШИПНИКА**

Рассматривается применение метода R-функций для решения задачи расчета плоско-го стационарного течения вязкой жидкости в канавке подшипника. Вычислительный эксперимент был проведен для единичного квадрата, полученные результаты сравнены с решениями, полученными другими авторами.

### **Введение**

*Актуальность задачи.* В настоящее время общая область численного моделирования физических процессов, равно как и частный ее раздел – вычислительная гидродинамика – быстро развиваются. Возникнув как ответвление вычислительной математики и теоретической гидромеханики, вычислительная гидродинамика прошла большой и плодотворный путь и к настоящему времени оформилась как обособленный раздел науки, предметом которого является численное моделирование различных течений жидкости и газа и решение возникающих при этом задач при помощи методов, основанных на использовании вычислительной техники. Этот раздел науки, имеющий большое прикладное значение, продолжает свое интенсивное развитие.

Современная вычислительная гидродинамика занимается такими направлениями, как расчет движений вязкой жидкости, численное исследование течений газа с физико-химическими превращениями, изучение распространения ударных волн в различных средах, решение газодинамических задач при наличии излучения и т. д.

В данной работе рассматривается одна из проблем – численное моделирование конвективного течения вязкой несжимаемой жидкости, которое описывается уравнением Навье-Стокса.

Уравнения Навье-Стокса – это система нелинейных уравнений, и построение точных решений является трудновыполнимой, а чаще всего невыполнимой задачей. Обычно точные решения удается получить для простых областей за счет специальным образом подобранной системы координат. В большинстве же своем задачу для уравнений Навье-Стокса приходится решать численно. Будем рассматривать плоские стационарные задачи.

Уравнение Навье-Стокса обычно решают с помощью конечно-разностных (метод сеток) и приближенных аналитических (методы Галеркина, наименьших квадратов и т.д.) методов. Их недостатком является замена сложной области простой приближенной областью. Не свободен от этого недостатка и метод конечных элементов (МКЭ) – один из наиболее употребляемых и эффективных численных методов в механике жидкости. В МКЭ криволинейные участки границы заменяются линейными и при расчете различных сложных конструкций (течения в соплах, форсунках и пр.) приходится измельчать сетку вблизи границы, строить специальные алгоритмы триангуляции и т.п. При построении систем метода конечных элементов обычно применяют либо формулировку метода Галеркина, либо какой-то вариационный принцип. При этом приходится решать нелинейную систему.

Свободным от этого недостатка является метод R-функций, разрабатываемый школой акад. НАН Украины Рвачева В.Л. Благодаря использованию функций непрерывных аргументов, обладающих свойствами булевых функций, удается строить пучки функций (структуры решений), точно учитывающие геометрию области и краевые условия задачи.

*Цели и задачи исследования.* Целью данной работы является создание эффективного метода математического моделирования течения вязкой жидкости (масла) в канавке подшипника. Для достижения цели решаются следующие задачи: разработка и обоснование метода расчета течения вязкой жидкости в канавке подшипника; применение разработанного численного метода для решения модельной задачи расчета течения жидкости в канавке подшипника.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим схему течения, показанную на рис. 1. Вращающийся вал опирается на подшипник. Тонкий кольцевой зазор между подшипником и валом заполнен смазочным маслом, которое подается в канавку подшипника через отверстие в ее основании. Вал и подшипник обычно имеют одинаковую и равномерно распределенную температуру, а масло имеет более низкую температуру.

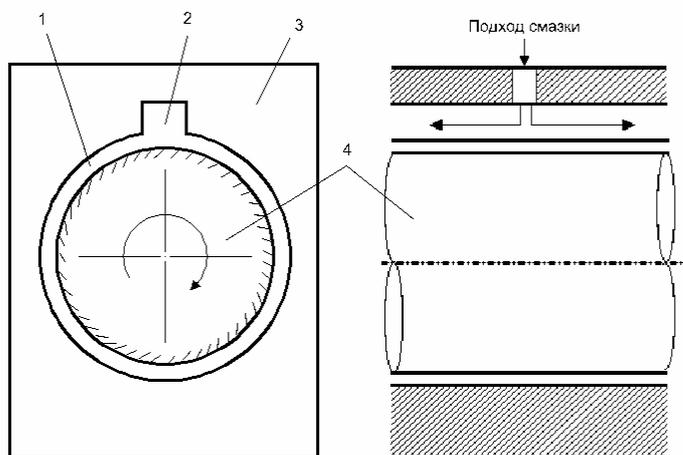


Рис. 1. Схема течения в канавке подшипника: 1 – смазка, 2 – канавка, 3 – подшипник, 4 – вал

При постановке математической задачи делаются следующие допущения:

1. Размеры канавки гораздо меньше диаметра вала, в связи с чем в рассматриваемой области применима декартова система координат.

2. Скорость течения жидкости вдоль канавки настолько мала, что не влияет на структуру решения в поперечном направлении.

3. Ядро холодного масла, медленно текущего вдоль канавки, можно моделировать, задавая низкую постоянную температуру в соответствующей области ядра течения.

Течение масла в канавке подшипника описывается с помощью краевой задачи для системы дифференциальных уравнений относительно функции тока  $\psi(x, y)$  и температуры  $T(x, y)$  вида (приближение Буссинеска):

$$\Delta^2 \psi = \text{Re} J(\Delta \psi, \psi) + \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial x} + \text{Re} F(x, y) \text{ в } \Omega, \quad (1)$$

$$\Delta T = \text{Pe} J(T, \psi) + \text{Pe} G(x, y) \text{ в } \Omega, \quad (2)$$

$$\psi|_{\partial\Omega} = \tilde{f}(s), \quad \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\partial\Omega} = \tilde{g}(s), \quad s \in \partial\Omega, \quad (3)$$

$$T|_{\partial\Omega} = \tilde{h}(s), \quad s \in \partial\Omega. \quad (4)$$

Здесь  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\text{Gr}$  – число Грасгофа;  $\text{Pe}$  – число Пекле;  $G(x, y)$  – объемная плотность тепловых источников;  $\tilde{h}(s)$  – распределение температуры на границе;

$F(x, y) = \frac{\partial f_x}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial x}$  – ротор вектора внешних сил  $(f_x, f_y)$ ;  $\frac{d\tilde{f}}{ds}$ ,  $\tilde{g}$  – некоторые распределения нормальной и касательной составляющих скорости потока соответственно;

$J(\Delta \psi, \psi) = \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial x}$ ;  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к  $\partial\Omega$ . Предполагаем, что

$F, G \in L_2(\Omega)$ ,  $\tilde{f} \in W_2^1(\partial\Omega)$ ,  $\tilde{g}, \tilde{h} \in L_2(\partial\Omega)$ , система координат выбрана так, что сила тяжести сонаправлена с вектором  $(0, -1)$ .

## 2. Выбор и обоснование метода решения

Система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, описывающая течение масла в канавке подшипника, относительно функции тока  $\psi(x, y)$  и температуры  $T(x, y)$  (приближение Буссинеска) имеет вид:

$$\Delta^2 \psi = \text{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Delta \psi \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Delta \psi \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] + \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial x} \text{ в } \Omega, \quad (5)$$

$$\Delta T = \text{Pe} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] \text{ в } \Omega, \quad (6)$$

$$\psi|_{\partial\Omega} = \tilde{f}(s), \quad \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = \tilde{g}(s), \quad s \in \partial\Omega, \quad (7)$$

$$T|_{\partial\Omega} = \tilde{h}(s), \quad s \in \partial\Omega. \quad (8)$$

Обозначим через  $(u_0, v_0)$  решение следующей задачи:

$$\Delta^2 u_0 = \text{Gr} \frac{\partial v_0}{\partial x} \text{ в } \Omega, \quad (9)$$

$$-\Delta v_0 = 0 \text{ в } \Omega, \quad (10)$$

$$u_0|_{\partial\Omega} = \tilde{f}(s), \quad \frac{\partial u_0}{\partial \mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = \tilde{g}(s), \quad s \in \partial\Omega, \quad (11)$$

$$v_0|_{\partial\Omega} = \tilde{h}(s), \quad s \in \partial\Omega. \quad (12)$$

В задаче (5)-(8) сделаем замену:

$$\psi = u_0 + u, \quad (13)$$

$$T = v_0 + v, \quad (14)$$

где  $u, v$  – новые неизвестные функции. Это приводит к задаче

$$\Delta^2 u = \text{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] + \text{Gr} \frac{\partial v}{\partial x} \text{ в } \Omega, \quad (15)$$

$$-\Delta v = -\text{Pe} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] \text{ в } \Omega, \quad (16)$$

$$u|_{\partial\Omega} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (17)$$

$$v|_{\partial\Omega} = 0. \quad (18)$$

При замене учитывались условия (9) – (12).

В нашем случае краевые условия имеют вид:

$$\tilde{f}(s) = \begin{cases} 0.5, & \partial\Omega \setminus \{y=0\}, \\ 0, & y=0. \end{cases}$$

$$\tilde{g}(s) = \begin{cases} 0, & \partial\Omega \setminus \{y=0\}, \\ -1, & y=0. \end{cases} \quad (19)$$

$$\tilde{h}(s) = 1 \text{ на } \partial\Omega.$$

Структура решения задачи (9) – (12) имеет вид:

$$u_0 = f - \omega(D_1 f + g) + \omega^2 \Phi_0, \quad (20)$$

$$v_0 = h + \omega Y_0, \quad (21)$$

где  $D_1 = \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y}$ .

Здесь  $f = EC\tilde{f}(s)$ ,  $g = EC\tilde{g}(s)$ ,  $h = EC\tilde{h}(s)$ , тогда

$$f = \frac{0,5y}{y + x(1-x)(1-y)},$$

$$g = \frac{-x(1-x)(1-y)}{y + x(1-x)(1-y)}. \quad (22)$$

$$h = 1.$$

В структуре решения (20) обозначим

$$\varphi = f - \omega(D_1 f + g), \quad \alpha = \omega^2 \Phi_0, \quad (23)$$

$$\beta = \omega Y_0, \quad (24)$$

тогда  $u_0 = \varphi + \alpha$ ,  $v_0 = h + \beta$ . Подставим эти обозначения в (9) – (12):

$$\Delta^2 \varphi + \Delta^2 \alpha = \text{Gr} \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \beta}{\partial x} \right) \text{ в } \Omega, \quad (25)$$

$$\Delta h + \Delta \beta = 0 \text{ в } \Omega, \quad (26)$$

$$\alpha|_{\partial\Omega} = 0, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\partial\Omega} = 0, \quad (27)$$

$$\beta|_{\partial\Omega} = 0. \quad (28)$$

Так как в (26)  $h = 1$ , то (25) – (28) примет вид:

$$\Delta^2 \alpha = \text{Gr} \frac{\partial \beta}{\partial x} - \Delta^2 \varphi \text{ в } \Omega, \quad (29)$$

$$-\Delta \beta = 0 \text{ в } \Omega, \quad (30)$$

$$\alpha|_{\partial\Omega} = 0, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\partial\Omega} = 0, \quad (31)$$

$$\beta|_{\partial\Omega} = 0. \quad (32)$$

Из (30) и (32) получаем, что  $\beta \equiv 0$ , тогда задача (29) – (30) примет вид:

$$\Delta^2 \alpha = -\Delta^2 \varphi \text{ в } \Omega, \quad (33)$$

$$\alpha|_{\partial\Omega} = 0, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\partial\Omega} = 0. \quad (34)$$

Задачу (33) – (34) решаем методом Ритца для уравнения  $A\alpha = f$ .

Пусть

$$\alpha = \sum_{k=1}^K c_k \chi_k, \quad (35)$$

тогда система Ритца имеет вид:

$$\sum_{j=1}^K (A\chi_j, \chi_k) c_j = (\chi_k, f). \quad (36)$$

В нашем случае она имеет вид:

$$\sum_{j=1}^K (\Delta^2 \chi_j, \chi_k) c_j = (\chi_k, -\Delta^2 \varphi). \quad (37)$$

Скалярное произведение представляем в виде интегралов:

$$\sum_{j=1}^K c_j \iint_{\Omega} \Delta^2 \chi_j \chi_k dx dy = - \iint_{\Omega} \chi_k \Delta^2 \varphi dx dy . \quad (38)$$

Согласно третьей формуле Грина для оператора Лапласа, которая имеет вид:

$$- \int_{\Omega} (v \Delta u - u \Delta v) d\Omega = \int_S \left( v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n} \right) dS , \quad (39)$$

и учитывая, что интеграл по контуру равен нулю, интегралы в (39) можно преобразовать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^K c_j \iint_{\Omega} \Delta \chi_j \Delta \chi_k dx dy = - \iint_{\Omega} \Delta \chi_k \Delta \varphi dx dy . \quad (40)$$

После решения задачи (33) – (34) находим  $u_0$ ,  $v_0$  (которое уже известно) и берем их в качестве начального приближения для итерационного процесса.

Рассмотрим теперь задачу (15) – (18). Ее решение также находим с помощью метода Ритца:

$$u = \sum_{k=1}^K c_k \tau_k , \quad v = \sum_{k=1}^K c_k \eta_k .$$

Для (15) система Ритца будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^K (\Delta^2 \tau_j, \tau_k) c_j = \\ & = \left( \tau_k, \operatorname{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] + \operatorname{Gr} \frac{\partial v}{\partial x} \right) . \end{aligned} \quad (41)$$

Или в виде интегралов:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^K \iint_{\Omega} \Delta^2 \tau_j \tau_k dx dy c_j = \\ & = \iint_{\Omega} \left( \operatorname{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] + \operatorname{Gr} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \tau_k dx dy . \end{aligned} \quad (42)$$

Интеграл в левой части (42) можно также по третьей формуле Грина (39) представить в виде:

$$\iint_{\Omega} \Delta^2 \tau_j \tau_k dx dy = \iint_{\Omega} \Delta \tau_j \Delta \tau_k dx dy . \quad (43)$$

Рассмотрим интеграл справа в (42). Используя формулу

$$\int_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = - \int_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy + \int_S uv \cos(n, x) dx dy \quad (44)$$

и учитывая краевые условия, интеграл можно преобразовать к виду

$$\iint_{\Omega} \left( \operatorname{Re} \left[ -\Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \frac{\partial \tau_k}{\partial x} + \Delta(u_0 + u) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \frac{\partial \tau_k}{\partial y} \right] + \operatorname{Gr} \frac{\partial v}{\partial x} \tau_k \right) dx dy$$

или после преобразований

$$\iint_{\Omega} \left( \operatorname{Re} \Delta(u_0 + u) \left( \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \frac{\partial \tau_k}{\partial y} - \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \frac{\partial \tau_k}{\partial x} \right) + \operatorname{Gr} \frac{\partial v}{\partial x} \tau_k \right) dx dy . \quad (45)$$

Для (16) система Ритца имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^K (-\Delta \eta_j, \eta_k) c_j = \\ & = \left( \eta_k, -\operatorname{Pe} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] \right) . \end{aligned} \quad (46)$$

Или в интегральной форме:

$$\sum_{j=1}^K \left( -\iint_{\Omega} \Delta \eta_j \eta_k dx dy \right) c_j = -\iint_{\Omega} \left[ \text{Pe} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \right) \right] \right] \eta_k dx dy. \quad (47)$$

Интеграл в левой части (47) можно преобразовать по первой формуле Грина для оператора Лапласа:

$$-\iint_{\Omega} v \Delta u dx dy = \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy - \int_S v \frac{\partial u}{\partial n} dS. \quad (48)$$

Тогда этот интеграл будет равен:

$$-\iint_{\Omega} \Delta \eta_j \eta_k dx dy = \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \eta_j}{\partial x} \frac{\partial \eta_k}{\partial x} + \frac{\partial \eta_j}{\partial y} \frac{\partial \eta_k}{\partial y} \right) dx dy. \quad (49)$$

Интеграл в правой части (47) также преобразуем по формуле (44):

$$-\iint_{\Omega} \left[ \text{Pe} \left[ -(v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \frac{\partial \eta_k}{\partial x} + (v_0 + v) \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \frac{\partial \eta_k}{\partial y} \right] \right] dx dy.$$

Или после преобразований:

$$-\iint_{\Omega} \left[ \text{Pe} \left[ (v_0 + v) \left( \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial x} \frac{\partial \eta_k}{\partial y} - \frac{\partial(u_0 + u)}{\partial y} \frac{\partial \eta_k}{\partial x} \right) \right] \right] dx dy. \quad (50)$$

Неопределенные компоненты в (20), (21), (23), (24) аппроксимируем кубическими сплайнами Шенберга.

### 3. Результаты численного эксперимента

Вычислительный эксперимент был проведен для прямоугольной области. Везде предполагалось, что массовые силы  $\mathbf{f}$  потенциальны, т.е.  $\text{rot} \mathbf{f} = 0$ , а значит,  $F(x, y) \equiv 0$ ,  $G(x, y) \equiv 0$ . В качестве базисных функций выбирались степенные полиномы, тригонометрические полиномы, полиномы Лежандра, кубические сплайны Шенберга. Шаг сетки сплайнов выбран  $h_x = h_y = 0,1$ . При вычислении интегралов в системах Ритца использовалась формула Гаусса с 16 узлами по каждой переменной на каждом частичном квадрате  $0,1 \times 0,1$ . Предполагалось, что жидкость ограничена твердыми неподвижными стенками. Начальное приближение было построено для чисел Рейнольдса  $\text{Re} = 1$ , Пекле  $\text{Pe} = 1$  и Грасгофа  $\text{Gr} = 50$ .

Вычислительный эксперимент был проведен при  $a = b = 1$ . Результаты в виде линий уровня температуры (изотерм) и линий уровня функции тока (линий тока) приведены на рис. 2 ( $\text{Re} = 1$ ,  $\text{Pe} = 1$  и  $\text{Gr} = 50$ ).

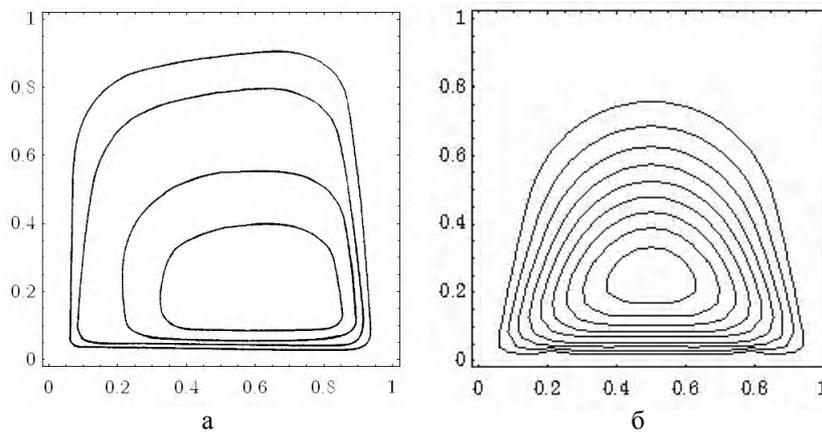


Рис. 2. Изотермы  $T = \text{const}$  (а) и линии тока  $\psi = \text{const}$  (б)

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами физических экспериментов [1, 2] и результатами, полученными методом фиктивных областей [9, 10]. Расхождения составили около 5%.

### **Выводы**

Таким образом, построен алгоритм решения задачи численного моделирования на основе метода R-функций, что дало возможность, в отличие от сеточных методов, получить выражение для функции тока в аналитическом виде, что существенно облегчает ее последующее использование. Численное моделирование было проведено для прямоугольной области. Для конкретной задачи проводится сравнение полученного приближенного решения с приближенным решением, полученным другими авторами. Сделан вывод об эффективности предложенного метода решения.

**Литература:** 1. Ландау Л. Ф., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2003. 736 с. 2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с. 3. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: ГИФМЛ, 1963. 728 с. 4. Ламб Г. Гидродинамика. М.: РХД, 2003. Т. 1. 452 с.; Т. 2, 452 с. 5. Шкадов В. Я., Запryanов З. Д. Течения вязкой жидкости. М.: Изд-во Моск. у-та, 1984. 200 с. 6. Свеишников А. Г., Боголюбов А. Н., Кравцов В. В. Лекции по математической физике. М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. 416 с. 7. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с. 8. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. К.: Наук. думка, 1982. 552 с. 9. Вабищевич П. Н., Вабищевич Т. Н. Численное решение стационарных задач вязкой несжимаемой жидкости на основе метода фиктивных областей // Вычислительная математика и математическое обеспечение ЭВМ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. С. 255-262. 10. Вабищевич П. Н. Метод фиктивных областей в математической физике. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 156 с.

*Поступила в редколлегию 22.06.2009*

**Артюх Антон Владимирович**, студент группы ПМм-08-1 факультета ПММ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, математическая физика, численные методы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36.

**Гибкина Надежда Валентиновна**, канд. техн. наук, доц. каф. прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: экономический риск, актуарная математика, математическая физика, оптимальное управление динамическими объектами. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36.

**Сидоров Максим Викторович**, канд. физ.-мат. наук, ст. преп. каф. прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, математическая физика, теория R-функций и ее приложения. Увлечения и хобби: история культуры. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36.

**Агапов Евгений Евгеньевич**, студент группы ИНФ-05-2 факультета ПММ ХНУРЭ. Научные интересы: численные методы, компьютерное моделирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36.

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТОРСАТРОНА «УРАГАН-2М»**

---

Рассматриваются модели, методы и алгоритмы трехмерного моделирования винтовой обмотки торсатрона «Ураган-2М». Обосновывается применение метода кинематического моделирования как наиболее приемлемого для получения твердотельной и поверхностной моделей элементов магнитной системы. Описывается метод конечно-элементного анализа для расчетов напряженно-деформированного состояния магнитной системы торсатрона.

### **1. Введение**

Тороидальная магнитная система стеллараторного типа «Ураган-2М» («У-2М») является сложным техническим объектом, предназначенным для удержания высокотемпературной плазмы специально созданным магнитным полем. Данная система относится к типу магнитных ловушек – торсатронов, характерной особенностью которых является однонаправленное движение токов по проводникам полюсов винтовой обмотки (ВО) [1]. Экспериментальные исследования магнитной конфигурации торсатрона обозначили ряд задач, решение которых зависит от расчетов напряженно-деформированного состояния элементов магнитной системы. К таким задачам относятся: определение экстремальных значений токов в проводниках полюсов ВО, при которых происходят деформации, приводящие к существенным возмущениям в магнитной конфигурации физической установки; расчет абсолютных значений усилий, порождающих такие деформации; определение напряжений в элементах магнитной системы, при которых они достигают предела текучести. Разработанные компьютерные программы позволяют в приемлемые сроки осуществить расчеты напряжений и деформаций, возникающих в элементах магнитной системы ВО под воздействием пондеромоторных сил. Основой таких расчетов является трехмерная геометрическая модель магнитной системы «У-2М», построенная с использованием разработанных математических моделей, методов и технологий. К ним относятся: объектно-ориентированный анализ для разбиения торсатрона на подсистемы и связи между ними; методы аналитической геометрии и вычислительной математики для получения геометрических моделей объектов сложной пространственной формы – полюсов ВО; метод конечно-элементного анализа для построения объемной и поверхностной моделей ВО. Для успешного использования перечисленных методов необходимо учитывать особенности конструкции «У-2М», которые непосредственно определяют систему ограничений на управляемые параметры.

### **2. Постановка и особенности задачи**

Магнитная система торсатрона состоит из ряда обмоток, наиболее сложной из которых является ВО. Она характеризуется как объект сложной пространственной формы и больших габаритных размеров. ВО «У-2М» двухзаходная, обеспечивающая четыре периода магнитного поля. Это означает, что в секторе, ограниченном прямым углом, который составлен из меридиональных сечений тора, геометрия ВО однозначно определена (рис. 1). Количество проводников в полюсе ВО – двадцать. Сечение проводника имеет трапециевидальную форму с размерами  $20 \times 24 \times 100$  мм. Геометрические характеристики ВО задаются набором меридиональных сечений тора через каждые  $0,5^\circ$  при обходе вокруг главной оси тора. В состав магнитной системы торсатрона входит еще ряд плоских кольцевых обмоток, плоскости которых расположены перпендикулярно к главной оси тора.

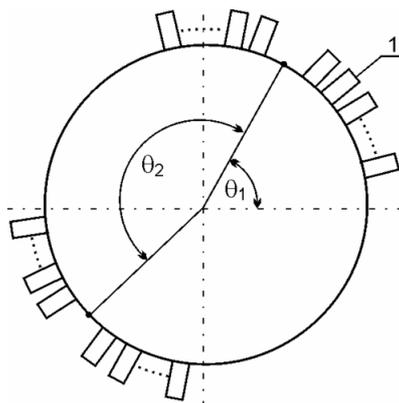


Рис. 1. Меридиональное сечение полюсов ВО «У-2М»: 1 – проводник в полюсе ВО;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы расположения центра полюса

### 3. Методы геометрического моделирования ВО «У-2М»

Для получения математической модели геометрии ВО торсатрона «У-2М» использован кинематический метод моделирования [2,3]. Этот метод наиболее полно соответствует действиям разработчиков при параметрическом синтезе проектных решений. Суть метода заключается в том, что формообразование поверхности полюсов магнитных обмоток торсатрона образуется при движении в пространстве плоской кривой, форма которой в процессе движения либо изменяется по известному правилу, либо остается неизменной. Таким образом, для задания кинематической поверхности ВО необходимо задать семейство плоских кривых и закон изменения плоской кривой в пространстве.

Пусть  $\psi_i(V)$  – семейство плоских кривых, зависящее от параметра  $U$  и принадлежащее фиксированной плоскости  $R_0^2$ .  $T_i : R_0^2 \rightarrow R^3$  – семейство отображения этой плоскости в пространстве. В этом случае поверхность полюса ВО задается композицией отображений

$$\psi(U, V) = T_i \psi_i(V),$$

где  $U, V$  – криволинейные координаты поверхности.

Для конкретного случая изготовления ВО торсатрона «У-2М» контур плоских кривых задает поверхность в виде набора сечений. В таком случае поверхность ВО «У-2М» представлена как движущаяся в пространстве изменяющаяся кривая, поочередно принимающая форму меридиональных сечений. При этом между сечениями поверхность интерполируется линейными отрезками, соединяющими характерные точки элементов конструкции на соседних сечениях.

Таким образом, поверхность полюсов ВО «У-2М» может быть представлена в виде сетки (растр), состоящей из элементов – образующих и отрезков, соединяющих соседние образующие вершины проводников полюсов магнитных обмоток. При таком представлении моделируемой поверхности координаты вершин растра однозначно определены в выбранной системе координат. При необходимости определения координат точек на моделируемой поверхности, находящихся вне вершин растра, используются сплайны Безье [4].

Для восстановления поверхности по Безье в каждой ячейке растра ВО необходимо к имеющимся четырем точкам растра добавить еще двенадцать точек, чтобы в каждой ячейке оказалось шестнадцать опорных узлов. По этим шестнадцати узлам строится аппроксимирующая поверхность Безье для ячейки. Преимущество кинематического способа задания поверхности по сравнению с другими методами, использующими затягивание корсета поверхности, созданного образующими и направляющими, заключается в том, что в таком случае для описания поверхности сложной формы (в нашем случае поверхности ВО) требуется значительно меньшее количество промежуточных сечений благодаря дополнительным возможностям управления плоскостью сечения. При этом метод учитывает множество факторов, необходимых в процессе проектирования, в частности, простоту описания, затраты на хранение и редактирование, эффективность представления для конкретной ВО, этапы технологического оснащения, интуитивные представления разработчиков и т.д.

#### 4. Метод конечно-элементного анализа для расчета НДС торсатрона «У-2М»

Метод конечных элементов (МКЭ) [5,6] занимает лидирующее положение при решении задач механики твердого тела благодаря возможности моделирования широкого круга объектов и явлений. Популярными альтернативными методами – метод конечных разностей и метод граничных элементов (граничных интегральных уравнений) сейчас занимают достаточно узкие ниши, ограниченные исследовательскими или специальными задачами.

В основе МКЭ при построении геометрии магнитной системы «У-2М» лежит дискретизация объема ВО для решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Такие элементы соответствуют реальной части пространства ВО (рис. 2, 3, 4).

Обозначения на рис. 2-4:  $\xi, \varphi, \eta$  – локальная система координат элемента;  $X, Y, Z$  – глобальная система координат ВО;  $u, v, w$  – перемещения в локальной системе координат для оболочечного элемента;  $\theta_\xi, \theta_\varphi, \theta_\eta$  – углы поворота относительно локальных осей в узле и в глобальной системе координат  $U, V, W$ .

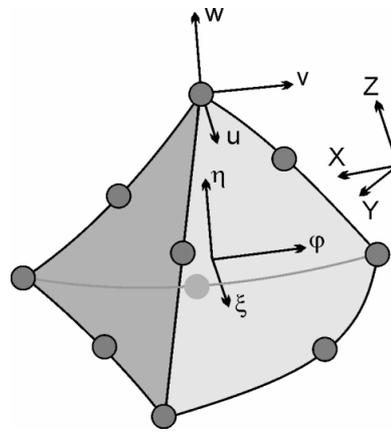
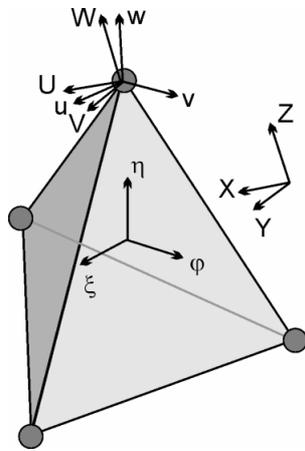


Рис. 2. Объемный линейный конечный элемент    Рис. 3. Объемный параболический конечный элемент

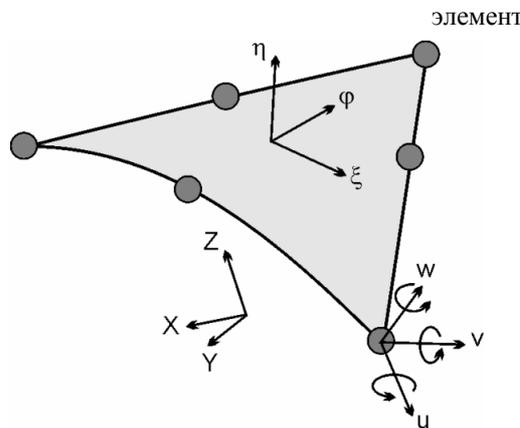


Рис. 4. Параболический конечный элемент поверхности

В пределах КЭ ВО назначены свойства объекта – характеристики жесткости и прочности материала (медные проводники полюсов ВО) и описываются поля интересующих величин – перемещений, деформаций и напряжений. Перемещения, деформации и напряжения назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, при помощи которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента ВО или на его границе. Математическое описание элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы: перемещения и усилия. Такая последовательность действий при описании возникающих в магнитной системе «У-2М» перемещений и усилий последовательно реализуется.

Задача решается методом прямого поиска в предположении линейной постановки:

1. Поле перемещений  $\Delta$  в пределах элемента ВО (для объемной задачи  $\Delta = [u, v, w]^T$ ) посредством интерполяционных функций, собранных в матрицу  $[N]$ , выражается через угловые перемещения  $\{\Delta\}$ . Применение интерполяционных функций обеспечивает получение значений перемещений в любой точке элемента ВО в зависимости от координат и величин перемещений в узлах. В матричном виде соотношения выглядят так:

$$\Delta = N \cdot \{\Delta\},$$

где  $\{\Delta\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k]^T$  – для объемной задачи моделирования полюсов ВО торсатрона «У-2М»;  $k$  – число узлов конечного элемента.

2. Поле деформаций  $\varepsilon$  выражается через степень свободы  $\{\Delta\}$  посредством деформирования поля перемещений согласно соотношениям, собранным в матрицу  $[D]$  и связывающим деформации с перемещениями ВО:

$$\varepsilon = [D] \cdot \{\Delta\}.$$

3. С учетом уравнений состояния, в основе которых лежит закон Гука и коэффициенты которых образуют матрицу  $[E]$ , устанавливается связь сначала между полем напряжений и полем деформаций

$$\sigma = [E] \cdot \varepsilon,$$

а затем между состояниями свободы в узлах КЭ, на которые разбит объем полюсов магнитной обмотки торсатрона

$$\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{\Delta\}.$$

4. Формируются выражения для сил  $\{F\}$ , действующих в вершинах элемента, в зависимости от поля напряжений  $\sigma$ , для чего используется матрица преобразования напряжений в узловые силы  $[A]$ :

$$\{F\} = [A] \cdot \{\sigma\}.$$

5. Связываются выражения для узловых сил и перемещений в узлах ВО торсатрона

$$\{F\} = [k] \cdot \{\Delta\},$$

где  $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$  – матрица жесткости конечного элемента.

6. Для придания матрице  $[k]$  свойства симметрии заменяем матрицу преобразования жесткости матрицей, трансформированной к матрице преобразования перемещений в деформации  $[D]$ . Тогда

$$[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D].$$

Приведенные зависимости позволяют, зная перемещения в узлах ВО, получить величины сил, а также решить обратную задачу – по силам найти перемещения. Прямая формулировка используется для получения матриц жесткости КЭ, а также для описания процесса теплообмена в проводниках ВО торсатрона «У-2М».

Для получения матриц жесткости пространственных элементов полюсов ВО используются вариационные принципы, в частности, принцип минимума потенциальной энергии. Полученная таким образом матрица жесткости вычисляется по соотношению

$$[k] = \left[ \int_V [D]^T [E] [D] dx dy dz \right].$$

Проблема интегрирования по объему тела сложной формы либо в случае оболочного элемента – по криволинейным поверхностям решается за счет того, что выражения записываются в локальной системе координат, связанной с элементом  $\xi, \varphi, \eta$ , причем координаты изменяются в интервале  $[-1, +1]$ . В этом случае выражения для элементарного объема полюса ВО приобретает вид

$$dx dy dz = |J| d\xi d\varphi d\eta,$$

где  $|J|$  – определитель матрицы Якоби, тогда

$$[k] = \begin{bmatrix} +1+1+1 \\ \int \int \int [D]^T [E] [D] \det[J] d\xi d\varphi d\eta \\ -1-1-1 \end{bmatrix}.$$

Аналитический расчет интегралов в выражении для матрицы жесткости невозможен даже для треугольных КЭ с криволинейными сторонами. Поэтому используют численное интегрирование. Его суть заключается в том, что интегрирование заменено суммированием произведений подынтегральных выражений, вычисленных в определенной системе точек. Этот процесс сопровождается расчетом величины определителя якобиана. Отрицательная величина является следствием вырожденности данного конечного элемента.

Примеры используемых конечных элементов при моделировании объема и поверхности полюсов ВО приведены на рис. 2-4: объемный тетраэдрический с линейным полем перемещений в пределах ограничиваемой им области; объемный тетраэдрический с параболическим полем перемещений; треугольный элемент оболочки с параболическим полем перемещений.

Методом кинематического моделирования, подробно изложенным в статье, получены трехмерные модели геометрии магнитной системы – винтовых обмоток торсатрона «У-2М». Результаты расчета и моделирования приведены на рис. 5 и 6.

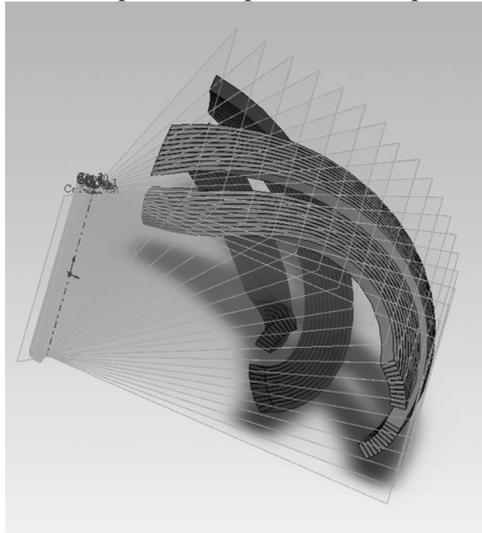


Рис. 5. Трехмерная модель ВО на одном периоде поля



Рис. 6. Трехмерная модель ВО «У-2М» с различных точек наблюдения

## 5. Выводы

Представлены математические модели, методы и алгоритмы трехмерного моделирования винтовой обмотки торсатрона «У-2М». В качестве базового метода геометрического моделирования обосновано применение метода кинематического моделирования как метода, в полной мере соответствующего действиям разработчиков тороидальных магнитных систем, предназначенных для решения задач управляемого термоядерного синтеза. Для получения трехмерной модели ВО в качестве рисующей кривой использован набор меридиональных сечений ВО, расположенных на торе, с последующим образованием растра и восстановлением координат на моделируемой поверхности с применением сплайна Безье.

Разработаны математические модели для решения задач расчета напряженно-деформированного состояния ВО «У-2М» методом конечно-элементного анализа.

**Список литературы:** 1. Волков Е.Д., Супруненко В.А., Шишкин А.А. Стелларатор. Киев: Наук. думка, 1983. 310 с. 2. Воробьева В.П., Мартынов С.А., Слабостицкая Е.А., Хажмурадов М.А. Разработка математической модели для автоматизированного проектирования геометрии винтовых обмоток магнитных систем // АСУ и приборы автоматики. 1999. Вып. 109. С. 101-107. 3. Воробьева В.П., Мартынов С.А., Слабостицкая Е.А., Рудаков В.А., Хажмурадов М.А. Моделирование на ПЭВМ поверхностей винтовых обмоток магнитных систем // АСУ и приборы автоматики. 2001. Вып. 115. С. 5-9. 4. Воробьева В.П., Круголь М.С., Мартынов С.А., Усков В.В., Хажмурадов М.А. Моделирование поверхностей сложной пространственной формы стеллараторных магнитных ловушек // АСУ и приборы автоматики. 2002. Вып. 119. С. 7-9. 5. Черненко В.М. Имитационное моделирование. М.: Высш. шк., 1990. 6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984.

*Поступила в редколлегию 21.06.2009*

**Мартынов Сергей Алексеевич**, канд. техн. наук, младший научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: автоматизированное проектирование сложных систем. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Воробьева Вера Павловна**, ведущий инженер-программист Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Круголь Михаил Савельевич**, начальник группы Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: разработка автоматизированного проектирования технических и программных средств для сложных систем. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Юркин Анатолий Юрьевич**, ведущий инженер-электроник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: разработка автоматизированного проектирования технических и программных средств для сложных систем. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Хажмурадов Манап Ахмадович**, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов и систем, автоматизация проектирования, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

## **ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Для исследования устройства контроля качества диэлектрических материалов применяются методы оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Показывается эффективность этих методов, причем наилучшие результаты получаются при использовании итерационного метода планирования эксперимента, а наихудшие – при использовании метода случайного поиска.

**1. Постановка проблемы.** Сотрудниками кафедры авиационных приборов и измерений Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» разработано устройство для контроля качества диэлектрических материалов, позволяющее с высокой точностью измерять влагосодержание сыпучих и жидких материалов с диэлектрическими свойствами, октановые числа бензинов и цетановые числа дизельного топлива [1, 2]. По полученным с помощью аппарата теории планирования эксперимента математическим моделям, отражающим зависимость точности и энергопотребления от ряда схемных параметров устройства, проведена оптимизация устройства [2].

При этом целесообразно решать указанные задачи при минимальных стоимостных и временных затратах.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [2] с привлечением методов планирования экспериментов выполнены исследования и оптимизация устройства для контроля качества. Проведенные исследования и полученные математические модели позволяют осуществить выбор схмотехнических параметров устройства для контроля влажности диэлектрических материалов исходя из требуемых значений уровня энергопотребления и степени точности.

Недостатком данного исследования является то, что не учитывается стоимость проведения экспериментов, выполненных по планам полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Цель работы: синтезировать оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента для проведения данных исследований.

**3. Основные результаты исследований.** При исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов в качестве критериев оптимизации были выбраны следующие показатели: энергопотребление устройства  $P_{\text{потр.}}(В \cdot мА)$  и абсолютная погрешность устройства (%). Доминирующими факторами, влияющими на энергопотребление устройства, были выбраны [2]:  $X_1$  – напряжение питания,  $U_{\text{пит}}$ ;  $X_2$  – значение начальной емкости эталонного конденсатора в плечах мультивибратора,  $C_0$ ;  $X_3$  – число витков основной обмотки магниточувствительного преобразователя,  $W$ ;  $X_4$  – число витков дополнительной мультивибраторной обмотки,  $W_1$  (обмотка 3 или 4). При исследовании точности устройства в качестве фактора  $X_2$  выбрано значение сопротивления, подсоединенного к выходу операционного усилителя. Факторы  $X_1$ ,  $X_3$  и  $X_4$  остаются такими же, как и при исследовании энергопотребления устройства.

Исходный план ПФЭ, по которому выполнялись исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов, представлен в табл. 1.

Проведем оптимизацию исходного плана ПФЭ по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента.

Стоимости изменений значений уровней факторов при исследовании энергопотребления и точностных характеристик устройства приведены в табл. 2.

Таблица 1. Исходные и оптимальные планы экспериментов

Исходный план					Исследование энергопотребления									
					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1	1	-1	-1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1

Продолжение табл. 1

Исходный план					Исследование точности									
					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-1	-1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1	1	-1	-1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1

Таблица 2

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Исследование энергопотребления				Исследование точности			
	Обозначение факторов				Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
из «-1» в «+1», грн	0,5	0,7	5,5	6,7	0,5	0,7	5,5	6,7
из «+1» в «-1», грн	0,5	0,7	1,4	2,4	0,5	0,7	1,4	2,4
из «0» в «-1», грн	0,5	1,0	3,0	4,0	0,5	0,4	3,0	4,0
из «0» в «+1», грн	0,5	0,4	1,4	2,4	0,5	0,4	1,4	2,4

С помощью пакета прикладных программ синтезированы оптимальные по стоимости проведения планы эксперимента, полученные в результате реализации следующих видов поиска: анализ перестановок (для исследования энергопотребления проанализировано 131501 вариант), а для исследования точности устройства – 7777777 вариантов, случайный поиск (соответственно, 7143854 и 22654466 вариантов). Матрицы планирования этих планов приведены в табл. 1.

Стоимости реализации оптимальных планов, исходных планов и планов с максимальной стоимостью реализации для исследования энергопотребления и точности устройства приведены в табл. 3.

Таблица 3. Стоимости реализации исходных, оптимальных и с максимальной стоимостью реализации планов экспериментов

Стоимости реализации планов эксперимента	Исследование энергопотребления			Исследование точности		
	Исходный план	Анализ перестановок	Случайный поиск	Исходный план	Анализ перестановок	Случайный поиск
Стоимость исходных планов, грн	30,0	-	-	29,4	-	-
Стоимость оптимальных планов, грн	-	24,9	30,0	-	24,7	29,4
Максимальная стоимость реализации планов, грн	-	89,8	120,0	-	120,3	120,0

Выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам приведены в табл. 4.

Таблица 4. Выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам

Выигрыши в стоимости реализации	Исследование энергопотребления		Исследование точности	
	Анализ перестановок	Случайный поиск	Анализ перестановок	Случайный поиск
По сравнению с исходным планом, разы	1,20	1,00	1,19	1,00
По сравнению с планом с максимальной стоимостью реализации, разы	3,61	4,00	4,87	4,86

При исследовании итерационного метода планирования эксперимента [3] получен его исходный план при условии равноценности опытов матрицы планирования (табл. 5).

При этом адекватные математические модели [2] были получены на третьем шаге итерации: 1) план дробного факторного эксперимента (ДФЭ) с генерирующим соотношением  $X_4 = X_1 X_2$ ; 2) достройка плана ДФЭ до плана Рехтшафнера; 3) достройка проведенных ранее опытов до плана ПФЭ.

Оптимальные по стоимости реализации планы эксперимента, полученные с помощью пакета прикладных программ и с учетом стоимостей, приведенных в табл. 2, представлены в табл. 5.

Стоимости реализации экспериментов по оптимальным и исходным планам для исследования энергопотребления и точности устройства, а также выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам приведены в табл. 6.

Таблица 5. Исходный и оптимальные планы, полученные методом итерационного планирования экспериментов

№ шага	Исходный план					Оптимальный план энергопотребления					Оптимальный план точности				
	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	1	+1	-1	-1	-1	4	+1	+1	+1	+1	4	+1	+1	+1	+1
	2	-1	+1	-1	-1	7	-1	-1	+1	+1	7	-1	-1	+1	+1
	3	-1	-1	-1	+1	3	-1	-1	-1	+1	3	-1	-1	-1	+1
	4	+1	+1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1
	5	+1	+1	-1	+1	2	-1	+1	-1	-1	2	-1	+1	-1	-1
	6	+1	-1	+1	-1	1	+1	-1	-1	-1	1	+1	-1	-1	-1
	7	-1	-1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1	-1
	8	-1	+1	+1	-1	8	-1	+1	+1	-1	8	-1	+1	+1	-1
2	9	+1	+1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
	10	+1	-1	-1	+1	14	-1	+1	+1	+1	14	-1	+1	+1	+1
	11	+1	-1	+1	+1	11	+1	-1	+1	+1	11	+1	-1	+1	+1
	12	+1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
	13	-1	+1	-1	+1	13	-1	+1	-1	+1	13	-1	+1	-1	+1
	14	-1	+1	+1	+1	9	+1	+1	-1	-1	9	+1	+1	-1	-1
	15	-1	-1	-1	-1	15	-1	-1	-1	-1	15	-1	-1	-1	-1
3	16	-1	-1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1

Таблица 6. Стоимости реализации исходных и оптимальных планов эксперимента

Стоимости реализации планов эксперимента	Исследование энергопотребления		Исследование точности	
	Исходный план	Оптимальный план	Исходный план	Оптимальный план
Стоимость исходных планов, грн	86,1	-	85,5	-
Стоимость оптимальных планов, грн	-	40,4	-	40,4
Выигрыши	2,13		2,10	

**Выводы.** На примере исследования устройства для контроля качества диэлектрических материалов показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента, причем наилучшие результаты получаются при использовании итерационного метода планирования эксперимента, а наихудшие - при использовании метода случайного поиска.

**Список литературы:** 1. Пат. 53186 Україна. Пристрій для вимірювання вологості матеріалів / О.В. Заболотний, В.О. Заболотний, М.Д. Кошовий. Опубл. 2003. Бюл. №1. 2. *Заболотный А.В.* Разработка, исследование и оптимизация устройства для контроля качества диэлектрических покрытий / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой // Приборы и системы. Управления, контроль, диагностика. 2004. № 1. С. 39 – 42. 3. *Кошевой Н.Д.* Автоматизация экспериментальных исследований: Монография / Н.Д. Кошевой, В.А. Гаевой. Харьков: Факт, 2001. 112с.

Поступила в редколлегию 25.06.2009

**Кошевой Николай Дмитриевич**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: автоматизация экспериментальных исследований, проектирование измерительных преобразователей, автоматизация производственных процессов. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 8-057-707-43-03.

**Костенко Елена Михайловна**, канд. техн. наук, доцент, проректор по учебно-педагогической и инновационной работе, Полтавская государственная аграрная академия. Научные интересы: автоматизация экспериментальных исследований, охрана труда. Адрес: Украина, 36003, Полтава, ул. Сковороды, 1/3, тел. 8-05322-7-36-93.

**Заболотный Александр Витальевич**, канд. техн. наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: проектирование измерителей влажности материалов. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 8-057-707-42-69.

---

УДК 621.396.96

*К.С. ВАСЮТА, М.В. БУЛАШКО*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ**

---

Розглядаються методи побудови і оптимізації функціонування систем зв'язку, що забезпечують підвищення ефективності процесу управління. Пропонується алгоритм, за допомогою якого можна отримати оптимальне значення цільової функції виграшу і матрицю послідовності розподілу засобів зв'язку по об'єктах управління.

### **1. Вступ**

Система зв'язку (СЗ) повинна максимально задовольнити потреби управління, що визначає її ефективність. До основних елементів системи зв'язку належать вузли зв'язку, базові станції, що являють собою організаційно-технічне об'єднання, які відокремлені за функціональною ознакою, і лінії зв'язку, що забезпечують управління і включають різні засоби наземного зв'язку, повітряного радіозв'язку.

Задоволення потреб управління за будь-яких умов можливо лише шляхом раціонального використання елементів, засобів і каналів зв'язку в процесі управління. Для забезпечення управління система зв'язку має забезпечити певну кількість ліній і каналів зв'язку.

Звідси виникає потреба розподілу засобів і каналів вузла зв'язку, щоб з максимальною ефективністю використовувати наявні засоби.

Розв'язку задачі раціонального використання засобів присвячено ряд наукових праць [1, 2-4]. Однак основна увага в них приділяється вирішенню часткових задач, а саме: побудові початкової системи зв'язку інформаційно-керуючих систем без врахування надійності, побудові оптимальної системи зв'язку підприємства, побудові заводостійких систем зв'язку.

У роботі [3] запропонована математична модель системи зв'язку та методика її побудови за критерієм максимуму заводо захищеності. У [4] також запропоновано шляхи побудови оптимальної системи зв'язку, перевагами яких є можливість застосування будь-якого критерію оптимізації, що можна виразити аналітично. Однак обмеженість даних шляхів полягає у неможливості реалізації її на сучасній обчислювальній техніці для розмірності задачі  $n > 20$ .

У роботі [5] запропоновано раціональне використання засобів зв'язку з урахуванням можливих експлуатаційних відмов. Перевагою даної роботи є можливість побудувати стійку до відмов систему зв'язку. Проте запропонований метод не дає змоги врахувати важливість засобів, а також наступний перерозподіл в процесі управління.

*Метою* даної роботи є визначення підходів до побудови системи зв'язку на основі раціонального розподілу елементів, засобів і каналів зв'язку в процесі забезпечення управління.

*Завданням* даного дослідження є оптимізація розподілу елементів системи зв'язку.

### **2. Постановка задачі**

Можливу постановку завдання сформулюємо так: є  $N$  засобів зв'язку, які необхідно розподілити по  $S$  об'єктах управління. Як критерій оптимальності використаємо максимум ефективності (живучості, заводо захищеності, надійності тощо). При цьому накладаються обмеження: вважається, що за час розподілу засоби не виходять з ладу; об'єкти взаємозалежні.

Задача належить до області дискретної оптимізації і може бути вирішена динамічним програмуванням Р. Белмана, методом двох функцій, методом максимального елемента й іншими. Метод повного перебору недоцільний внаслідок NP-складності розв'язку даної задачі [6].

З урахуванням того, що вихідні дані мають похибки методичного й інструментального характеру, то доцільно використовувати псевдооптимальні методи оптимізації. Серед них можливо використання методу максимального елемента та методу двох функцій. Метод максимального елемента враховує лише приріст цільової функції на кожному кроці оптимізації, що може використовуватися при однорідних засобах зв'язку. При використанні даного методу з неоднорідними засобами максимальна похибка може бути досить значною [2]. Тому доцільно для оптимізації розподілу елементів системи зв'язку, зважаючи на неоднорідність її елементів, використовувати метод двох функцій.

### 3. Основна частина

Як вхідні дані для елементів системи зв'язку може використовуватися ймовірність забезпечення стійкого зв'язку залежно від дальності (таблиця).

Ймовірність забезпечення стійкого зв'язку залежно від дальності

Лінія зв'язку	Довжина лінії зв'язку, км								
	10	20	30	40	60	80	100	120	150
Радіолінія КХ	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Радіолінія УКХ	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Супутникові лінії зв'язку	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Заглиблені ПКЛ П-296	0,68	0,64	0,60	0,57	0,52	0,48	0,42	0,36	0,30
ПКЛ на поверхні ґрунту	0,40	0,36	0,32	0,30	0,24	0,20	0,17	0,14	0,10
Магістраль між ВЗ	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,86	0,83	0,80

КХ – короткохвильова; УКХ – ультракороткохвильова; РРЛ – радіорелейна лінія; ТРЛ – тропосферна лінія; ПКЛ – польова кабельна лінія; ВЗ – вузол зв'язку.

Наприклад, вузли зв'язку включають різнотипні засоби, радіостанції короткохвильового (КХ) та ультракороткохвильового (УКХ) діапазону, які попередньо налаштовані на відповідні радіочастоти в радіонапрямах і радіомережах і відповідно мають різну ефективність за дальністю зв'язку, завадозахищеністю тощо.

Задамо існуючі засоби зв'язку, зважаючи на їх неоднорідність,  $j$ -м вектором  $\{\omega_{ji}\}$  в матриці  $\|\omega_{ji}\|_{NS}$ . При цьому кожний елемент системи зв'язку (засіб зв'язку) має свій номер  $j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ), а де-факто використання його на напрямку фіксується індикатором  $\delta_{ij} = 1$ . Тоді матриця призначень  $\|\delta_{ji}\|_{NS}$  буде мати інформацію про використання відповідного засобу зв'язку на відповідному напрямку.

Розподіл необхідно провести так, щоб забезпечити максимальну стійкість зв'язку.

Як вже зазначалося вище, для врахування унікальності кожного засобу та оптимального розподілу засобів будемо враховувати поряд з функцією виграшу  $F_t^+$  функцію втрат  $F_t^-$  на кожному кроці оптимізації.

Функція  $F_t^+$  неубуваюча і має позитивний приріст при покроковому розподілі, який визначається за виразом

$$\Delta_{kl}^+ = F_t^+ - F_{t-1}^+ = A_t^{(t-1)} \omega_{kl}, \quad k=1,2,\dots,N; \quad l=1,2,\dots,S, \quad (1)$$

де  $A_t^{(t-1)}$  – важливість елемента системи зв'язку;  $\omega_{kl}$  – ймовірність забезпечення стійкого зв'язку  $k$ -м засобом на  $l$ -му напрямку.

Функція втрат у міру розподілу засобів не зростає і має непозитивний приріст, який визначається за виразом

$$-\Delta_{kl}^- = F_t^- - F_{t-1}^-, \quad k=1,2,\dots,N; \quad l=1,2,\dots,S. \quad (2)$$

Припускаючи, що до  $t$ -го кроку процесу розподілу засобів у кожному з радіонапрямків встановлено зв'язок з ймовірністю  $P_t^{(t-1)} = 1 - Q_t^{(t-1)}$ , матрицю призначень можна записати так:

$$F_{t-1}^- = \sum_{i=1}^S A_i \left( 1 - Q_t^{t-1} \prod_{j \in N(t)} \varepsilon_{ji} \right), \quad (3)$$

де  $N(t)$  – множина невикористаних до  $t$ -го кроку засобів;  $\varepsilon_{ji}$  – ймовірність незабезпечення стійкого зв'язку.

Після призначення  $k$ -го засобу зв'язку на  $l$ -й напрямок функція втрат буде мати такий вигляд:

$$F_t^- = \sum_{i \neq l} A_i \left( 1 - Q_i^{(t-1)} \prod_{\substack{j \neq k \\ j \in N(t)}} \varepsilon_{ji} \right) + A_l \left( 1 - Q_l^{(t-1)} \prod_{j \in N(t)} \varepsilon_{jl} \right). \quad (4)$$

Враховуючи, що

$$\sum_{i \neq l} F_i = \sum_i F_i - F_l, \quad (5)$$

отримаємо:

$$F_t^- = \sum_i A_i \left( 1 - \frac{Q_i^{(t-1)}}{\varepsilon_{ki}} \prod_j \varepsilon_{ji} \right) - \frac{A_l \omega_{kl}}{\varepsilon_{kl}} \prod_j \varepsilon_{jl}. \quad (6)$$

Тоді неперіодичний приріст функції втрат, який отримується на  $t$ -му кроці процесу за рахунок пробного призначення  $k$ -го засобу, буде такий:

$$-\Delta_{kl}^- = -\sum_i \frac{A_i^{(t-1)} \omega_{ki}}{\varepsilon_{ki}} \prod_j \varepsilon_{ji} + \frac{A_t^{(t-1)} \omega_{kl}}{\varepsilon_{kl}} \prod_j \varepsilon_{jl} = -\sum_{j \neq l} \frac{A_i^{(t-1)} \omega_{ki}}{\varepsilon_{ki}} \prod_j \varepsilon_{ji}, \quad (7)$$

де  $j, k \in N^{(t)}$ ,  $l = 1, 2, \dots, S$ .

При цьому

$$A_i^{(t-1)} = A_i Q_i^{(t-1)}; \quad i = 1, \dots, S. \quad (8)$$

Втрати, які виникають на  $i$ -му засобі (елементі СЗ) при закріпленні  $k$ -го засобу за  $l$ -м об'єктом, дорівнюють

$$\frac{A_i^{(t-1)} \omega_{ki}}{\varepsilon_{ki}} \prod_j \varepsilon_{ji}, \quad i \neq l, \quad j \in N^{(t)}. \quad (9)$$

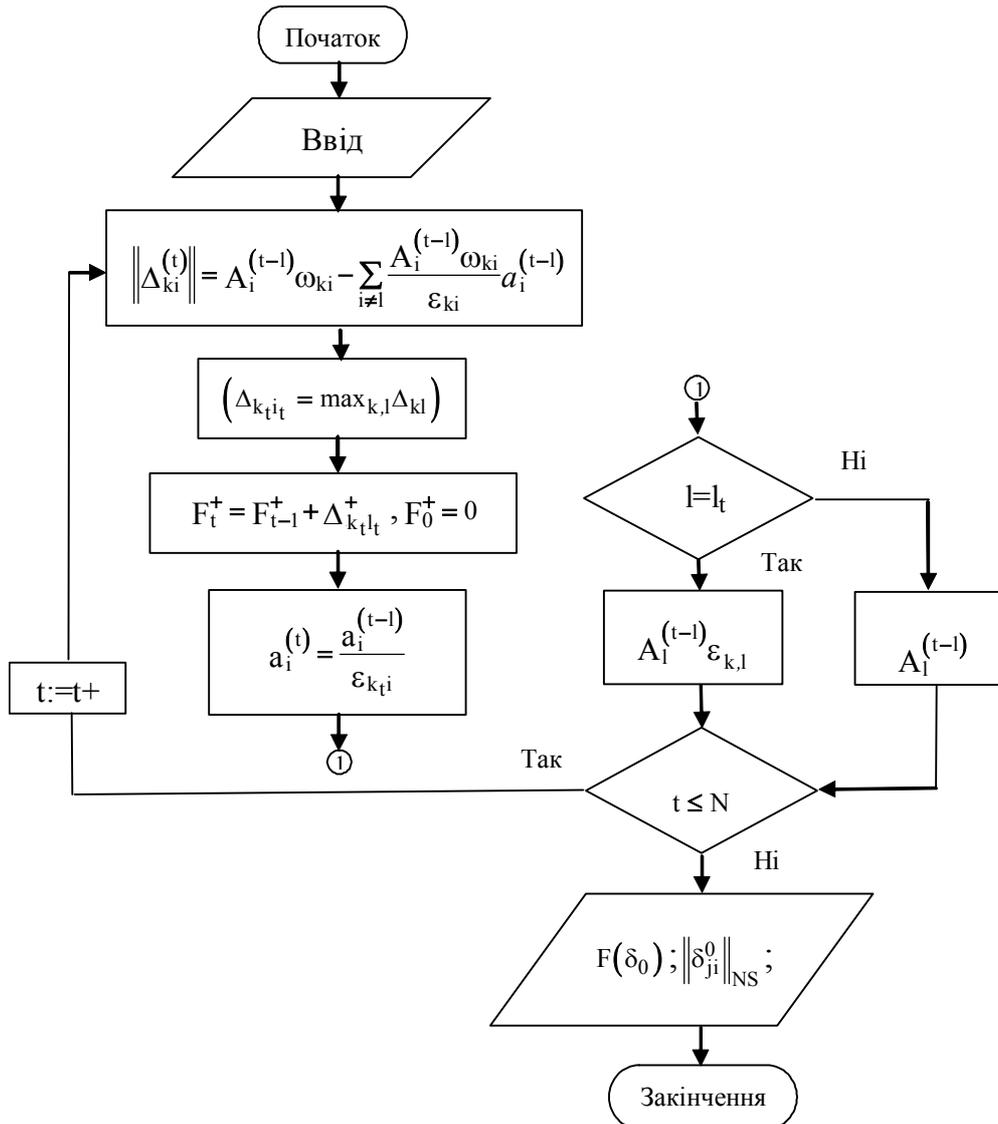
Вираз (7) дозволяє кількісно врахувати вимогу, яка висувається до оптимального процесу розподілу засобів – вимогу врахування неоднорідності засобів.

Відповідно процес оптимізації повинен забезпечувати такий порядок розподілу засобів, щоб на кожному його кроці гарантувався найбільший приріст функції виграшу  $\Delta_{kl}^+$  при мінімальних втратах  $-\Delta_{kl}^-$ .

Ці вимоги до процесу оптимізації можуть перебувати у протиріччі, тому для їх якісного врахування виберемо процес послідовного розподілу засобів з умови максимізації на кожному кроці алгебраїчної суми приросту функції виграшу і функції втрат:

$$\Delta_{kl} = \Delta_{kl}^+ - \Delta_{kl}^-, \quad k \in N^{(t)}, \quad l \in 1, \dots, S. \quad (10)$$

На основі викладеного вище можливо синтезувати алгоритм вирішення задачі розподілу засобів, який наведений на рисунку, а як вхідні дані використовуються: матриця важливості елементів системи зв'язку  $A_t$ , матриця ймовірності забезпечення стійкого зв'язку  $\omega_{kl}$ , ймовірності незабезпечення стійкого зв'язку  $\varepsilon_{ji}$ , кількість елементів системи зв'язку  $N$ , кількість об'єктів управління  $S$ . На виході алгоритму отримаємо оптимальне значення цільової функції  $F(\delta_0)$  і матрицю послідовності розподілу засобів зв'язку по об'єктах управління  $\|\delta_{ji}^0\|_{NS}$ .



Для визначення важливості того чи іншого об'єкта, з яким необхідно забезпечити зв'язок, доцільно використовувати методи порівняння, аналізу або методи експертних оцінок.

При оптимальному розподілі даних засобів забезпечується максимальне значення цільової функції  $F(x)$ .

#### 4. Висновки

Отримані напрямки вдосконалення системи зв'язку дозволяють:

- раціонально використовувати елементи системи зв'язку;
- оцінювати ефективність вибраного варіанта системи зв'язку;

– визначати раціональну структуру системи зв'язку, в якій забезпечуються максимальні інформаційні можливості;

– визначати склад засобів, а також варіант побудови системи, який забезпечує задану ефективність при відомих умовах забезпечення управління.

*Наукова новизна* роботи полягає в розробці алгоритму вирішення задачі розподілу засобів зв'язку по об'єктах управління.

*Практичне значення отриманих результатів* полягає у можливості їх використання при прийнятті рішення на побудову структури системи зв'язку, а також при організації зв'язку.

**Список літератури:** 1. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 383 с. 2. *Щербина А. П.* Основы теории сетей военной связи: Учебник для слушателей ВАС. Л.: ВАС, 1984. 169 с. 3. *Обеспечение непрерывности связи во фронте, армии, дивизии в динамике операции (боя)* // Информационный сборник по связи и автоматизации. 1987. №17. С.17–40. 4. SEL defense systems. Cernet Broadband Command Post Communications Network // [www.sel.de](http://www.sel.de). 5. *Дискретные оптимизационные задачи и эффективные приближенные алгоритмы* // Техническая кибернетика. 1979. №6. С.9–20.

Надійшла до редколегії 14.06.2009

**Васюта Костянтин Сергійович**, канд. техн. наук, доцент ХУПС. Наукові інтереси: аналіз, системи зв'язку та управління. Адреса: Україна, 61072, Харків, вул. 23 Серпня, 6, тел. 340-79-31.

**Булаєнко Марина Володимирівна** канд. техн. наук, доцент кафедри ПІМ та ІТ ХНАМГ. Наукові інтереси: системний аналіз та управління, прикладна математика. Адреса: Україна, 61072, Харків, вул. 23 Серпня, 6, тел. 707-31-31.

---

УДК 631.432:626.86

*В. Й. ПАСТУШЕНКО, А. М. СТЕЦЕНКО*

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ КРАПЕЛЬНОМУ ЗВОЛОЖЕННІ**

---

Розробляється структура, алгоритм роботи та пропонується технічна реалізація автоматизованої системи управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки при крапельному зволоженні.

### **Вступ**

Системи крапельного зрошення широко використовуються для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур як у теплицях, так і на відкритих ділянках різного розміру, від невеликих приватних садових ділянок до фермерських господарств. Особливість даного типу зрошення у тому, що вода повільно подається краплями або струменями у заданий час і у заданій кількості безпосередньо до коренів кожної рослини. При цьому витрата води зменшується на 20-50% у порівнянні з поверхневим поливом і дощуванням, попереджується надлишковий полив і внаслідок цього підняття рівня ґрунтових вод та засолення ґрунту, не ущільнюється його верхня частина, знижується рівень розростання бур'яну. Для забезпечення потрібного водного режиму у кожен період розвитку рослин необхідно враховувати вплив випадково змінних погодних факторів і щоденно коригувати завдання для системи керування вологістю ґрунту.

*Метою роботи є* підвищення ефективності функціонування системи крапельного зрошення для забезпечення стабільного врожаю сільськогосподарських культур шляхом оперативної корекції заданої вологості ґрунту залежно від погодних факторів.

Для досягнення вказаної мети *у роботі поставлено задачу* розробки структури, алгоритму роботи та технічної реалізації автоматизованої системи керування (АСК) вологістю ґрунту при крапельному зволоженні сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з врахуванням дії стохастичних збурюючих факторів.

## 1. Структура автоматизованої системи керування

Структурну схему автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення наведено на рис. 1.

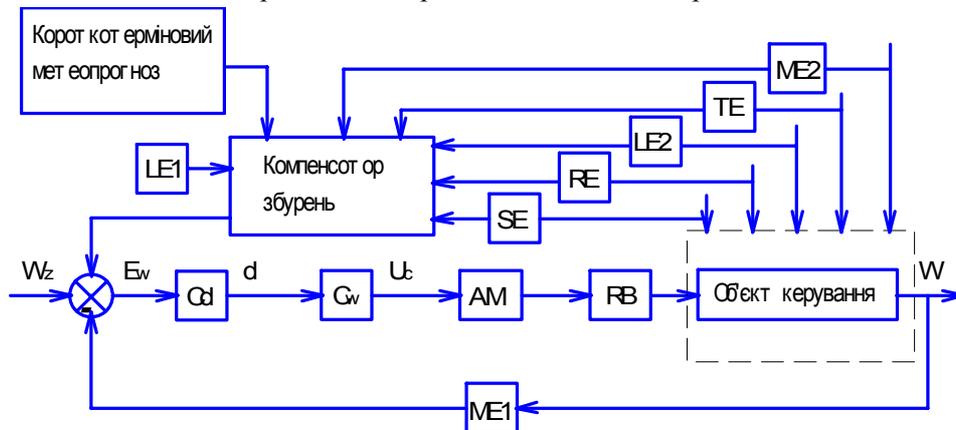


Рис. 1. Структура АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з крапельним зволоженням:  $W_z$  – задана вологість ґрунту,  $W$  – реальна вологість ґрунту,  $E_w = W_z - W$  – розузгодження,  $C_d$  – регулятор частки недополиву рослин,  $d$  – частка недополиву рослин,  $C_w$  – регулятор вологості ґрунту,  $U_c$  – керуючий сигнал, АМ – виконавчий механізм, RB – регулюючий орган. Об'єкт керування – модульна ділянка ґрунту, LE1 – давач появи дощу, ME1 – давач вологості ґрунту, ME2 – давач вологості повітря, TE – давач температури повітря, LE2 – давач опадів, RE – давач освітленості, SE – давач швидкості вітру

Вона являє собою комбіновану систему керування з регулятором, який складається з двох послідовно з'єднаних ланок. Перша ланка визначає допустиму частку недополиву рослин у відсотках, враховуючи дані метеопрогнозу на наступний день. Очевидно, що допустима частка недополиву буде тим більша, чим більше значення прогнозованих опадів. Друга ланка обраховує завдання вологості на поточний день, враховуючи рекомендації першого регулятора, і подає керуючі впливи на виконавчі механізми. При цьому повинна виконуватися нерівність:

$$W > W_{\text{wilting}} + \delta_1, \quad (1)$$

де  $W$  – вологість ґрунту;  $W_{\text{wilting}}$  – вологість зав'ядання рослин;  $\delta_1$  – гістерезис (певний резерв).

Отже, вологість ґрунту повинна триматися в межах:

$$W \in [W_{\text{wilting}} + \delta_1; W_z]. \quad (2)$$

Допустима частка недополиву при цьому становить:

$$\delta \in [0; W_z - (W_{\text{wilting}} + \delta_1)]. \quad (3)$$

Оскільки величина заданої вологості  $W_z$  залежить від виду рослини і фази її розвитку, тобто змінюється в часі, то зручніше спочатку визначити величину недополиву у відсотках ( $x, \%$ ), а потім переводити в абсолютні одиниці за залежністю:

$$\delta = \frac{x \cdot (W_z - W_{\text{wilting}} - \delta_1)}{100}, \text{mm}. \quad (4)$$

Вираз (4) є однаковим для всіх видів рослин і фаз їх розвитку. Змінюватиметься лише значення  $W_z$ .

Для визначення частки недополиву  $x, \%$  пропонується використати алгоритми нечіткої логіки. Як вхідна змінна використовуються дані метеопрогнозу по опадах на наступний день. Вихідною змінною є допустима частка недополиву рослин на поточний день. Як термножина вхідної лінгвістичної змінної використовується множина

$$T_1 = \{ \text{„дуже мала кількість опадів“}, \text{„невеликі опади“}, \text{„помірні“}, \text{„сильні“}, \text{„дуже сильні“} \}, \quad (5.1)$$

або у символному вигляді:

$$T_1 = \{NB, NS, Z, PS, PB\} \quad (5.2)$$

з функціями приналежності, зображеними на рис. 2.

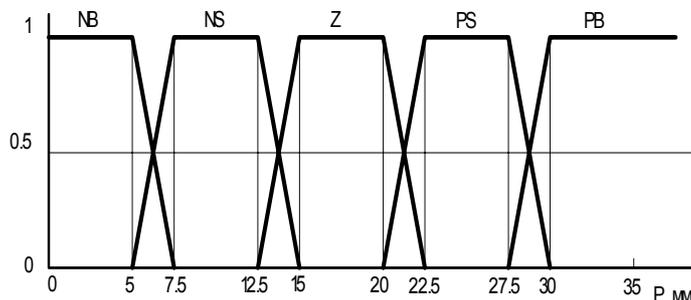


Рис. 2. Функції приналежності змінної «прогнозована кількість опадів»

Як терм-множина вихідної лінгвістичної змінної (величина недополиву у %) використовується множина

$$T_2 = \{\text{„дуже мала”, „невелика”, „середня”, „велика”, „дуже велика”}\}, \quad (6.1)$$

або у символному вигляді

$$T_2 = \{NB, NS, Z, PS, PB\} \quad (6.2)$$

з функціями приналежності, зображеними на рис. 3.

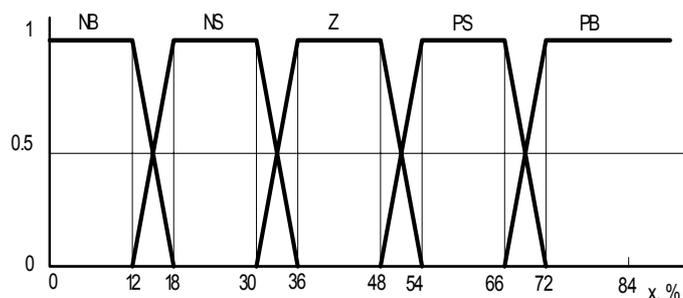


Рис. 3. Функції приналежності змінної «частка недополиву»

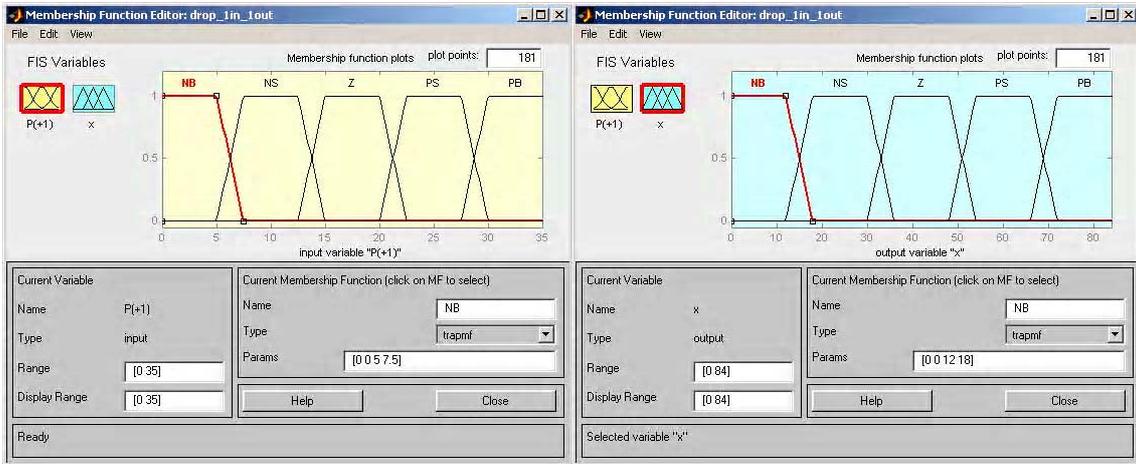
База нечітких лінгвістичних правил для визначення допустимої частки недополиву рослин наведена у таблиці, тобто, чим сильніші прогноуються опади, тим на більшу величину  $\delta$  можна недополити рослини. Крім опадів, на об'єкт керування (ділянку ґрунту) впливають такі збурення: сонячна радіація, вітер, температура повітря, відносна вологість повітря. Впливаючи на випаровування з поверхні рослин та ґрунту, приведені збурення впливають на водоспоживання, а, отже, і на результуючу вологість ґрунту. Дані параметри не входять безпосередньо у базу нечітких лінгвістичних правил, але враховуються системою керування. Так, ми недополили рослини у день  $k$  на величину  $PS$ , розраховуючи на сильні опади у день  $(k + 1)$ . Насправді величина опадів потрапила у діапазон  $Z$ , був помірний вітер і висока температура повітря. В результаті  $W_{k+1} \neq W_{z,k+1}$ . Враховуючи прогноз щодо опадів на день  $(k + 2)$ , буде здійснено полив, який компенсує збурення по температурі, сонячній радіації, нестачі опадів та інших збурень удень  $(k + 1)$ .

База нечітких лінгвістичних правил для визначення частки недополиву рослин при крапельному зрошенні

Прогнозована кількість опадів $P, \text{ мм}$	Частка недополиву рослин $x, \%$
NB	NB
NS	NS
Z	Z
PS	PS
PB	PB

## 2. Синтез системи нечіткого виведення

Для синтезу системи нечіткого виведення використано редактор Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab (рис. 4-6).



а

б

Рис. 4. Редактор функцій приналежності змінних: а – прогнозованої кількості опадів  $P$ , мм; б – частки недополиву рослин  $x$ , %

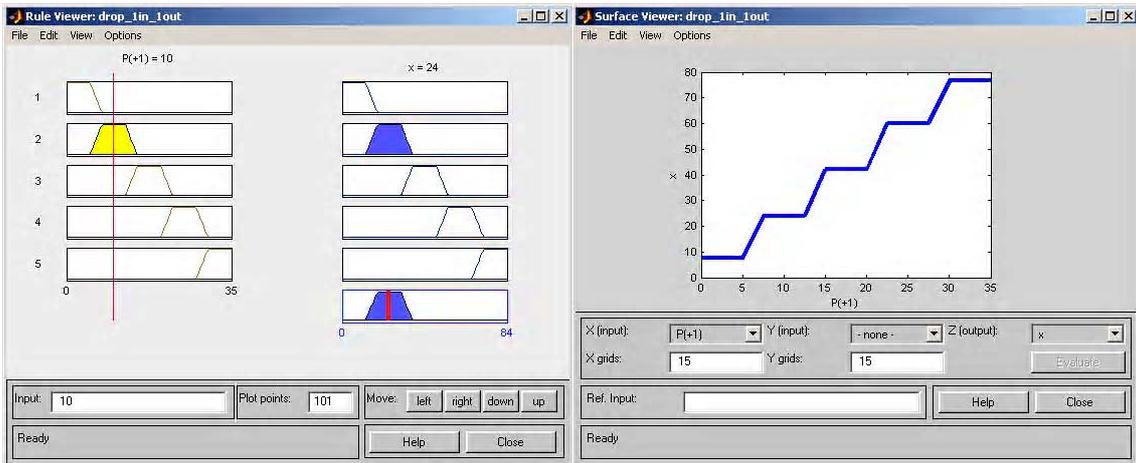


Рис. 5. Вікно перегляду правил (The Rule Viewer)    Рис. 6. Вікно перегляду поверхні (The Surface Viewer)

Розрахунок завдання для АСК вологістю ґрунту при крапельному зрошенні здійснюється щодобово. При появі дощу полив необхідно зупинити (керуючий сигнал  $U_c = 0$ ), а після його закінчення знову здійснити перерахунок завдання. Полив потрібно здійснювати водою певної температури, тому у структурі системи зрошення передбачена накопичувальна ємність, де вода буде нагріватися під дією сонячної радіації. З метою мінімізації експлуатаційних витрат ємність наповнюється водою у періоди доби, коли електроенергія найдешевша. Алгоритм роботи АСК вологістю ґрунту наведено на рис. 7.

## 3. Технічна реалізація АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур

АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні пропонується реалізувати на базі мікропроцесорного блоку, у склад якого входить нечіткий мікроконтролер для визначення допустимої частки недополиву рослин за допомогою нечітких алгоритмів та GSM модуль для отримання даних метеопрогнозу від автоматизованого робочого місця (АРМ) диспетчера, зв'язаного з мережею Internet. Як нечіткий

мікроконтроллер пропонується використати мікроконтроллер PIC16C71 фірми Microchip, який призначений для використання з програмним пакетом FuzzyTech-MP Edition. Даний програмний пакет дозволяє у графічному режимі спроектувати, емулювати систему нечіткого виведення та перетворити її у високооптимізований програмний код мовою Асемблер, придатний для прошивки мікроконтроллера. У середовищі FuzzyTech-MP Edition для одного модуля Microchip можна запроектувати систему нечіткого виведення, яка має до 8 входів та до 4 виходів.

Для отримання даних метеопрогнозу з Internet сайту розроблено програмне забезпечення мовою PHP. У даному випадку PHP-програма зчитує файл з даними метеопрогнозу з Internet сайту weather.co.ua в XML форматі, перетворює його у масив за допомогою функції `simplexml_load_string`. Прогноз метеопараметрів здійснюється на такі години доби: 9:00 (ранок), 15:00 (день), 21:00 (вечір), 3:00 (ніч). У циклі `foreach` здійснюється пошук змінної `$xml->forecast->day`, зчитуються усі необхідні параметри, формується масив `$data`, який включає номер точки і дані прогнозованого параметра, тобто опадів, виконуються необхідні розрахунки, такі як сума значень опадів і сума точок прогнозу. Сила опадів визначається на основі рисунків, які їх відображають, за допомогою оператора `if`. Після цього підраховується середнє арифметичне значення прогнозованих опадів і створюється текстовий файл для запису і читання функцією `fopen`. Дані записуються у файл в табличній формі функціями `fwrite` та `fprintf`. Далі здійснюється закриття файлу функцією `fclose`. Для запуску програми необхідно встановити на комп'ютер PHP сервер, скопіювати програму у папку `www` з ім'ям `index.php` і запустити Internet браузер з адресою:

`http://xml.weather.co.ua/1.2/forecast/66?dayf=1,`

де `http` - протокол гіпертекстової передачі даних, `xml.weather.co.ua` - головний URL сайту погоди, `1.2` - версія XML, `66` - код міста (у нашому випадку це місто Сарни), `1` - кількість днів для прогнозу погоди.

Для крапельного зволоження матимемо таку PHP програму:

```
<?php
$filepath='http://xml.weather.co.ua/1.2/forecast/66?dayf=1';
$xmlstr=file_get_contents($filepath);    $xml=simplexml_load_string($xmlstr);
$zn = $xml->forecast; $rsum=0; $k=0;
foreach ($zn->day as $key=>$value)
{
    $rain=0;
    if($value->pict=='_8_rain_swon.gif') $rain=2.5;
    if($value->pict=='_4_short_rain.gif' || $value->pict=='_7_hail.gif') $rain=10;
    if($value->pict=='_5_rain.gif' || $value->pict=='_9_snow.gif') $rain=17.5;
    if($value->pict=='_6_lighting.gif' || $value->pict=='_10_heavy_snow') $rain=25;
    $rsum=$rsum+$rain; $k=$k+1; $data.=$k."t".$rain."n";
}
//arithmetic means;
$r_am=$rsum/$k;
//to take required variables;
$format="Num Rain \n"; $namefile='forecast.txt';
$fp=fopen($namefile, "w+"); fprintf($fp, $format); fwrite($fp, $data."n"); fprintf($fp, "k Sum \n");
fprintf($fp, "%d %.2f\n", $k, $rsum); fprintf($fp, "\n Arithmetic mean \n");
fprintf($fp, "%.2f", $r_am); fclose($fp);
?>
```

Результат роботи програми:

Період: 21.06.2009.

Num Rain

1	0
2	0
3	17.5
4	0

k Sum

4 17.50

Arithmetic mean

4.38



**Наукова новизна.** При вирішенні поставлених задач вперше запропоновано підхід до автоматизованого управління вологістю ґрунту при крапельному зрошенні з використанням алгоритму оперативної корекції завдання по вологості залежно від випадкових погодних факторів та даних короткотермінового метеопрогнозу на основі механізмів нечіткої логіки.

**Практичне значення роботи.** Запропонована АСК вологозабезпеченості сільськогосподарських культур при крапельному зрошенні дозволить підвищити точність керування завдяки оперативному врахуванню стохастичних збурень на об'єкт і забезпечити отримання планової врожайності при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів.

**Список літератури:** 1. *Леоненков А.В.* Нечёткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. 2005. 719 с. 2. *Справочник по среднему семейству микроконтроллеров PICmicro.* ООО «Микро-Чип», Москва, 2002.

*Надійшла до редколегії 02.06.2009*

**Пастушенко Володимир Йосипович**, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки і автоматики Національного університету водного господарства та природокористування, заступник декана факультету прикладної математики та комп'ютерно-інтегрованих систем. Наукові інтереси: автоматизація технологічних процесів. Захоплення і хобі: футбол, плавання. Адреса: Україна, 33000, Рівне, вул. Євгена Коновальця, 12, кв. 69, тел. +38 (0362) 23-14-60 (робочий), +38 (067) 984-91-01 (мобільний).

**Стеценко Анастасія Михайлівна**, аспірант, асистент кафедри електротехніки і автоматики Національного університету водного господарства та природокористування. Наукові інтереси: автоматизація технологічних процесів. Захоплення: спортивні бальні танці, східні бойові мистецтва. Адреса: Україна, 33024, Рівне, вул. Ювілейна, 3, кв. 19, тел. +38 (067) 88-373-21 (мобільний).

---

УДК 681.326:519.613

*В.И. ХАХАНОВ, С.В. ЧУМАЧЕНКО, Е.И. ЛИТВИНОВА, О.В. ЗАХАРЧЕНКО*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОКРЫТИЯ ДЕФЕКТНЫХ БЛОКОВ РЕЗЕРВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ**

---

Предлагается технология минимального покрытия дефектных блоков резервными компонентами при восстановлении работоспособности логической части цифровой системы на кристалле. Рассматриваются общие положения и правила покрытия для матрицы конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками. Разрабатываются критерии покрытия дефектных ячеек. Приводятся примеры реализации алгоритма.

### **1. Введение**

Миллиарды цифровых систем на кристаллах, используемых в мире, содержат до 16 типов разнообразных компонентов (процессор, память, логика, шины, специализированные вычислители), которые можно разделить на 2 подмножества: память (90%) и логика (10%). При этом дефекты, возникающие в памяти, ремонтируются встроенными средствами достаточно успешно всеми ведущими компаниями (Virage Logic, Intel). Но 10% логики практически не поддаются регулярным решениям в части встроенного ремонта. На сегодня в мире самая большая проблема на рынке электронных технологий – как восстанавливать работоспособность логической части цифровой системы на кристалле. Ввиду высокой рыночной привлекательности в работе рассматривается проблема диагностирования и ремонта памяти и логических ячеек, входящая в топ-десятку актуальных проблем компьютерной инженерии планеты от Gartner research group, путем переадресации неисправных ячеек на исправные компоненты из резервных строк, столбцов и ячеек. Стратегия работает на логических блоках, которые должны быть адресуемыми (и иметь запасные ремонтные блоки) или перепрограммируемыми на исправном пространстве кристалла для осуществления встроенного ремонта. Модели восстановления и ремонта модулей памяти SiP рассматривались в работах [1-6].

Следует также учесть, что уровень продаж компьютеров упал во 2 квартале 2009 года на 8% и составил 66 миллионов штук, но продажа ноутбуков при этом увеличилась на 20%. Что

касается рынка чипов, то здесь фиксируется наивысший подъем продаж за последние 13 лет. Данное обстоятельство подтверждает закон Мура – транзистор сегодня ничего не стоит, платить пользователь будет за энергопотребление. Весь мир видит будущее в цифровых системах на кристаллах. Вывод – все рыночно-ориентированные идеи будут имплементированы в кристалл со специализированной функциональностью. В связи с этим актуальным представляется создание на кристалле инфраструктуры сервисного обслуживания, способной осуществлять встроенное диагностирование и ремонт, что существенно может повысить выход годной продукции и продлить время жизненного цикла цифрового изделия. Поэтому любое новое решение в данной области может быть интересным для рынка электронных технологий, что и определяет актуальность предложенной в исследовании технологии квази-оптимального покрытия дефектных блоков резервными компонентами.

В работе [7] рассматривается оптимизационная задача размещения прямоугольных объектов с переменными метрическими характеристиками в заданной области, когда необходимо разместить набор объектов в полубесконечной полосе без наложений друг на друга так, чтобы величина была минимальной. Предлагаются методы решения задачи и проводится их сравнительный анализ.

В [8] исследуется оптимизационная задача размещения прямоугольных объектов в полосе, выделяются дополнительные свойства математической модели задачи, на основе которых предлагается модификация точного метода решения задачи, основанного на методе ветвей и границ, позволяющая улучшить оценку вычислительной сложности алгоритма. Выделены новые свойства математической модели задачи, на основании чего построена эффективная модификация точного метода решения задачи и улучшена оценка вычислительной сложности алгоритма решения.

Развитию теории и методов оптимизационного геометрического проектирования, в частности, изучению оптимизационной задачи размещения прямоугольных объектов посвящены работы Ю.Г. Стояна (например, [1]).

В статье [10] приведен анализ современных технологий встроенного сервисного обслуживания функциональностей цифровой системы в пакете. Рассмотрены особенности архитектуры «System-in-Package» и существующие стратегии восстановления работоспособности цифровых систем, а также метод оценки надежности восстановления их работоспособности.

В работе [11] рассматривается проблема адаптации технологий тестирования цифровых систем на кристаллах (System on Chip – SoC) для нового конструктивного поколения цифровых систем – System-in-Package (SiP), позволяющего эффективно и компактно имплементировать в кристаллы сверхсложные специализированные вычислительные и радиочастотные устройства для рынка электронных технологий. Вместе с тем пакет кристаллов формирует спектр новых задач сервисного обслуживания SiP-функциональностей в реальном масштабе времени, которое существенно отличается от процессов встроенного диагностирования SoC. В связи с этим предлагается алгебраический метод диагностирования и восстановления работоспособности функциональных логических блоков FPGA, основанный на использовании таблиц неисправностей и их анализе в реальном масштабе времени.

В [12] предлагается метод покрытия дефектных логических блоков цифровых систем на кристаллах ремонтными клетками путем обхода матрицы логических блоков в целях восстановления работоспособности компонентов программируемой логики. Метод позволяет получать решение в виде квазиоптимального покрытия всех дефектных блоков минимальным числом ремонтных клеток. Предлагается выбор одной из двух стратегий обхода строк или столбцов матрицы логических блоков на основании критериев структуризации, определяющих число неисправных блоков, приведенных к фактическому единичному каркасу модифицированной матрицы строк или столбцов.

*Цель исследования* – разработка технологии оптимального покрытия дефектных блоков резервными компонентами при восстановлении работоспособности логической части цифровой системы на кристалле.

*Задачи исследования:*

1) Разработка общих положений и правил покрытия для матрицы конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками.

- 2) Разработка критериев покрытия дефектных ячеек.
- 3) Составление алгоритма, описывающего обход матрицы конфигурируемых логических блоков в целях построения покрытия.
- 4) Примеры реализации алгоритма.

## 2. Общие положения и правила покрытия

Рассматривается матрица конфигурируемых логических блоков с отмеченными дефектными ячейками. В соответствующей ей матрице смежности дефекту отвечает идентификатор 1. При выявлении дефектной ячейки выполняется ее покрытие. Покрывающий элемент представляет собой блок из 9 ячеек, которые образуют квадрат размера  $3 \times 3$ .

Способы покрытия дефектной ячейки. Покрытие дефектной ячейки, которая рассматривается как базовая, можно выполнить 9 способами (рис. 1).

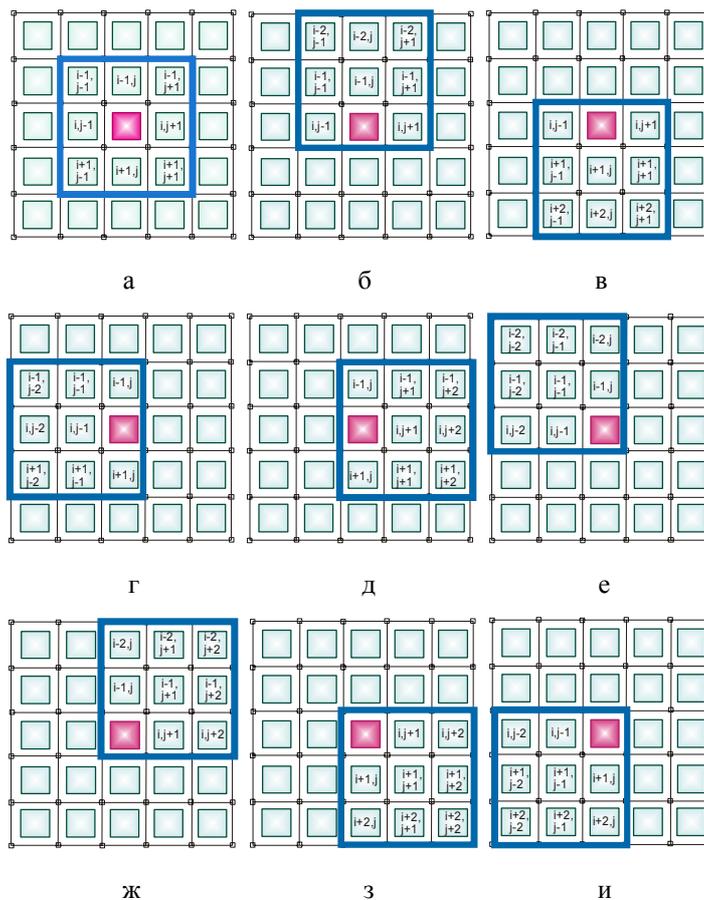


Рис. 1. Способы покрытия дефектной ячейки  $a_{ij}$  :

- $$\begin{aligned}
 \text{а} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i-1,j-1} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j+1} \cup a_{i+1,j-1} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j+1}; \\
 \text{б} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i-1,j-1} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j+1} \cup a_{i-2,j-1} \cup a_{i-2,j} \cup a_{i-2,j+1}; \\
 \text{в} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i+1,j-1} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j+1} \cup a_{i+2,j-1} \cup a_{i+2,j} \cup a_{i+2,j+1}; \\
 \text{г} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j-2} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j-1} \cup a_{i-1,j-2} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j-1} \cup a_{i+1,j-2}; \\
 \text{д} &- a_{ij} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i,j+2} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j+1} \cup a_{i-1,j+2} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j+1} \cup a_{i+1,j+2}; \\
 \text{е} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j-2} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j-1} \cup a_{i-1,j-2} \cup a_{i-2,j} \cup a_{i-2,j-1} \cup a_{i-2,j-2}; \\
 \text{ж} &- a_{ij} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i,j+2} \cup a_{i-1,j} \cup a_{i-1,j+1} \cup a_{i-1,j+2} \cup a_{i-2,j} \cup a_{i-2,j+1} \cup a_{i-2,j+2}; \\
 \text{з} &- a_{ij} \cup a_{i,j+1} \cup a_{i,j+2} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j+1} \cup a_{i+1,j+2} \cup a_{i+2,j} \cup a_{i+2,j+1} \cup a_{i+2,j+2}; \\
 \text{и} &- a_{ij} \cup a_{i,j-1} \cup a_{i,j-2} \cup a_{i+1,j} \cup a_{i+1,j-1} \cup a_{i+1,j-2} \cup a_{i+2,j} \cup a_{i+2,j-1} \cup a_{i+2,j-2}
 \end{aligned}$$

*Ограничения покрытия дефектной ячейки.* Если дефектная ячейка расположена в первых/последних двух строках/столбцах, очевидно, количество способов покрытия для нее ограничивается вариантами, представленными на рис. 2.

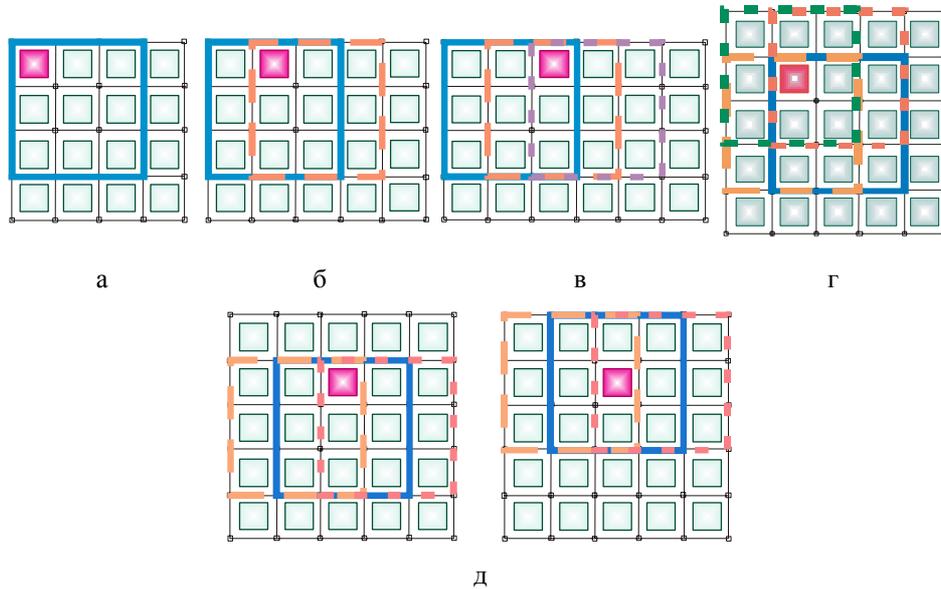


Рис. 2. Ограничения покрытия дефектной ячейки при расположении ее в двух крайних строках/столбцах: а – единственно возможный вариант построения покрытия при попадании дефекта в угловые ячейки  $a_{11}, a_{1,N}, a_{N,1}, a_{N,N}$ ; б – два способа покрытия при попадании дефекта в ячейки  $a_{12}, a_{21}, a_{1,N-1}, a_{N-1,1}, a_{N-1,N}, a_{N,N-1}, a_{2,N}, a_{N,2}$ ; в – три способа покрытия дефектной ячейки при расположении ее на позициях  $a_{13}, a_{31}, a_{1,N-2}, a_{N-2,1}, a_{3,N}, a_{N,3}, a_{N,N-2}, a_{N-2,N}$ ; г – четыре способа покрытия дефектной ячейки при расположении ее на позициях  $a_{22}, a_{2,N-1}, a_{N-1,2}, a_{N-1,N-1}$ ; д – шесть способов покрытия при попадании дефекта в ячейки  $a_{23}, a_{32}, a_{2,N-2}, a_{N-2,2}, a_{3,N-1}, a_{N-1,3}, a_{N-1,N-2}, a_{N-2,N-1}$

Например, в случае попадания дефекта в угловые ячейки  $a_{11}, a_{1,N}, a_{N,1}, a_{N,N}$  (рис. 2,а) существует единственно возможный вариант построения покрытия, определяемый объединением прилегающих ячеек в целях образования соответствующего блока:

$$\text{для } a_{11} - a_{11} \cup a_{12} \cup a_{13} \cup a_{21} \cup a_{22} \cup a_{23} \cup a_{31} \cup a_{32} \cup a_{33};$$

для  $a_{1N}$  –

$$a_{1N} \cup a_{1,N-1} \cup a_{1,N-2} \cup a_{2,N} \cup a_{2,N-1} \cup a_{2,N-2} \cup a_{3,N} \cup a_{3,N-1} \cup a_{3,N-2};$$

для  $a_{N1}$  –

$$a_{N1} \cup a_{N2} \cup a_{N3} \cup a_{N-1,1} \cup a_{N-1,2} \cup a_{N-1,3} \cup a_{N-2,1} \cup a_{N-2,2} \cup a_{N-2,3};$$

$$\text{для } a_{NN} - a_{NN} \cup a_{N,N-1} \cup a_{N,N-2} \cup a_{N-1,N} \cup a_{N-1,N-1} \cup$$

$$\cup a_{N-1,N-2} \cup a_{N-2,N} \cup a_{N-2,N-1} \cup a_{N-2,N-2}.$$

Аналогично можно сформировать описание покрытий для всех вариантов, указанных на рис. 2, б-д.

### 3. Критерии выбора и построения покрытия

При выборе покрывающего элемента предпочтение отдается квадрату с наибольшим весом. Вес определяется числом дефектных ячеек, которые попадают в покрывающий квадрат. Например, на рис. 3 показаны варианты покрытия дефектной ячейки  $a_{ij}$ , когда возможен выбор покрывающего элемента с максимальным весом.

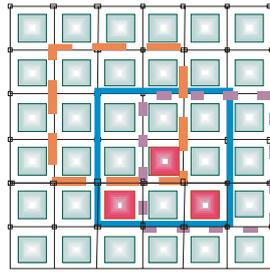


Рис. 3. Выбор покрывающего элемента – квадрата с наибольшим весом (сплошная линия)

*Построчный просмотр матрицы.* При реализации алгоритма построения покрытия выполняется просмотр матрицы по строкам, начиная с первой, в порядке слева направо. Затем осуществляется переход на вторую строку и просмотр элементов матрицы в обратном порядке. Таким образом, строки матрицы с нечетными номерами всегда просматриваются слева направо, после чего выполняется переход на нижнюю строку с четным номером и предпринимается продвижение в обратном порядке – справа налево. Такой просмотр называется галсовым.

Для дефектной ячейки, встречающейся в строке, подбирается покрывающий квадрат с максимальным весом. После этого продолжается просмотр строки в целях выбора покрывающих квадратов для остальных дефектных ячеек данной строки.

При просмотре следующей строки часть дефектных ячеек в ней оказывается уже покрытой, тогда следует подобрать покрывающие квадраты для дефектных ячеек, оставшихся непокрытыми. При этом построенные ранее покрытия ограничивают выбор покрывающих квадратов для остальных дефектных ячеек, т.е. уменьшают в каждом случае их количество, что сокращает время поиска.

В случае, когда существует несколько способов покрытия дефектных ячеек квадратами с одинаковым максимальным весом, выбирается любой из них.

Если на каком-то этапе возникла ситуация, когда невозможно покрыть дефектную ячейку, следует вернуться назад к предыдущей дефектной ячейке в целях изменения ее покрытия квадратом, возможно, меньшего веса. При выборе нового покрытия предпочтение отдается квадрату с меньшим весом, покрывающему две соседние ячейки (расположенные по диагонали либо рядом в строке/столбце) и прилегающему к левому/правому краю (при продвижении слева направо или справа налево соответственно), с целью оставить большее количество свободных ячеек справа/слева соответственно для других покрытий. Другими словами, покрывающий квадрат смещается в сторону уже просмотренных к этому моменту строк/столбцов.

*Просмотр матрицы по столбцам.* Наравне с просмотром по строкам можно использовать продвижение по матрице сверху вниз по столбцам с последующим переходом вправо к соседнему столбцу и затем вверх. Тогда столбцы с нечетными номерами будут просматриваться сверху вниз, а с четными – слева направо. При этом покрытие выбирается аналогично предыдущему также с учетом смещения покрывающего квадрата при возможности в сторону уже просмотренных ячеек.

**Пример 1.** Рассмотрим матрицу конфигурируемых логических блоков с отмеченными дефектными ячейками, представленную на рис. 4.

Согласно алгоритму, выполняется просмотр матрицы построчно. Для каждого дефектного элемента определяется максимальный вес его окрестности и выполняется группировка ячеек по блокам, т.е. объединение в покрытие, с учетом приведенных выше правил.

Просмотр строки с номером  $i=1$  показывает, что оценка веса окрестности дефектного элемента  $a_{1,10}$  равна  $w(a_{1,10}) = 2$ . Тогда следует объединить дефектные ячейки  $a_{1,10}$  и  $a_{28}$  в один покрывающий блок, а именно:

$$a_{18} \cup a_{19} \cup a_{1,10} \cup a_{28} \cup a_{29} \cup a_{2,10} \cup a_{38} \cup a_{39} \cup a_{3,10} .$$

При просмотре строки  $i=3$  видно, что для ячейки  $a_{33}$  могло быть выбрано покрытие квадратом  $a_{33} \cup a_{34} \cup a_{35} \cup a_{43} \cup a_{44} \cup a_{45} \cup a_{53} \cup a_{54} \cup a_{55}$  с максимальным весом

$w(a_{33}) = 3$ . Однако после просмотра строки  $i=4$  справа налево оказалось бы, что дефектная ячейка  $a_{42}$  не может быть покрыта ни одним квадратом (рис. 5, а).

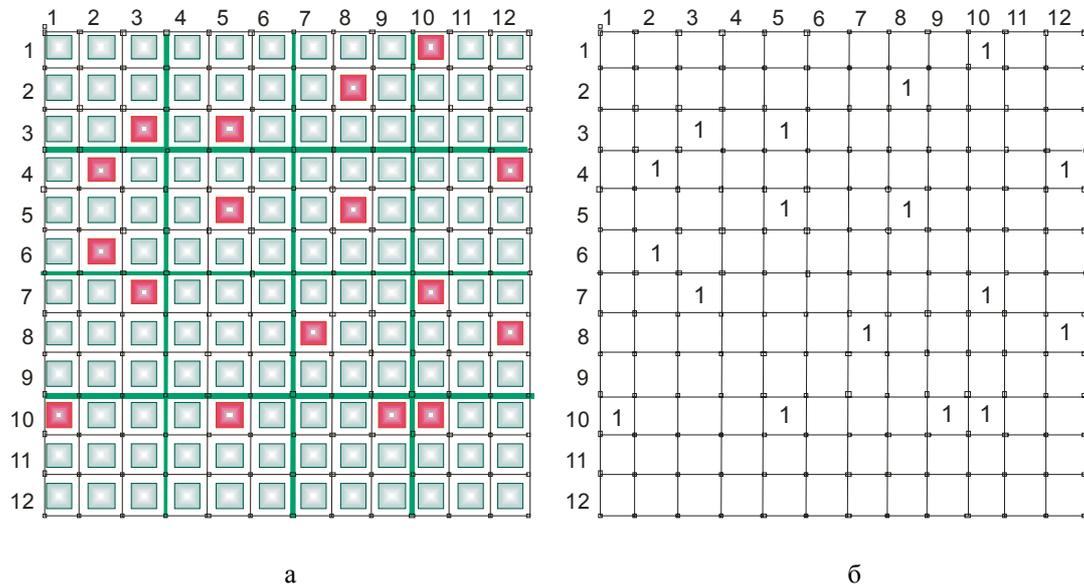


Рис. 4. Иллюстрация к примеру 1: а – матрица логических блоков с дефектными ячейками; б – соответствующая матрица смежности

В этом случае следует вернуться к предыдущей ячейке, которая была покрыта. Если отсутствуют варианты изменения ее покрытия, то следует вернуться к предыдущей ячейке и изменить ее покрытие. На рис. 5,а это ячейка  $a_{33}$ .

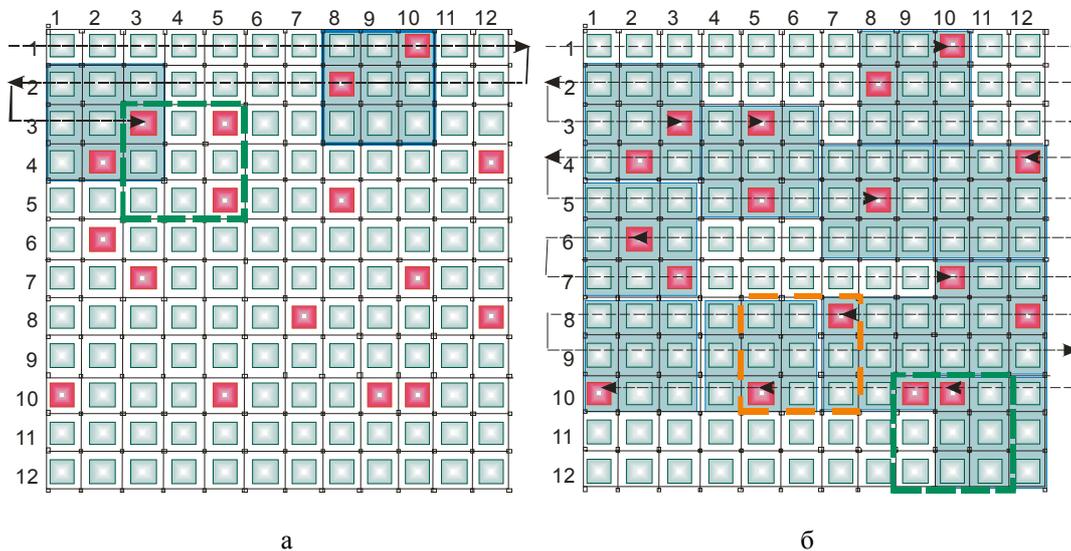


Рис. 5. Выбор покрытия при построчном продвижении

В результате получаем покрытие из 11 квадратов, среди которых 6 имеют вес 2 и 5 – вес 1. Из рис. 5, б видно, что расположенные рядом дефектные ячейки  $a_{10,9}$  и  $a_{10,10}$  можно было бы покрыть элементом:

$$a_{10,9} \cup a_{10,10} \cup a_{10,11} \cup a_{11,9} \cup a_{11,10} \cup a_{11,11} \cup a_{12,9} \cup a_{12,10} \cup a_{12,11}$$

или  $a_{10,8} \cup a_{10,9} \cup a_{10,10} \cup a_{11,8} \cup a_{11,9} \cup a_{11,10} \cup a_{12,8} \cup a_{12,9} \cup a_{12,10}$ .

Тогда при изменении покрытия дефектной ячейки  $a_{87}$  на квадрат

$$a_{8,5} \cup a_{8,6} \cup a_{8,7} \cup a_{9,5} \cup a_{9,6} \cup a_{9,7} \cup a_{10,5} \cup a_{10,6} \cup a_{10,7}$$

получится покрытие из 10 квадратов, среди которых 7 имеют вес 2 и 3 – вес 1 (рис. 6). Именно такое покрытие строится при просмотре матрицы по столбцам (рис. 6,а).

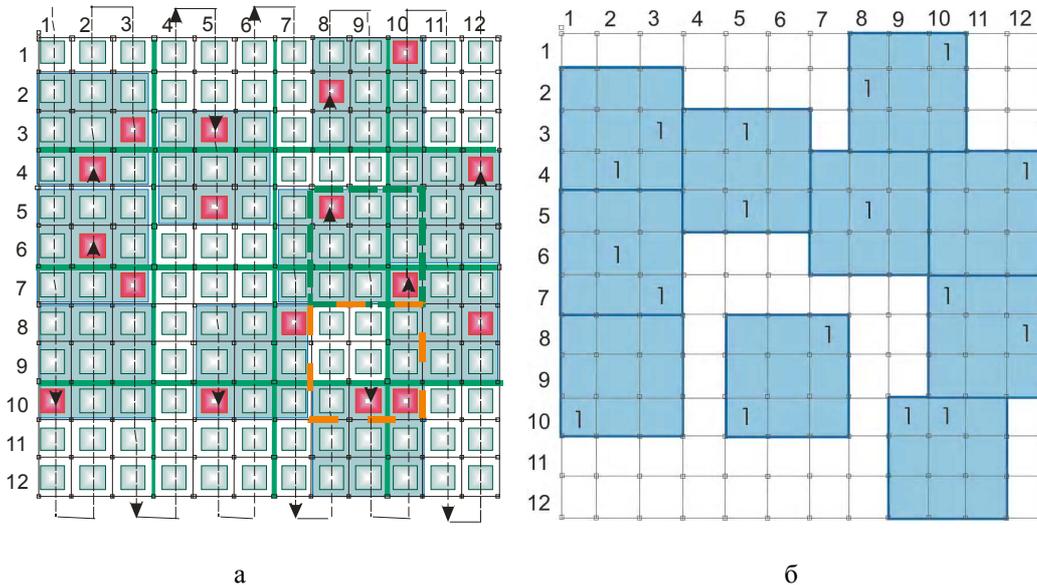


Рис. 6. Оптимальное покрытие матрицы конфигурируемых логических блоков (а) и матрицы смежности (б) для примера 1

Таким образом, в примере 1 при просмотре матрицы по строкам получено квазиоптимальное покрытие, а по столбцам – оптимальное. Как будет показано ниже, построчный просмотр матрицы практически всегда дает оптимальное покрытие.

#### 4. Описание алгоритма

1. Ввести матрицу  $A = [a_{ij}]_1^n$ .
2. Цикл по строкам (для  $i=1$  до  $N$ ).
  - 2.1. Если номер строки нечетный  $i=2k+1$ , то перейти к п. 3 (цикл по столбцам).
  - 2.2. Если номер строки четный  $i=2k$ , то перейти к п. 4 (цикл по столбцам – просмотр столбцов в обратном порядке от  $N$  до 1).
3. Цикл по столбцам (для  $j=1$  до  $N$ ).
4. Цикл по столбцам (для  $j=N$  до 1).
  - 4.1. Вычислить веса соседних по отношению к базовой ячейке квадратов (обращение к ПОДПРОГРАММЕ 1/возврат из ПОДПРОГРАММЫ 1).
  - 4.2. Выбрать в качестве покрывающего квадрат с максимальным весом.
  - 4.3. Исключить из рассмотрения ячейки, образующие покрывающий квадрат (обращение к ПОДПРОГРАММЕ 2/возврат из ПОДПРОГРАММЫ 2).
  - 4.4. Возврат к п. 4 (продолжение просмотра по столбцам).
  - 4.5. Возврат к п. 2 (переход к очередной строке).
5. Вывести результат - оптимальное (квазиоптимальное) покрытие в виде набора покрывающих квадратов, каждый из которых представляет собой объединение 9 ячеек.

ПОДПРОГРАММА 1 осуществляет оценку веса соседних по отношению к базовой дефектной ячейке квадратов.

ПОДПРОГРАММА 2 исключает из рассмотрения ячейки, образующие покрывающий квадрат, но хранит их в памяти в целях выполнения возвращения, если такое потребуется.

#### 5. Примеры реализации алгоритма

Рассмотрим реализацию алгоритма на ряде примеров, где матрицы логических блоков с дефектными элементами сгенерированы случайным образом.

**Пример 2.** Рассмотрим матрицу конфигурируемых логических блоков с отмеченными дефектными ячейками, представленную на рис. 7.

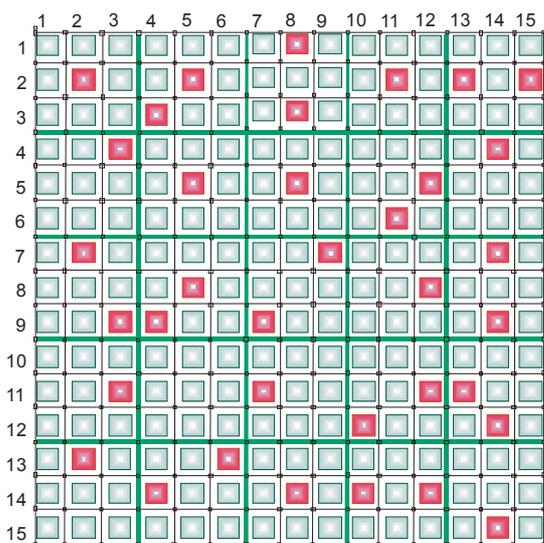


Рис. 7. Матрица логических блоков с дефектными ячейками для примера 2

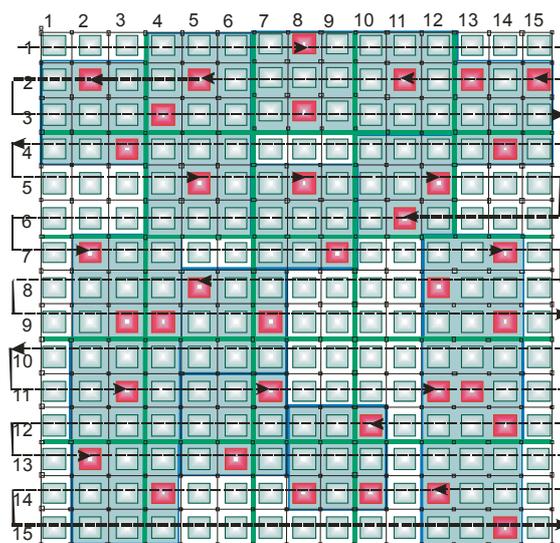


Рис. 8. Маршрут обхода матрицы при построении покрытия

В целях построения покрытия начинаем построчный просмотр матрицы согласно приведенным правилам, критериям и алгоритму. Маршрут прохождения матрицы при построении покрытия приведен на рис. 8. Стрелки на дефектных ячейках показывают, относительно какой базовой ячейки выполняется покрытие (обрамление покрывающими квадратами).

Представленное на рис. 9 оптимальное покрытие матрицы состоит из 17 блоков, из них: 3 имеют вес 1, 9 – с весом 2 и 5 – с весом 3.

**Пример 3.** Рассмотрим варианты покрытия матрицы  $15 \times 15$  конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками (рис. 10).

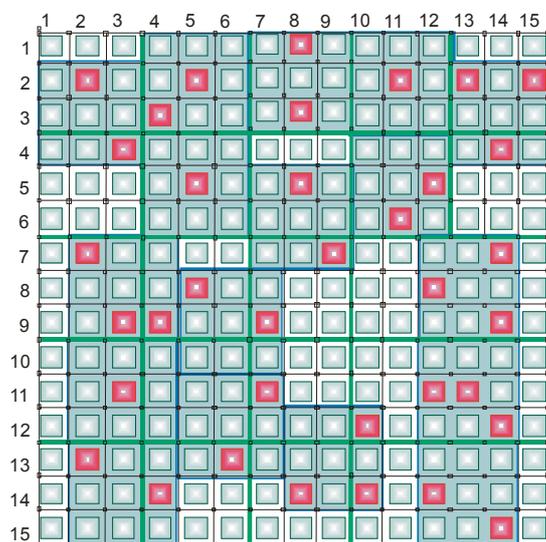


Рис. 9. Оптимальное покрытие матрицы из примера 2

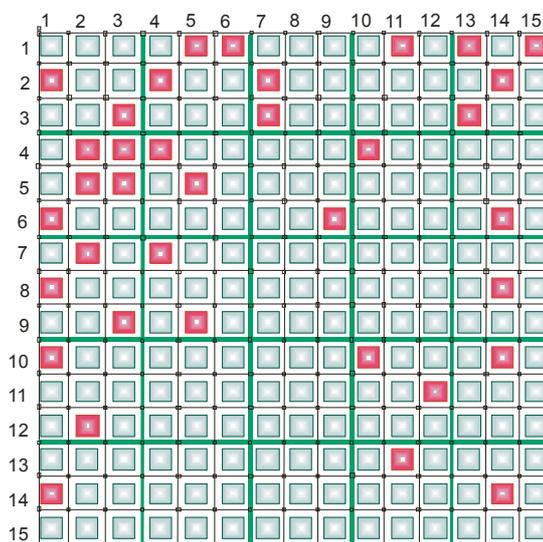


Рис. 10. Матрица  $15 \times 15$  конфигурируемых логических блоков с отмеченными дефектными ячейками

Покрытие, полученное просмотром матрицы построчно, приведено на рис. 11. Оно состоит из 16 квадратов, из которых: 4 с весом 1, 7 – с весом 2, 2 – с весом 3, 3 – с весом 4.

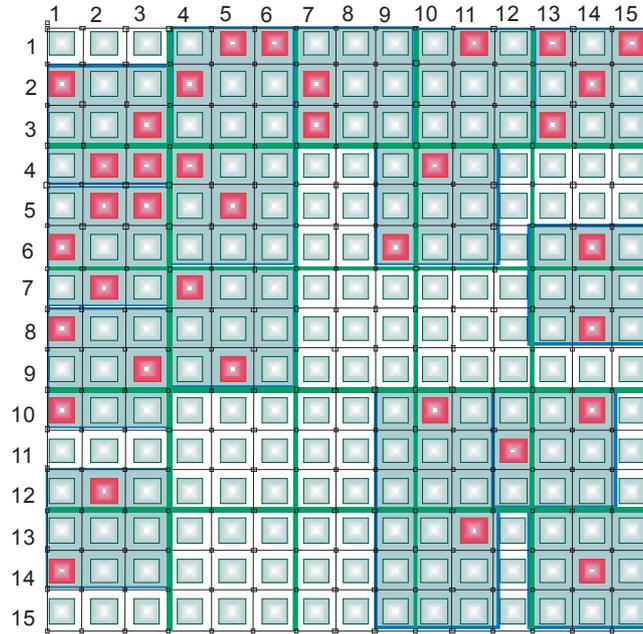


Рис. 11. Покрытие матрицы из рис. 10

На рис. 12 показан результат построения покрытия при просмотре матрицы по столбцам с продвижением слева направо. Здесь также количество покрывающих элементов 16, при этом из них 4 с весом 1, 7 – с весом 2, 2 – с весом 3, 3 – с весом 4.

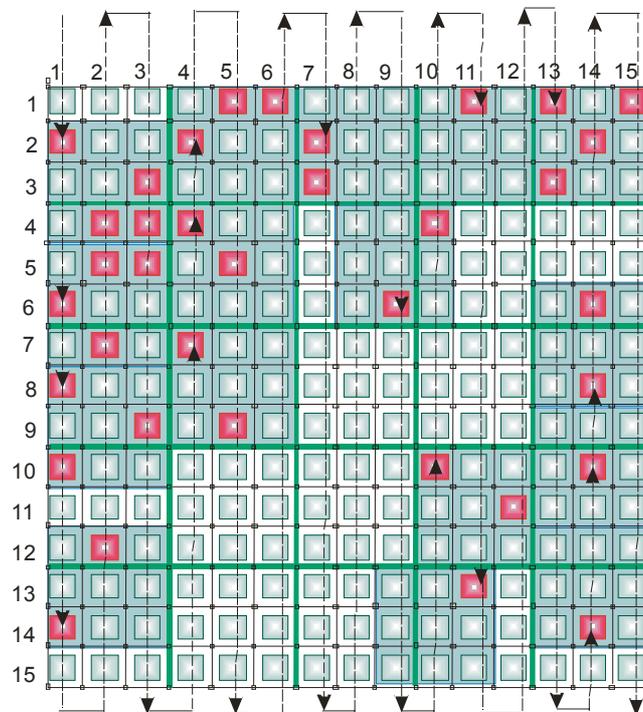


Рис. 12. Продвижение по столбцам при построении покрытия для матрицы на рис. 10

Таким образом, два разных способа продвижения (по строкам и по столбцам) дают количественно одинаковый результат.

**Пример 4.** Рассмотрим построение покрытия для матрицы  $15 \times 15$  конфигурируемых логических блоков, представленной на рис. 13, с отмеченными дефектными ячейками.

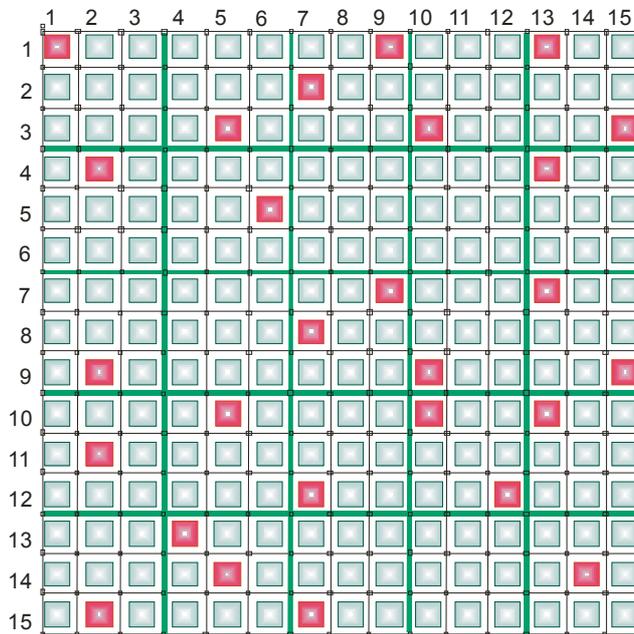


Рис. 13. Матрица конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками

В целях построения покрытия предпримем обход матрицы по строкам. Маршрут и покрытие приведены на рис. 14.

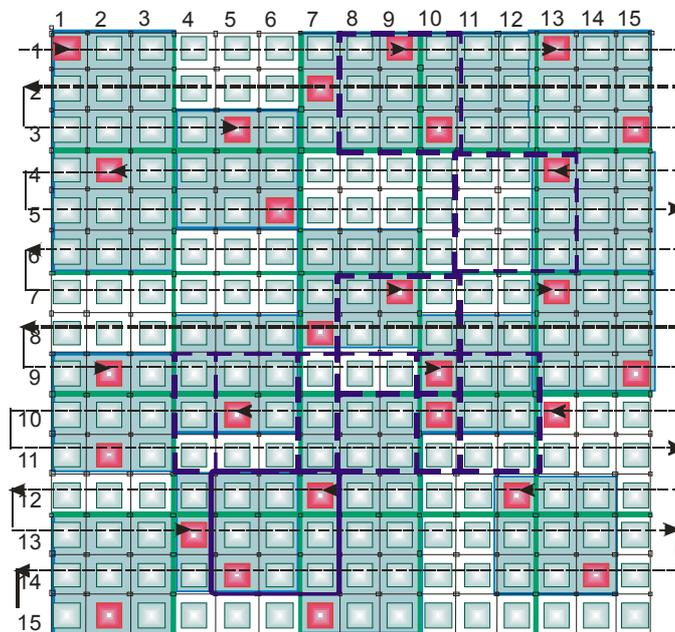


Рис. 14. Продвижение по строкам при построении покрытия для матрицы логических блоков из рис. 13

Пунктирными линиями на рис. 14 показаны покрытия, которые рассматривались при построении, но не были выбраны.

Так, для покрытия дефектной ячейки  $a_{19}$  при просмотре первой строки из двух блоков с весом 2 предпочтение отдается блоку

$$a_{17} \cup a_{18} \cup a_{19} \cup a_{27} \cup a_{28} \cup a_{29} \cup a_{37} \cup a_{38} \cup a_{39},$$

который объединяет часть уже просмотренных в первой строке ячеек (смещается влево по пути обхода строки), а не блоку

$$a_{18} \cup a_{19} \cup a_{1,10} \cup a_{28} \cup a_{29} \cup a_{2,10} \cup a_{38} \cup a_{39} \cup a_{3,10}.$$

При покрытии ячейки  $a_{4,13}$  выбирается блок  $a_{4,13} \cup a_{4,14} \cup a_{4,15} \cup a_{5,13} \cup a_{5,14} \cup a_{5,15} \cup a_{6,13} \cup a_{6,14} \cup a_{6,15}$  с весом 1, а не  $a_{4,11} \cup a_{4,12} \cup a_{4,13} \cup a_{5,11} \cup a_{5,12} \cup a_{5,13} \cup a_{6,11} \cup a_{6,12} \cup a_{6,13}$  с таким же весом, поскольку просмотр четвертой строки выполняется справа налево и первый блок включает уже просмотренные к этому моменту ячейки, т.е. выбираемый блок сдвигается в сторону уже пройденных ячеек – вправо по пути обхода.

Таким образом, оптимальное покрытие матрицы, представленной на рис. 13, состоит из 17 элементов: 8 – веса 1, 9 – веса 2.

**Пример 5.** Для матрицы размера  $15 \times 15$ , приведенной на рис. 15, оптимальное покрытие определяется построчным просмотром и показано на рис. 16.

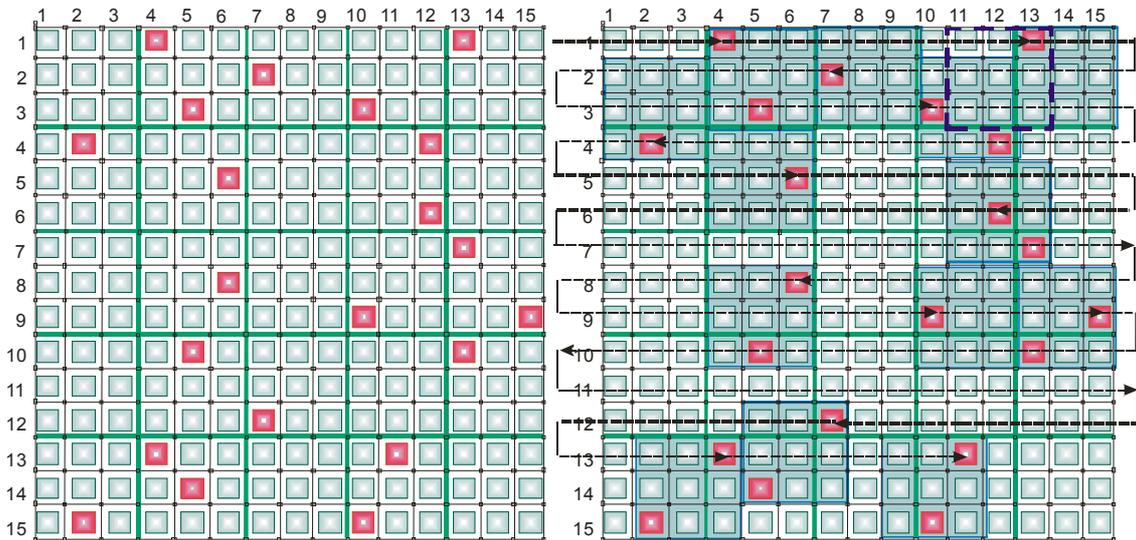


Рис. 15. Матрица конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками      Рис. 16. Обход матрицы при построении покрытия

Покрывание состоит из 13 элементов: 8 – веса 2, 5 – веса 1. При его построении первоначальное покрытие ячейки  $a_{1,13}$  квадратом

$$a_{1,11} \cup a_{1,12} \cup a_{1,13} \cup a_{2,11} \cup a_{2,12} \cup a_{2,13} \cup a_{3,11} \cup a_{3,12} \cup a_{3,13}$$

пришлось изменить на  $a_{1,13} \cup a_{1,14} \cup a_{1,15} \cup a_{2,13} \cup a_{2,14} \cup a_{2,15} \cup a_{3,13} \cup a_{3,14} \cup a_{3,15}$ ,

поскольку при дальнейшем продвижении оказалось невозможным покрыть ячейку  $a_{3,10}$ .

**Пример 6.** Рассмотрим матрицу конфигурируемых логических блоков с дефектными ячейками, представленную на рис. 17, а. Предпримем построчный обход матрицы в целях построения оптимального покрытия дефектных ячеек (рис. 17, б).

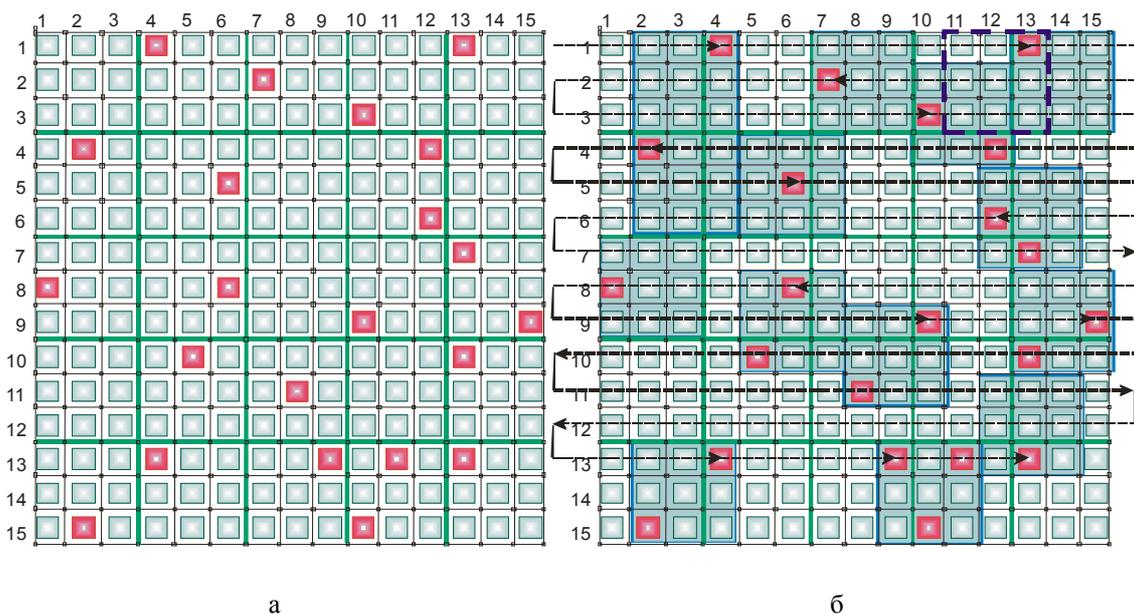


Рис. 17. Матрица с дефектными ячейками (а) и оптимальное покрытие (б)

## 6. Выводы

В результате исследований разработан метод квазиоптимального покрытия неисправных адресуемых ячеек цифровых систем на кристаллах ремонтными клетками, что позволяет существенно повысить выход годной продукции, реализованной в чипах программируемой логики.

Сравнение с аналогами. Существующие аналоги, как правило, ориентированы на оптимизацию размещения компонентов в объемах или на плоскостях. Отличие предложенного метода заключается в оптимизации покрытия неисправных компонентов ремонтными клетками, причем неисправности могут быть соседними или отстоять далеко друг от друга. Поэтому здесь функция цели – минимизировать число ремонтных клеток, которое полностью покроеет все дефектные адресуемые ячейки кристалла.

Научная новизна. Предложенный метод в своей постановочной части обладает определенной оригинальностью. Особенностью алгоритма квазиоптимального покрытия, реализованного в программном коде, является галсовый обход всех ячеек матрицы по строкам (столбцам) в целях определения и выбора оптимального решения задачи покрытия. Выбор покрывающих элементов с максимальным весом и построенные ранее покрытия ограничивают количество покрывающих квадратов для остальных дефектных ячеек, что сокращает время поиска.

Практическая значимость предложенного метода заключается в возможности его применения для встроенного ремонта компонентов цифровых систем на кристаллах, включающих адресуемые ячейки памяти или логические адресуемые блоки. В общем случае данный метод может быть применен для восстановления работоспособности любых адресуемых компонентов, представленных на плоскости.

Перспективы исследований. Имплементация технологии восстановления работоспособности цифровых систем на кристаллах для повышения надежности функционирования и выхода годной продукции в виде изделий, работающих в критических средах, таких как космос, авиация.

**Список литературы:** 1. *Memory Repair Primer – A guide to understanding embedded memory Repair options and issues.* Logic Vision. 2007. 2. *Youngs L., Paramanandam S. Mapping and Repairing Embedded-Memory Defects // IEEE Design and Test of Computers.* 1997. P. 18–24. 3. *Zorian Y., Shoukourian S. Embedded-Memory Test and Repair: Infrastructure IP for SoC Yield // IEEE Design and Test of Computers.* 2003. P. 58–66. 4. *Huang R., Chen Ch., Wu Ch. Economic Aspects of Memory Built-in Self-Repair // IEEE Design & Test.* 2007. P. 164–172. 5. *Choi M., Park N., Lombardi F., Kim Y. B., Piuri V. Optimal Spare Utilization in Repairable and Reliable Memory Cores // 2003 International Workshop on Memory Technology,*

Design and Testing (MTDT'03). 2003. P. 64–71. **6.** Ohler Ph., Hellebrand S., Wunderlich H.-J. An Integrated Built-In Test and Repair Approach for Memories with 2D Redundancy // 12th IEEE European Test Symposium (ETS'07). 2007. P. 91–96. **7.** Новожилова М.В., Чуб И.А., Мурин М.Н. Метод решения задачи размещения прямоугольников с переменными метрическими характеристиками // Радиоэлектроника и информатика. 2008. №4. С. 134-141. **8.** Чуб И.А., Новожилова М.В. Модификация точного метода решения задачи размещения прямоугольных объектов // АСУ И ПА. 2008. Вып. 145. С.57-63. **9.** Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. К.: Наук. думка, 1986. 266 с. **10.** Литвинова Е.И. Технологии встроенного ремонта компонентов System-in-Package // АСУ и приборы автоматики. 2008. Вып. 145. С. 40-48. **11.** Литвинова Е.И. Технологии диагностирования и восстановления System-in-Package // АСУ и приборы автоматики. 2009. Вып. 146. С. 4-21. **12.** Литвинова Е.И. Метод покрытия неисправных логических блоков цифровых систем на кристаллах ремонтными клетками // Радиоэлектроника и информатика. 2009. №1. С.46-49.

Поступила в редколлегию 16.06.2009

**Хаханов Владимир Иванович**, декан факультета КИУ ХНУРЭ, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)-702-13-26. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

**Чумаченко Светлана Викторовна**, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование нелинейных объектов с распределенными параметрами, теория рядов, методы дискретной оптимизации, технологии тестирования знаний. Увлечения: спорт, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)-702-13-26. E-mail: ri@kture.kharkov.ua

**Литвинова Евгения Ивановна**, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и автоматизации производства РЭС и ЭВС ХНУРЭ. Научные интересы: алгоритмизация задач автоматизированного проектирования электронных вычислительных средств, автоматизация диагностирования и встроенный ремонт компонентов цифровых систем в пакете (SiP). Увлечения: плавание, музыка. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421.

**Захарченко Олег Валериевич**, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей. Увлечения: спорт, религиоведение. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326.

УДК 004.932.2

*А.В. ГОРОХОВАТСКИЙ*

## **ПРОЕКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ НОРМАЛИЗАЦИИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Исследуются методы нормализации и распознавания изображений, основанные на признаках проекций. Рассматривается влияние геометрических искажений на радоновский образ, выводятся формальные соотношения для определения параметров нормализации. Предлагаются системы инвариантных признаков для распознавания на основе преобразования Радона и моментных инвариантов. Приводятся результаты компьютерных экспериментов.

### **1. Введение**

Задачи нормализации и распознавания изображений являются ключевыми при решении ряда проблем в интеллектуальных системах компьютерного зрения, связанных с обнаружением и оценкой параметров объектов [1]. Основной трудностью при этом являются различного рода искажения: геометрические, действие фона, шумов. Одним из возможных методов решения таких задач есть использование преобразования Радона (ПР), в результате применения которого изображение представляется в виде совокупности проекций [2, 3]. Достоинства этого направления связаны с высокой информативностью признаков ПР, хорошей помехозащищенностью вследствие интегральных свойств, а также возможностью быстрой обработки за счет перехода в пространство одномерных функций.

Известные подходы к построению инвариантной системы признаков на базе ПР нуждаются в усовершенствовании с точки зрения необходимости оценки влияния преобразова-

ний, обеспечения достаточного качества распознавания и построения признаков для многообразия практических применений.

*Цель исследования* – разработка и оценка характеристик проекционных методов для нормализации и распознавания изображений. *Задачи исследования* – получение аналитических зависимостей влияния геометрических искажений на функции проекций; синтез метода определения параметров искажений для нормализации на базе проекций; разработка метода построения и сопоставления систем инвариантных признаков на основе ПР; сравнение эффективности предложенных подходов с классическими.

## 2. Нормализация геометрических искажений изображений на основе преобразования Радона

Рассмотрим метод определения параметров геометрических искажений изображения для нормализации на базе проекций. Пусть  $a_1, a_2$  – параметры смещений изображения по координатным осям,  $\varphi$  – угол поворота,  $\alpha, \beta$  – параметры масштабирования. Считаем, что геометрические преобразования не выводят функцию яркости изображения за пределы области  $D$  ее определения [1]. Суть ПР состоит в интегрировании функции яркости изображения  $B(x, y)$  вдоль прямых под различными углами  $\theta \in \Theta$ .

Результат влияния наиболее распространенных геометрических преобразований (смещения, повороты и масштабирование) на радоновский образ  $R(p, \theta)$  можно оценить как:

$$R(p, \theta, a_1, a_2) = \int_{x' y'} \int B(x', y') \delta(p - x' \cos \theta - y' \sin \theta + a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta) dx' dy', \quad (1)$$

$$R(p, \theta, \varphi) = \int_{x' y'} \int B(x', y') \delta(p - y' \sin(\theta - \varphi) - x' \cos(\theta - \varphi)) dx' dy', \quad (2)$$

$$R(p, \theta, \alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha \beta} \int_{x' y'} \int B(x', y') \delta(p - \frac{x'}{\alpha} \cos \theta - \frac{y'}{\beta} \sin \theta) dx' dy', \quad (3)$$

$$R(p, \theta, \alpha) = \frac{1}{\alpha} \int_{x' y'} \int B(x', y') \delta(\alpha p - x' \cos \theta - y' \sin \theta) dx' dy', \quad (4)$$

где  $B(x, y)$  и  $B(x', y')$  – исходное и искаженное изображения;  $R(p, \theta, \langle P \rangle)$  – радоновский образ искаженного изображения с параметрами  $\langle P \rangle$ .

Оценку смещений осуществим путем применения функционалов центров тяжести к выражению (1). Определим их для  $R(p, 0^\circ)$  и  $R(p, 0^\circ, a_1, a_2)$ , на основе вычитания которых получим значение параметра  $a_1$ . Аналогично разность центров тяжести для  $R(p, 90^\circ)$  и  $R(p, 90^\circ, a_1, a_2)$  дает значение параметра  $a_2$ . Общие формальные выражения при  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{\sum p R(p, 0^\circ)}{\sum R(p, 0^\circ)} - \frac{\sum p R(p, 0^\circ, a_1, a_2)}{\sum R(p, 0^\circ, a_1, a_2)} ; \\ a_2 = \frac{\sum p R(p, 90^\circ)}{\sum R(p, 90^\circ)} - \frac{\sum p R(p, 90^\circ, a_1, a_2)}{\sum R(p, 90^\circ, a_1, a_2)} . \end{array} \right. \quad (5)$$

Анализ горизонтальной и вертикальной проекций в виде векторов значений является наиболее простым с точки зрения реализации, так как при этом ошибки дискретизации и вычислений незначительны. Использование выражений вида (5) возможно для двух произвольных проекций  $\theta_1, \theta_2$  изображения на основе соотношений

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{\sin \theta_1 (x_{\theta_2}^{ob} - x_{\theta_2}^{et}) + \sin \theta_2 (x_{\theta_1}^{et} - x_{\theta_1}^{ob})}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} ; \\ a_2 = \frac{\cos \theta_1 (x_{\theta_2}^{et} - x_{\theta_2}^{ob}) + \cos \theta_2 (x_{\theta_1}^{ob} - x_{\theta_1}^{et})}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} , \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $x_{\theta_1}^{et}, x_{\theta_2}^{et}, x_{\theta_1}^{ob}, x_{\theta_2}^{ob}$  – центры тяжести проекций с углами  $\theta_1, \theta_2$  для эталона и объекта.

Параметр поворота определяем по неполному представлению преобразования Радона. Если для смещений необходимы значения векторов  $R(p, 0^\circ, a_1, a_2), R(p, 90^\circ, a_1, a_2)$ , то здесь достаточно одного из векторов при фиксированном значении  $p$ , что непосредственно следует из (2).

Функционалы вида (5), (6) применимы в простых ситуациях при низком уровне помех, в более сложных случаях для определения параметров необходимо применение корреляционного подхода, связанного либо со сканированием внутри столбца радоновского образа (при фиксированном параметре  $p$ ), либо с сопоставлением строк образа изображения с одной из строк эталона. Для более надежного определения параметров предлагается выражение

$$\varphi = \min_{\theta} \left( \sum_p |R(p, 0^\circ) - R(p, \theta, \varphi)| \right),$$

использующее интегрирование нескольких проекций. Экспериментальные оценки показывают, что погрешность при определении параметра поворота на основе проекций не превышает шага дискретизации в 2 градуса.

При однородном масштабировании с учетом (4) при  $p = 0$  параметр  $\alpha$  находим из соотношения

$$\alpha = R(p, \theta, \alpha) / R(p, \theta). \quad (7)$$

При этом достаточно использовать лишь одну проекцию. Для обеспечения более высокой точности эффективным есть горизонтальное (вертикальное) направление проектирования. При этом значения функции  $R(p, \theta)$  для множества  $\theta$  применяют для повышения надежности оценки в условиях помех.

Параметр  $\alpha$  можно найти на основе множества всех значений  $p$ , например, в виде:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_p R(p, \theta, \alpha) / \sum_p R(p, \theta)}{}}. \quad (8)$$

Более сложным для теоретического анализа представляется вариант неоднородного масштабирования при  $\alpha \neq \beta$ . В этой ситуации для определения масштабов нужно сформировать и решить систему двух нелинейных уравнений на основе соотношения (3). С этой целью применим пару функционалов:  $\Phi = \int f(u) du$  и  $\Psi = \int u f(u) du$ . Анализ показывает, что одного функционала  $\Phi$  даже для разных углов  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$  недостаточно, так как получаются зависимые между собой уравнения. Применяя интегрирование по переменной  $p$  в (3) и зафиксировав значение  $\theta = 0^\circ$ , на базе функционалов эталона  $\Psi_0, \Phi_0$  и масштабированного образа  $\Psi_{\alpha, \beta}, \Phi_{\alpha, \beta}$  получаем величины неоднородного масштаба

$$\alpha = \Phi_{\alpha, \beta}^2 \Psi_0 / \Phi_0^2 \Psi_{\alpha, \beta}, \beta = \Phi_0 \Psi_{\alpha, \beta} / \Phi_{\alpha, \beta} \Psi_0, \quad (9)$$

где  $\Phi_{\alpha, \beta} = \sum_p R(p, \theta, \alpha, \beta)$ ,  $\Phi_0 = \sum_p R(p, \theta)$ ,  $\Psi_{\alpha, \beta} = \sum_p p R(p, \theta, \alpha, \beta)$ ,  $\Psi_0 = \sum_p p R(p, \theta)$ .

Как видим из (9), для определения параметров достаточно лишь одной проекции изображения при  $\theta = 0^\circ$ .

Рассмотрим теперь изменения радоновского образа под действием комбинаций геометрических искажений, которые значительно усложняют задачу оценки параметров вследствие их взаимного влияния.

При преобразованиях поворота и смещений имеем выражение:

$$R(p, \theta, a_1, a_2, \varphi) = R(p + a_1 \cos(\theta - \varphi) + a_2 \sin(\theta - \varphi), \theta - \varphi). \quad (10)$$

Для комбинации однородного масштабирования и смещений получаем:

$$R(p, \theta, \alpha, a_1, a_2) = \frac{1}{\alpha} R(\alpha p + a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta, \theta). \quad (11)$$

При комбинации преобразований однородного масштабирования и поворота имеем

$$R(p, \theta, \alpha, \varphi) = \frac{1}{\alpha} R(\alpha p, \theta - \varphi). \quad (12)$$

В наиболее сложном случае при одновременном наличии геометрических искажений смещений, поворота и однородного масштаба имеем общее формальное выражение вида:

$$R(p, \theta, \alpha, \varphi, a_1, a_2) = \frac{1}{\alpha} R(\alpha p + a_1 \cos(\theta - \varphi) + a_2 \sin(\theta - \varphi), \theta - \varphi). \quad (13)$$

Используя (12), рассмотрим подход к определению параметров искажений для комбинации поворота и однородного масштабирования. В этом случае ПР позволяет разделить действие отдельных искажений: коэффициент масштабирования  $\alpha$  влияет на значение параметра  $p$  радоновского образа и на величину  $R$ , в то время как угол поворота  $\varphi$  оказывается связан только с параметром  $\theta$ . Это дает возможность выполнить последовательную нормализацию. Аналогичная ситуация возникает при нормализации комбинации, состоящей из масштабирования и поворота (11).

В случае комбинации поворота и смещений происходит «переплетение» параметров согласно (10). Несмотря на это, возможно применение последовательной нормализации, однако с несколько большими вычислительными затратами. Для определения поворота можно использовать, например, выражение:

$$\varphi = \max_{\theta} \sum_p \sqrt{R(p, \theta)} - \max_{\theta} \sum_p \sqrt{R(p, \theta, \varphi)}, \quad (14)$$

после чего выполнить нормализацию смещений.

При наличии полной комбинации геометрических искажений (13) можно использовать два подхода. Первый из них заключается в последовательной нормализации искажений на основе соотношений для оценки отдельных параметров или их модификаций. Второй подход можно реализовать путем определения параметров на основе формальных выражений для двух из трех геометрических искажений попарно.

### 3. Построение систем инвариантных признаков для распознавания

Комбинирование ПР с методами построения инвариантных признаков (моментные инварианты, инварианты на основе преобразования Фурье и т.п.) ускоряет процесс нормализации за счет одномерной обработки. Моментные признаки являются одной из наиболее надежных систем при распознавании визуальных объектов. Рассмотрим метод построения и сопоставления систем инвариантных признаков на основе ПР и моментных инвариантов.

Согласно (1), смещение изображения переходит в смещение проекции при фиксированном значении  $\theta = \hat{\theta}$ , в свою очередь, центральные моменты  $\mu_k$  порядка  $k$  являются инвариантными к смещениям. Таким образом, выражения вида

$$\mu_k = \int_{p'} \left(p' - \frac{m_1}{m_0}\right)^k R(p', \hat{\theta}) dp', \quad m_0 = \int_{p'} R(p', \hat{\theta}) dp', \quad m_1 = \int_{p'} (p' - a_1) R(p', \hat{\theta}) dp', \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

являются инвариантными для всех проекций ПР.

Системы инвариантных признаков для других типов искажения строим из соотношения  $I_k = m_k / (m_0)^z$ , где  $m_k = \int_p p^k R(p, \hat{\theta}) dp$ ,  $m_0 = \int_p R(p, \hat{\theta}) dp$  при фиксированном  $\hat{\theta}$ . При этом параметр  $z$  обеспечивает инвариантность к изменениям масштаба в соответствии с (3), (4). С учетом свойств ПР и (4) имеем

$$m_0 = \int_{p'} \frac{1}{\alpha} R(p', \hat{\theta}) \frac{1}{\alpha} dp', \quad m_k = \int_{p'} \left(\frac{p'}{\alpha}\right)^k \frac{1}{\alpha} R(p', \theta) \frac{dp'}{\alpha}.$$

Подставив значения  $m_0, m_k$  в выражение для  $I_k$ , получим  $z = (k + 2) / 2$ . В результате система инвариантных признаков к комбинации искажений однородного масштабирования и смещений имеет вид:

$$I_k^{\alpha, a_1, a_2} = \mu_k / (\mu_0)^{\frac{k+2}{2}}. \quad (15)$$

В более общем случае при действиях неоднородного масштабирования с параметрами  $\alpha$  и  $\beta$  предлагается использовать систему на основе выражений  $M_k / (m_0)^z$ ,  $M_k = \int p^k (R(p, \hat{\theta}))^z dp$  вида:

$$I_k^{\alpha, \beta, a_1, a_2} = \int_p (R(p, \hat{\theta}))^{k+1} \left(p - \frac{m_1}{m_0}\right)^k dp / (\mu_0)^{k+1}. \quad (16)$$

Как видим, в соотношениях (15) и (16) используются лишь отдельные проекции изображения. Для построения признаков в случае присутствия поворота можно зафиксировать значение  $p = \hat{r}$  и использовать несколько проекций изображения. Заметим, однако, что использование полной проекционной информации для всех значений  $p$  более оправдано из-за большей помехозащищенности. Инвариантными системами при наличии искажений смещений, поворота и масштабирования одновременно будут:

$$I_k^{\alpha, \varphi, a_1, a_2} = \int_{\theta \in \Theta} I_k^{\alpha, a_1, a_2}(\theta) d\theta, \quad I_k^{\alpha, \beta, \varphi, a_1, a_2} = \int_{\theta \in \Theta} I_k^{\alpha, \beta, a_1, a_2}(\theta) d\theta. \quad (17)$$

Особенности сопоставления полученных значений инвариантных признаков предложены в [5]. Экспериментальная погрешность системы вида (17) не превышает 3-4%.

Метод построения и сопоставления систем инвариантных признаков изображений на основе ПР и моментных инвариантов состоит из следующих этапов: выполнение ПР; определение функционалов  $m_k, \mu_k, M_k$ ; вычисление инвариантных значений (15)-(17) в зависимости от типа искажений; сопоставление с эталонными значениями на основе меры близости.

#### 4. Результаты экспериментальных исследований

Количественная оценка качества распознавания с использованием предложенных признаков проводилась следующим образом. Для каждой из групп эталонных изображений (рис. 1) проведено по 30 экспериментов со случайными значениями параметров из диапазонов:  $a_1, a_2 \in [-5; 5]$  (с шагом в 1 пиксель),  $\alpha \in [0,5; 1,2]$  (с шагом 0,05). В таблице приведены результаты исследования вероятности правильного распознавания на базе системы признаков вида (15) до 6 порядка. Для достижения высокой вероятности распознавания достаточно единственной проекции изображения, скорость ее обработки (включая собственно процедуру распознавания) составила 0,4 с.



Рис. 1. Экспериментальные наборы изображений

Искажения	Набор 1	Набор 2	Набор 3	Набор 4
Смещение	1,0	1,0	1,0	1,0
Масштабирование	0,92	0,94	0,88	0,93
Смещение и масштабирование	0,93	0,94	0,88	0,94

Проведены экспериментальные исследования предложенных методов распознавания на примере автомобильного номера (рис. 2). Распознавание реализовано на признаках вида (16), поскольку отсутствует искажение поворота. Время обработки одного символа составляет около 0,12 с (включая сегментацию, выделение, построение признаков и поиск в базе данных эталонов). Размер базы эталонов составил 279 изображений (16 шрифтов кегль 36). Значение порога бинаризации равно 149 и найдено в интерактивном режиме.



Рис. 2. Пример распознавания автомобильного номера

Экспериментальные исследования показали, что предложенный метод нормализации с использованием ПР имеет преимущество по быстродействию в сравнении с классическими подходами. Сравнивая варианты корреляционных методов (классический и с применением ПР), на примере нормализации смещений получен выигрыш более чем в 500 раз, а при нормализации по моментным признакам центров тяжести (классической двумерной и одномерной на основе ПР) – в 4 раза. Использование ПР в комбинации с одномерной корреляцией для нормализации позволяет достигнуть показателя быстродействия в 1,6 раза лучше, чем для метода ПР с использованием центров тяжести. Это дает возможность применять наиболее помехозащищенный корреляционный метод в пространствах Радона без ограничений на объем вычислений.

## 5. Выводы

Применение преобразования Радона и его функциональная обработка позволяют построить системы эффективных признаков, пригодные для нормализации и распознавания визуальных объектов. Сочетание интегральных свойств преобразования Радона с переходом из двумерного пространства изображений в пространство векторов-проекций улучшает показатель быстродействия, в то же время является достаточно помехоустойчивым и позволяет решать реальные задачи компьютерного зрения. Анализ лишь отдельных проекций дает возможность построения признаков в реальном масштабе времени, в то время как анализ нескольких проекций может увеличить достоверность распознавания.

*Научная новизна работы.* В целях повышения эффективности распознавания предложен метод определения параметров геометрических искажений изображений и их комбинаций для нормализации на базе проекций, а также метод построения и сопоставления систем инвариантных признаков изображений на основе ПР и моментных инвариантов.

*Практическая значимость.* Результаты моделирования метода определения параметров на базе проекций показали повышение быстродействия в 4 раза в сравнении с классической нормализацией на основе функциональных центров тяжести и в сотни раз по отношению к классическому корреляционному методу. Построение процедур распознавания на основе предложенных систем признаков уменьшает время распознавания примерно на 40% в сравнении с двумерными классическими признаками при сохранении высокого уровня достоверности. *Перспективы исследования* связаны с построением модификаций методов в случае действия помех локального типа.

**Список литературы:** 1. *Путятин Е.П.* Обработка изображений в робототехнике / Е.П. Путятин, С.И. Аверин. М.: Машиностроение, 1990. 320 с. 2. *Хермен Г.* Восстановление изображений по проекциям. М.: Мир, 1983. 350 с. 3. *Toft P.* The Radon Transform: Theory and Implementation // PhD thesis, Dept. of Math. Modelling Section for Digital Signal Processing, Technical Univ. of Denmark, 1996. 4. *Путятин Е.П.* Построение инвариантных моментных признаков изображений с использованием одномерных проекций / Е.П.Путятин, А.В. Гороховатский // Вестник НТУ «ХПИ». Системный анализ, управление и информационные технологии. 2006. №39. С.125–132. 5. *Гороховатский А.В.* Распознавание изображений на основе признаков проекций / А.В. Гороховатский, Е.П. Путятин // Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы. Донецк, 24-29 сентября 2007: материалы 8-й Межд. научно-техн. конф. Донецк: ИПИИ, 2007. С.203–207.

*Поступила в редколлегию 20.06.2009*

**Гороховатский Алексей Владимирович**, аспирант кафедры информатики Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: анализ и распознавание изображений. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

**ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ IP-СЕТИ**

Дается теоретическое описание диагностической модели IP-сети, которая позволяет представить состояние сети и ее служб в виде набора событий. Каждое событие рассматривается как факт принятия некоторым диагностическим параметром значения из ранее заданного подмножества значений области определения. Описание состояния сети формируется в детерминированные моменты времени. Вводится понятие базы данных диагностической информации, которая состоит из совокупности описаний состояний IP-сети на некотором временном интервале. Проводится классификация источников диагностической информации и определяются типы диагностических параметров.

**1. Введение**

Современные высокоэффективные системы сбора, обработки, передачи и хранения информации в подавляющем большинстве случаев имеют распределенный характер и используют для организации передачи информации пакетные сети, построенные на базе IP-технологий. Ввиду этого важность мероприятий, связанных с контролем функционирования, мониторингом состояния отдельных устройств IP-сети, своевременным реагированием на факты возникновения неисправностей с последующими процедурами локализации и восстановления, является обоснованной.

Неисправное состояние сети передачи данных ведет к невозможности выполнять заданные функции сетевыми службами – основными структурными элементами современных информационных систем. Здесь под службой авторы понимают прикладную задачу, компоненты которой могут выполняться в отдельных аппаратно-программных окружениях и взаимодействуют посредством сети передачи данных. Одним из основных показателей информационной системы и, следовательно, IP-сети как ее составной части, является «доступность» или «коэффициент готовности» [1,2]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma} + T_{\text{НПЛ}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\Sigma}$  – суммарное время, в течение которого сеть работоспособна;  $T_{\text{НПЛ}}$  – суммарное время простоя.

Исходя из порядка расчета  $K_{\Gamma}$  (1), повышение «доступности» означает минимизацию значения  $T_{\text{НПЛ}}$ . Одним из способов уменьшения значения суммарного времени простоя является внедрение современных диагностических средств и эффективных методик диагностирования.

Существующие на сегодня методы диагностирования IP-сети включают в себя многоадресную и одноадресную томографию [3,4,5], выявления неисправностей сети на основе вероятностных рассуждений [6], применение экспертных систем [7] и нейросетевые решения [8]. Перспективным направлением является применение методов Data Mining для поиска закономерностей в работе программных и аппаратных компонентов IP-сетей [9].

*Цель* исследования – разработка диагностической модели IP-сети, которая бы позволяла описать состояние как всей сети, так и отдельной службы в виде, пригодном для формирования на заданном временном интервале базы данных диагностической информации (БДДИ) IP-сети. Полученная БДДИ в дальнейшем может быть использована для выявления с использованием методологии Data Mining закономерностей между значениями диагностических параметров и состоянием служб IP-сети.

**2. Разработка ситуационной модели IP-сети**

В основу разрабатываемой модели положим представление IP-сети в виде множества служб  $S = \{s_1, s_2 \dots s_1 \dots s_L\}, l = \overline{1, L}$ , где  $L$  – общее количество служб.

*Определение 1.* Источником диагностической информации (ИДИ) называется компонент IP-сети, предоставляющий необходимую для определения состояния службы IP-сети информацию в виде диагностических параметров.

Выделим следующие классы ИДИ, которые отличаются по характеру предоставляемой диагностической информации:

– Программные компоненты. В системе диагностики представлены через параметры, которые описывают динамику функционирования вычислительного процесса.

– Аппаратные компоненты. Рассматриваются как множество параметров, отражающих состояние таких объектов как процессор, память, сетевой интерфейс, устройство хранения данных.

– Каналы связи. В качестве диагностических параметров выступают характеристики физической или логической (в случае использования виртуальных каналов) среды передачи между двумя сетевыми интерфейсами. Для получения характеристик обычно используется сетевой анализатор, подключенный непосредственно к каналу связи, или программные средства на основе протокола ICMP.

Далее в работе в качестве ИДИ мы будем рассматривать только те компоненты, которые предоставляют доступ к значениям диагностических параметров посредством протокола SNMP. Данное условие не сужает область применения модели, поскольку на сегодняшний день подавляющее большинство аппаратных и программных компонентов содержит реализацию указанного протокола.

Обозначим совокупность ИДИ в виде множества  $A := \{a_1, a_2, \dots, a_I\}, i = \overline{1, I}$ , где  $I$  – общее количество ИДИ в рассматриваемой IP-сети. ИДИ, поддерживая одну или несколько MIB, может реализовать описанные в ней SNMP-объекты управления в виде переменных, которые содержат текущие значения соответствующих параметров. В данной модели SNMP-объекту управления, значения которого доступны для контроля, может быть представлен в соответствие один или более диагностических параметров.

Рассмотрим SNMP-объект «Число пакетов, полученных с ошибкой», который является обязательным в первой и второй версиях MIB, имеющих на сегодняшний день статус стандартов Интернета (RFC 1156 и RFC 1213). В RFC 1213 переменная, которая должна реализовать указанный выше объект управления, имеет тип «counter» и содержит количество пакетов, полученных с ошибками на текущий момент времени. Упомянутому SNMP-объекту могут быть сопоставлены два диагностических параметра: первый – «число пакетов, полученных с ошибкой», второй – «скорость получения пакетов с ошибками». Последний представляет собой плотность или скорость появления ошибок на определенном промежутке времени и, с точки зрения диагностирования, содержит более полезную информацию.

Диагностические параметры (ДП) по характеру описания свойств компонентов и каналов передачи данных IP-сети можно классифицировать на общие и частные.

*Определение 2.* Частным диагностическим параметром (ЧДП) называется параметр, который отражает индивидуальную характеристику отдельно взятого аппаратного или программного компонента.

Примерами ЧДП являются процент загрузки процессора, объем свободной оперативной памяти, количество пакетов, принятых с ошибками, количество открытых TCP соединений.

*Определение 3.* Общим диагностическим параметром (ОДП) называется параметр, который содержит агрегированную оценку функционирования системы взаимодействующих компонентов.

К классу ОДП относятся такие параметры, как время задержки доставки пакета, доступность службы, джиттер, время реакции при обращении к службе, скорость передачи данных.

Контролируемые диагностические параметры  $a_i$  представим в виде множества:

$$\forall a_i \in A \exists B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ij}, \dots, b_{iJ_i}\}, \quad (2)$$

где  $j_i = \overline{1, J_i}$ ,  $J_i$  – количество диагностических параметров, предоставляемых ИДИ  $a_i$ .

Общее количество контролируемых параметров всех ИДИ:

$$N^B = \sum_{i=1}^I J_i . \quad (3)$$

На основе данных технической документации и результатов наблюдения за процессом функционирования IP-сети человек-эксперт может сформировать множество диагностических параметров  $V(s_1)$ , значения которых в дальнейшем необходимо учитывать в процессе идентификации состояния некоторой службы  $s_1$ . Если для всех служб известны множества  $V(s_1)$ , то для любого параметра  $b_{iji}$  можно определить множество  $S(b_{iji}) \in S$ . Служба  $s_1$  принадлежит множеству  $S(b_{iji})$  только при условии, что параметр  $b_{iji}$  используется в процессе определения ее состояния. Следует заметить, что правильность формирования  $V(s_1)$  и  $S(b_{iji})$  зависит, в первую очередь, от профессионального опыта, умения и навыков человека-эксперта.

*Определение 4.* Собственным параметром службы  $s_1$  называется параметр  $b_{iji}$ , для которого  $|S(b_{iji})|=1$  и  $s_1 \in S(b_{iji})$ .

*Определение 5.* Неопределенным параметром службы  $s_1$  называется параметр  $b_{iji}$ , для которого  $s_1 \notin S(b_{iji})$  или же  $s_1 \in S(b_{iji})$  и  $|S(b_{iji})|>1$ .

«Менеджер» посредством SNMP периодически обращается к «агенту», работающему в аппаратно-программном окружении ИДИ  $a_i$ , с запросом на получение текущего значения параметра  $b_{iji}$ . Теоретически, полученное от «агента» значение запрашиваемого параметра  $b_{iji}$  может быть использовано для описания некоторого состояния службы  $s_1 \in S(b_{iji})$ . Однако, учитывая, что тип переменной, которая реализует SNMP-объект управления, в большинстве случаев является целочисленным на интервале  $[1..4294967295]$ , допустимое количество состояний службы  $s_1$  составляет  $4294967295^{|B(s_1)|}$ . Идентифицировать такое количество состояний для сохранения и проведения последующего анализа является трудоемкой процедурой и нецелесообразно. На практике человек-эксперт разбивает все множество значений параметра на конечное число подмножеств. Каждое подмножество включает, по его мнению, значения, которые параметр принимает при одном и том же состоянии служб  $s_1 \in S(b_{iji})$ .

Пусть  $D(b_{iji})$  – множество значений параметра  $b_{iji}$ , тогда его разбиение может быть записано в виде:

$$D(b_{iji}) = \bigcup_{k_{iji}}^{K_{iji}} D_{ijik_{iji}}(b_{iji}), \quad (4)$$

где  $K_{iji}$  – общее количество подмножеств;  $D_{ijik_{iji}}(b_{iji})$  – подмножество значений параметра  $b_{iji}$ . Чем больше  $K_{iji}$ , тем более точно будет отслеживаться динамика функционирования служб  $s_1 \in S(b_{iji})$ .

В данной модели (рис.1) примем, что множество  $D(b_{iji})$ , а следовательно, и подмножества  $D_{ijik_{iji}}(b_{iji})$ , являются вполне упорядоченным на основе отношения  $<$  строгого порядка. Мощность и состав  $D(b_{iji})$  зависят от типа, указанного в описании SNMP-объекта управления, которому соответствует параметр  $b_{iji}$ .



Рис. 1. Пример задания функций  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$ ,  $K_{ij} = 3$ , на множестве значений  $D(b_{ij})$  параметра  $b_{ij}$  ИДИ  $a_i$

Для каждого  $b_{ij}$  определим множество характеристических функций  $C_{ij}$ , принимающих в качестве аргумента значение из множества  $D(b_{ij})$ :

$$\forall b_{ij} \in V_i \exists C_{ij} = \{c_{ij;1}(b_{ij}), c_{ij;2}(b_{ij}), \dots, c_{ij;k_{ij}}(b_{ij}), \dots, c_{ij;K_{ij}}(b_{ij})\}, \quad (5)$$

где  $k_{ij} = \overline{1, K_{ij}}$ ,  $K_{ij}$  – количество функций, определенных на множестве  $D(b_{ij})$ .

Характеристическая функция обладает следующими свойствами:

- Область значений представляет собой множество  $\{0,1\}$ .
- Являясь суръективной, функция  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$  принимает единичные значения на множестве  $D_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$ , а нулевые – на множестве  $D(b_{ij})/D_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$ .
- В общем случае имеет вид:

$$c_{ij;k_{ij}}(b_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{значение } b_{ij} \text{ принадлежит множеству } D_{ij;k_{ij}}(b_{ij}); \\ 0, & \text{значение } b_{ij} \text{ принадлежит множеству } D(b_{ij})/D_{ij;k_{ij}}(b_{ij}). \end{cases} \quad (6)$$

Для каждого  $b_{ij}$  определим вектор, который содержит результаты выполнения функций из  $C_{ij}$ :

$$\forall b_{ij} \in V_i \exists V_{ij} = [v_{ij;1} \in \{0,1\}, v_{ij;2} \in \{0,1\}, \dots, v_{ij;k_{ij}} \in \{0,1\}, \dots, v_{ij;K_{ij}} \in \{0,1\}]. \quad (7)$$

*Определение 6.* Факт получения вектором  $V_{ij}$  результатов выполнения функций из  $C_{ij}$  называется событием.

Исходя из указанных ранее свойств функции  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$ , справедливо следующее:

$$\forall V_{ij} \sum_{k=1}^{K_{ij}} v_{ij;k} = 1, \quad (8)$$

т.е. в заданный момент времени для объекта  $a_i$  в отношении параметра  $b_{ij}$  только одна функция из  $C_{ij}$  принимает единичное значение. Следовательно, общее количество событий, инициируемых в отношении заданного параметра, равно  $K_{ij}$ .

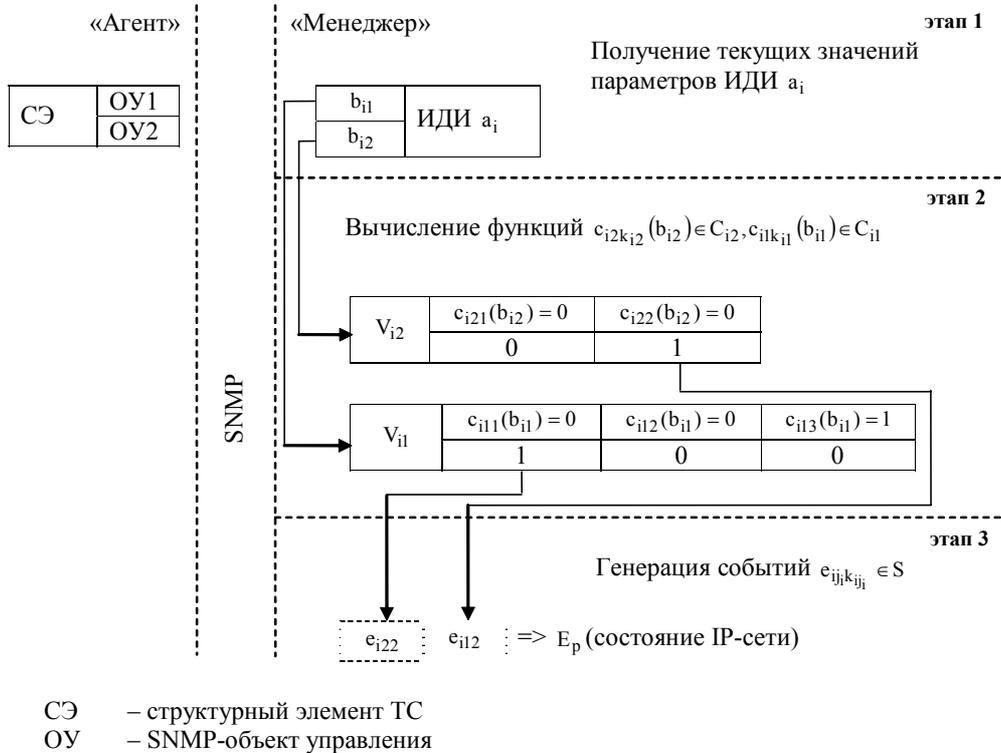


Рис. 2. Модель генерации события  $e_{ij;k_{ij}} \in E$

Из сказанного выше следует, что для обозначения индекса события, которое инициировано параметром  $b_{ij}$  объекта  $a_i$ , можно использовать систему индексирования «объект – параметр – функция». Множество событий, инициируемых объектами  $a_i$ , опишем как  $E = \{e_{i11}, e_{i12}, \dots, e_{ij;k_{ij}}, e_{iJ;K_{ij}}\}$ , где  $e_{ij;k_{ij}}$  – событие, для которого вектор  $V_{ij}$  имеет вид:  $V_{ij} = [0, 0, \dots, d_{ij;k_{ij}} = 1, \dots, 0]$  или в отношении функции  $c_{ij;k_{ij}}$  можно сделать вывод:  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij}) = 1$ .

Общее количество событий  $e_{ij;k_{ij}} \in E$  равно:

$$N^E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} K_{ij} . \quad (9)$$

Выделим отдельно подмножество  $E(s_1) \subset E$ , элементами которого являются события, представляющие собой факт принятия того или иного значения параметрами  $B(s_1)$ .

Следует заметить, что генерация событий происходит не на стороне SNMP-«агента», а в вычислительной среде модуля системы диагностики, который реализует функции «менеджера». Как показано на рис. 2, модуль периодически и поэтапно выполняет следующие действия:

– отправляет запрос SNMP-«агентам» на получение текущих значений параметров  $b_{ij} \in B_i$ ;

– вычисляет значение функций  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij}) \in C_{ij}$  для полученных на первом этапе значений параметров  $b_{ij} \in B_i$ ;

– формирует вектор  $V_{ij}$  и на основе его данных генерирует событие  $e_{ij;k_{ij}} \in E$ .

Обозначим моменты времени начала выполнения модулем перечисленных выше действий в виде множества  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_p\}, p = \overline{1, P}$ , где  $p$  – количество раз выполнения модулем перечисленных выше этапов. В каждый момент времени  $t_p$  сгенерированные на третьем этапе события формируют множество  $E_p \subset E$ .

*Определение 7.* Множество событий  $E_p \subset E$  будем называть описанием состояния IP-сети в момент времени  $t_p$ .

*Определение 8.* Множество событий  $E_p(s_1) = E_p \cap E(s_1)$  будем называть описанием состояния службы  $s_1$  в момент времени  $t_p$ .

Очевидно, что все события  $e_{ij;k_{ij}} \in E_p$  имеют одинаковое время возникновения, а общее количество состояний IP-сети, которые можно описать, используя изложенную выше событийно-ориентированную модель, равно:

$$N^\Omega = \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^{J_i} K_{ij}. \quad (10)$$

*Определение 9.* Базой данных диагностической информации (БДДИ) называется набор  $\Psi$  записей вида  $\Psi_p = (E_p, p)$ , где  $E_p$  – совокупность событий, которые описывают значения диагностических параметров в момент времени  $p$ .

*Определение 10.* Ситуационной моделью IP-сети для целей формирования БДДИ называется модель, представляемая объектами:

$$M_{co} = \left\langle S, A \{B_i \{C_{ij}, D_{ij}, V_{ij}, \{e_{ij;k_{ij}}\}_{k_{ij}}^{K_{ij}}\}_{j=1}^{J_i}\}_{i=1}^I, T, \Psi \right\rangle. \quad (11)$$

### 3. Выводы

Обобщим приведенные в статье выкладки в виде следующих ключевых особенностей модели (11):

– IP-сеть представляется в виде конечного множества служб  $S$  и ИДИ  $A$ . Каждый ИДИ  $a_i \in A$  в свою очередь является совокупностью доступных для контроля параметров  $b_{ij} \in B_i$ .

– Событие  $e_{ij;k_{ij}} \in E$  есть факт принятия параметром  $b_{ij}$  ИДИ  $a_i$  значения из множества  $D_{ij;k_{ij}} \subset D(b_{ij})$  или, используя аппарат характеристических функций, факт принятия функцией  $c_{ij;k_{ij}}(b_{ij})$  единичного значения.

– События генерируются в строго определенные моменты времени  $t_p \in T$  и формируют множество  $E_p \subset E$ .

– Состояние IP-сети в момент времени  $t_p \in T$  описывается множеством  $E_p \subset E$ .

– Состояние службы  $s_1$  в момент времени  $t_p \in T$  описывается множеством  $E_p(s_1) \subset E(s_1)$ .

– На заданном временном интервале  $(t_p - t_1)$  транзакции  $\Psi_p = (E_p, p)$  формируют БДДИ IP-сети.

*Научная новизна* исследования состоит в разработке новой диагностической модели IP-сети (11), которая позволяет сформировать БДДИ для дальнейшего применения методов Data Mining в целях выявления закономерностей в процессе функционирования аппаратных и программных компонентов IP-сети.

*Практическая ценность* предложенной диагностической модели вытекает из возможности ее использования в процессе разработки методики определения состояния IP-сети и ее служб, а также новых методов диагностирования, в основе которых лежит применение подходов искусственного интеллекта и Data Mining.

**Список литературы:** 1. *Ермаков А.А.* Основы надежности информационных систем: учебное пособие. Иркутск: ИрГУПС, 2006. 151с. 2. *Черкесов Г.Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. СПб.: Питер, 2005. 479с. 3. *Coates M., Hero A., Nowak R., Yu B.* Internet Tomography / IEEE Signal Processing Magazine, May 2002. 4. *Caceres R., Duffield N.G., Horowitz J., Towsley D.* Multicast-based inference of network-internal loss characteristics. IEEE Transactions on Information Theory 45 (1999) 2462–2480. 5. *Adams A.* The Use of End-to-end Multicast Measurements for Characterizing Internal Network Behavior / A. Adams, T. Bu, R. Caceres, N. Duffield, J. Horowitz, F. Lo Presti, S. B. Moon, V. Paxson, D. Towsley – CiteSeer. Scientific Literature Digital Library and Search Engine. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.41.2318>. 6. *Katzela I.* Schemes for fault identification in communication networks [Текст] / I. Katzela, M. Schwartz // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1995. Vol.3. P.753—764. *katzela95schemes.pdf*. 7. *Кучер А.В.* Динамический анализ и диагностика состояния IP-сети [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / А.В.Кучер. М.: РГБ, 2007 (Из фондов Российской Государственной библиотеки). Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0616/050616043.pdf>. 8. *Поморова О.В.* Теоретичні основи, методи та засоби інтелектуального діагностування комп'ютерних систем [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.13 / О.В.Поморова; [Національний університет «Львівська політехніка»]. Львів, 2007. 29с. 9. *Klemettinen M.* Rule discovery in telecommunication alarm data [Текст] / M. Klemettinen, H. Mannila, H. Toivonen // Journal of Network and Systems Management. 1999. Vol.7(4). P. 395-423. 10.1.1.7.7471.pdf.

*Поступила в редколлегию 22.05.2009*

**Соколов Сергей Алексеевич**, канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка информации в телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61000, Харьков, тел. 8-577-342-22-84.

**Стокипный Александр Леонидович**, офицер отдела связи и автоматизации Восточного регионального управления Государственной пограничной службы Украины, соискатель ХУПС. Научные интересы: применение методов ИИ в современных телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Героев Труда, 46, кв.183, тел. 8-067-573-19-16.

**Голдаев Алексей Витальевич**, студент 5 курса факультета Компьютерной инженерии и управления ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Гвардейцев Широинцев, 81, кв. 48, тел. 8-099-066-31-44.

---

УДК 519.7

*А.Н. ГВОЗДИНСКИЙ, С.В. МЕЛЬНИК*

## **ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА**

---

Рассматривается оптимизационный класс задач транспортного типа. Описывается классический способ решения – метод потенциалов, исследуется новый алгоритм на основе генетических алгоритмов, позволяющий находить оптимальный план перевозок с большей продуктивностью.

### **Введение**

Сейчас, во времена свободного рынка, очень острой стала проблема оптимизации на производстве, в бизнесе. Из-за сильной конкуренции все стремятся минимизировать свои затраты на производство, перевозку, тем самым повысить конкурентоспособность своего продукта или услуги.

Чтобы достичь наибольшего эффекта, имея ограниченные средства, надо составить план, или программу действий. Раньше план в таких случаях составлялся “на глаз”. В середине XX века был создан специальный математический аппарат, помогающий это

делать обоснованно, с максимальным результатом. Соответствующий раздел математики называется математическим программированием.

Транспортная задача является представителем класса задач линейного программирования, поэтому обладает всеми качествами линейных оптимизационных задач, но одновременно она имеет и ряд дополнительных полезных свойств, которые позволили разработать специальные методы ее решения.

*Актуальность работы.* Транспортная задача линейного программирования получила в настоящее время широкое распространение в теоретических обработках и практическом применении на транспорте и в промышленности. Особенно большое значение она имеет в деле рационализации постановок важнейших видов промышленной и сельскохозяйственной продукции, а также оптимального планирования грузопотоков и работы различных видов транспорта.

Сейчас, в XXI веке, когда наблюдаются тенденции всемирной глобализации рынка, границы между государствами стираются. Компаниям, которые раньше работали в пределах одной страны, теперь открывается возможность расширяться, обслуживать целый материк или всю планету. Фирмы, занимающиеся международными перевозками, уже ощутили значительный рост объема обрабатываемой информации вместе с ростом количества пунктов отправления и назначения. В таких условиях классические методы линейного программирования, которые так эффективно помогали нам в XX веке, не обеспечивают достаточной скорости вычислений в реальном времени. Пришло время перейти на качественно новый уровень решения подобных задач.

Последнее время проявляется тенденция использования естественных аналогов при создании моделей, технологий, методик, алгоритмов для решения тех или иных задач, стоящих перед человечеством. В большинстве случаев использование естественных аналогов дает положительные результаты. Как правило, это объясняется тем, что аналог, взятый из природы, совершенствовался в течение многих лет эволюции и имеет на данный момент самую совершенную в своем роде структуру.

*Целью* данной работы является выяснение применимости генетических алгоритмов к решению задачи закрепления поставщиков за потребителями, разработка алгоритмов, а также сравнительный анализ производительности классических и методов, использующих вероятностный подход.

*Задачей исследования* является изучение существующих методов решения указанной задачи, разработка нового метода и их сравнение.

## **1. Модель задачи**

Транспортные модели – специальный класс задач линейного программирования. Эти модели часто описывают перемещение (перевозку) какого-либо товара из пункта отправления (исходный пункт, например место производства) в пункт назначения (склад, магазин, грузохранилище). Назначение транспортной задачи – определить объем перевозок из пунктов отправления в пункты назначения с минимальной суммарной стоимостью перевозок. При этом должны учитываться ограничения, налагаемые на объемы грузов, имеющихся в пунктах отправления (предложения), и ограничения, учитывающие потребность грузов в пунктах назначения (спрос). В транспортной модели предполагается, что стоимость перевозки по какому-либо маршруту прямо пропорциональна объему груза, перевозимого по этому маршруту. В общем случае транспортную модель можно применять для описания ситуаций, связанных с управлением запасами, управлением движением капиталов, составлением расписаний, назначением персонала и др.

Хотя транспортная задача может быть решена как обычная задача линейного программирования, ее специальная структура позволяет разработать алгоритм с упрощенными вычислениями, основанный на симплексных отношениях двойственности.

Решение задачи состоит в определении неизвестного плана перевозок, минимизирующего суммарные транспортные расходы и удовлетворяющего ограничениям, налагаемым на объемы грузов в пунктах отправления (предложения) и пунктах назначения (спрос).

Постановка классической транспортной задачи звучит так: от  $m$  поставщиков ( $A_1, A_2, \dots, A_m$ ) автомобилями с некоторой грузоподъемностью автотранспортное предприятие перевозит однородные грузы  $n$  потребителям ( $B_1, B_2, \dots, B_n$ ). Объемы поставки и потребления, а также стоимость транспортировки приведены в таблице.

Поставщики	Потребители				Запасы
	$B_1$	$B_2$	...	$B_n$	
$A_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	...	$c_{1n}$	$a_1$
$A_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	...	$c_{2n}$	$a_2$
...	...	...	...	...	...
$A_m$	$c_{m1}$	$c_{m2}$	...	$c_{mn}$	$a_m$
Заявки	$b_1$	$b_2$	...	$b_n$	

Необходимо определить потребности в автомобилях, которые необходимы для выполнения плана перевозок.

В случае закрытой модели весь имеющийся в наличии груз развозится полностью, и все потребности заказчиков полностью удовлетворены:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j, \quad (1)$$

где  $a_i$  – количество груза на  $i$ -м складе,  $b_j$  – потребность в грузе  $j$ -го потребителя.

Количество груза, имеющегося на каждой из  $m$  баз, обозначается  $a_1, a_2, \dots, a_m$ . Заказы каждого из потребителей обозначаются как  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . Соответственно,  $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}, c_{21}, c_{22}, \dots, c_{mn}$  – стоимость перевозки единицы груза от  $i$ -го поставщика к  $j$ -му потребителю. Требуется найти такой план перевозок, при котором все запасы будут израсходованы, заявки удовлетворены, а общая стоимость транспортировок была бы минимальной.

## 2. Метод потенциалов

Для начала найдем опорный план (неоптимальный, служащий базой для начала итераций) методом северо-западного угла. В данном методе запасы очередного поставщика используются для обеспечения запросов очередных потребителей до тех пор, пока не будут исчерпаны полностью, после чего используются запасы следующего по номеру поставщика.

Заполнение таблицы транспортной задачи начинается с левого верхнего угла и состоит из ряда однотипных шагов. На каждом шаге, исходя из запасов очередного поставщика и запросов очередного потребителя, заполняется только одна клетка и соответственно исключается из рассмотрения один поставщик или потребитель.

Сущность метода состоит в следующем. Пользуясь таблицей, будем распределять груз, начиная с загрузки левой верхней, условно называемой северо-западной, ячейки, двигаясь затем от нее по строке вправо или по столбцу вниз. В клетку (1; 1) занесем меньшее из чисел  $a_1, b_1$ , т. е.  $x_{11} = \min(a_1, b_1)$ . Если  $a_1 > b_1$ , то  $x_{11} = b_1$  и первый потребитель  $B_1$  будет полностью удовлетворен. В дальнейшем 1-й столбец таблицы в расчет не принимается; в нем переменные  $x_{i1} = 0$  для  $i = \overline{2, m}$ .

Двигаясь вправо по первой строке таблицы, заносим в соседнюю клетку меньшее из чисел  $(a_1 - b_1)$  и  $b_2$ , т. е.  $x_{12} = \min(a_1 - b_1, b_2)$ . Если  $(a_1 - b_1) < b_2$ , то запасы первого поставщика исчерпаны и первая строка таблицы в дальнейшем в расчет не принимается. Переходим к аналогичному распределению запаса груза второго поставщика.

Если  $b_1 > a_1$ , то  $x_{11} = \min(a_1, b_1) = a_1$ . При этом запас первого поставщика будет исчерпан, а потому  $x_{1k} = 0$  для  $k = \overline{2, n}$ . Первая строка из дальнейшего рассмотрения исключается. Переходим к распределению запасов второго поставщика. В клетку (2; 1) заносим наименьшее из чисел  $(a_2, b_1 - a_1)$ .

Процесс распределения по второй, третьей и последующим строкам (столбцам) производится аналогично распределению по первой строке или первому столбцу до тех пор, пока не исчерпаются ресурсы. Последней заполняется клетка  $(m; n)$ .

После того, как опорный план построен, вычисляется оценочная матрица  $C_1$ . Для расчета элементов матрицы необходимо сначала определить все потенциалы  $\beta_j$  и  $\alpha_i$ . Строим схему перевозок, которая отвечает начальному опорному плану  $x_0$ , т.е. соединяем

коммуникациями пункты отправления и назначения, для которых  $x_{ij} \neq 0$ . Определяем последовательно все потенциалы пунктов отправления и назначения, назначая для удобства  $\alpha_i = 0$ . Потом по формуле находим элементы матрицы  $C_1$ , которые отвечают базисным элементам плана  $x_0$  и должны быть заняты нулями.

При последующих итерациях используется следующий алгоритм.

1. Если в оценочной матрице  $C_{(k+1)}$  все элементы положительны, план  $x_{(k)}$  – оптимальный, в противном случае следует приступить к его улучшению.

2. Избираем наибольший по модулю отрицательный элемент оценочной матрицы, и начиная из соответствующего ему элемента  $x_{st}$  в матрице, строим замкнутую цепочку, к которой поступают элементы. Потом определяем минимальный элемент среди всех непарных за порядком расположения в цепочке, считая первым  $x_{st}$  элемент.

3. Строим новый план  $x_{(k+1)}$ , прибавляя ко всем парным элементам цепочки и отнимая от непарных. Элементы матрицы  $x_{(k)}$ , которые не попадают в цепочку, перемещаются в матрицу  $x_{(k+1)}$  без изменений.

4. С помощью подобных преобразований матрицы  $C_{(k)}$  находим оценочную матрицу  $C_{(k+1)}$  для нового плана  $x_{(k+1)}$ . Для этого подчеркиваем в матрице  $C_{(k)}$  все элементы, которые отвечают ненулевым элементам матрицы  $x_{(k+1)}$  (они обязательно равняются 0). В матрице  $C_{(k)}$  зачеркиваем строку, которая содержит элемент  $C_{st}$ . Если в этой строке имеют место подчеркнутые элементы, то зачеркиваем соответствующие этим элементам столбцы. Если же в каждом зачеркнутом столбце имеют место подчеркнутые элементы, зачеркиваем соответствующие им строки, и так до тех пор, пока описываемая процедура может выполняться. После этого ко всем элементам зачеркнутых строк прибавляем  $|C_{st}|$ , а от элементов зачеркнутых столбцов отнимаем  $|C_{st}|$ . Получаем новую оценочную матрицу. Если в матрице  $C_{(k+1)}$  нет отрицательных элементов, то план  $x_{(k+1)}$  – оптимальный, иначе переходим к следующей итерации. На этом итерации завершаются.

### 3. Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы (ГА) есть поисковые алгоритмы, основанные на механизмах натуральной селекции и натуральной генетики. Они реализуют “выживание сильнейших” среди рассмотренных структур, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования эволюции поиска. В каждой генерации новое множество искусственных последовательностей создается, используя части старых и добавляя новые части с “хорошими свойствами”. ГА – это не просто случайный поиск. Они эффективно используют информацию, накопленную в процессе эволюции.

Цель ГА двоякая: абстрактно и формально объяснить адаптацию процессов в естественных системах; спроектировать искусственные программные системы, которые содержат механизмы естественных систем. Центральная тема поиска в ГА – поиск баланса между эффективностью и качеством для выживания в различных условиях. ГА отличаются от других оптимизационных и поисковых процедур следующим: работают в основном не с параметрами, а с закодированным множеством параметров; осуществляют поиск из популяции точек, а не из единственной точки; используют целевую функцию, а не ее различные приращения для оценки информации; используют не детерминированные, а вероятностные правила.

ГА берет множество натуральных параметров оптимизационной проблемы и кодирует их как последовательность конечной длины в некотором конечном алфавите.

В естественных системах общая генетическая упаковка называется генотип. В натуральных системах организм формируется посредством связи генетической упаковки с окружающей средой и называется фенотип.

В естественной терминологии хромосомы состоят из генов, которые могут иметь числовые значения, называемые “аллели”.

Начальное условие задачи закрепления поставщиков за потребителями – матрица стоимостей (таблица). Необходимо закодировать это условие в хромосому.

Для этого план перевозок нужно представить в виде развернутой строки. Генами в данном случае будут выступать элементы ячеек плана. При генерации популяции будем использовать случайные значения генов. Размер популяции для матрицы стоимостей

размерностью  $m$  на  $n$  элементов необходимо брать в районе  $m \cdot n$ . Количество генов в хромосоме соответственно будет равняться  $m \cdot n$ .

Фитнесс-функцией (целевой функцией) для популяции является суммарная стоимость перевозки всех грузов:

$$f(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \cdot \quad (2)$$

Для каждой сгенерированной особи считаем значение целевой функции, после чего вычисляем отношение ее приспособленности к суммарной приспособленности популяции:

$$Ps(i) = \frac{f(k)}{\sum_{i=1}^k f(k)} \cdot \quad (3)$$

Полученное значение определяет вероятность выбора особи для дальнейших операций – кроссинговера и мутации. К хромосомам с наилучшей фитнес-функцией ( $f(k) > \min$ ) применяется оператор кроссинговера, который заключается в попарном «скрещивании» выбранных на предыдущем этапе особей.

Например, имея хромосомы  $A = 10, 11, 12, 8, 7$  и  $B = 1, 2, 3, 4, 5$ , после применения к ним оператора кроссинговера мы получим хромосомы  $C = 10, 11, 12, 4, 5$  и  $D = 1, 2, 3, 8, 7$ .

После скрещивания применяем к отобраным хромосомам оператор мутации. Он заключается в случайном изменении одной или нескольких позиций в хромосоме. Например, хромосома  $A = 10, 11, 12, 8, 7$  после мутации может принять вид  $A = 10, 8, 12, 11, 7$ .

Оператор кроссинговера применяется с вероятностью 60%, мутации – 40%. Как ни странно, именно вероятностный подход позволяет генетическим алгоритмам достигать оптимума в решаемой задаче.

Применив разработанный алгоритм к задаче транспортировки угля, получили следующий результат. На каждой итерации особи в популяции улучшали свою целевую функцию, стремясь к оптимальному решению, и на четырнадцатой итерации было получено решение задачи, в то время как при использовании метода потенциалов оптимальное решение было найдено только на двадцать второй.

### Выводы

В процессе данного исследования была проанализирована оптимизационная задача транспортного типа, рассмотрена ее математическая модель, а также один из основных методов ее решения – метод потенциалов. Также рассмотрены понятия эволюционного подхода к решению задач и, в частности, разработан алгоритм решения оптимизационной задачи транспортного типа на основе генетических алгоритмов. В ходе исследования сделаны выводы о том, что несмотря на сложность программной реализации, новый алгоритм является более производительным и позволяет находить оптимальное решение за более короткий срок.

*Научная новизна.* В ходе исследования впервые произведена попытка применить эволюционный подход к рассматриваемому классу задач. Таким образом, создан первый алгоритм решения оптимизационных задач транспортного типа на основе генетических алгоритмов.

*Практическим значением* полученных результатов является то, что разработанным методом можно решать транспортные задачи на любом предприятии транспортного типа и в отличие от уже существующих методов решения новый алгоритм является более производительным и не требует закупки дорогостоящей вычислительной техники.

**Список литературы:** 1. *Handbook of Genetic Algorithms* / Ed. L. Davis. N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1991. 134p. 2. *Kureichik V., Miagkikh V., Topchy A.* Combined Genetic and Local Search Algorithms for Quadratic Assignment Problem // Proc. First International conf. on Evolutionary computation and its Applications, June. Plymouth, 1996. 86p. 3. *Mitchell M.* An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, Mass: MIT Press, 1996. №4. 4. *Гвоздинский А. Н.* Оптимизационные задачи в организационном управлении. В 2-х частях. Учебн. пособие. Харьков: ХТУРЭ, 1997. 572 с.

Поступила в редколлегию 28.04.2009

**Гвоздинский Анатолий Николаевич**, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в слож-

ных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. ак. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 702-38-23.

**Мельник Сергей Владимирович**, студент магистратуры специальности интеллектуальные системы принятия решений, факультет КН, ХНУРЭ. Адрес: Украина, Хорол Полтавской обл., ул. Ленина, 41, кв. 46, тел. 8 066 330 2 220.

---

УДК 519.7

*А.Н. ГВОЗДИНСКИЙ, Ю.Н. КОРНИЕНКО*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПЛАНИРОВАНИИ**

---

Исследуются интеллектуальные системы управления в производственном планировании современного промышленного предприятия. Предлагается оптимизационный метод решения производственных задач, позволяющий оптимально распределять ресурсы предприятия.

### **Введение**

Современный этап совершенствования системы управления народным хозяйством нашей страны основан на соединении преимуществ социалистического способа производства с достижениями научно-технической революции.

В настоящее время новейшие достижения математики и современной вычислительной техники находят все более широкое применение в экономических исследованиях, в планировании. Накоплен достаточный опыт постановки и решения экономических задач с помощью математических методов. Особенно успешно развиваются методы оптимального планирования [1].

Высокий уровень капиталовложений, необходимых при создании высокотехнологичных производств, требует эффективного использования средств, которое в первую очередь достигается за счет оптимизации структуры и параметров таких производств на основе применения новых информационных технологий и математического моделирования на базе современной вычислительной техники. Особое место в этом комплексе задач занимают проблемы выбора и принятия решений, потребность в разрешении которых возникает на всем протяжении жизненного цикла любой, сколько-нибудь сложной системы. При этом процесс решения происходит в условиях ограничений, обусловленных спецификой функционирования системы: сложность математической модели, большое число рассматриваемых альтернативных вариантов, значительная неопределенность исходной информации. В этих условиях решающую роль должны сыграть модели и методы поддержки принятия решений, основанные на последних достижениях математического моделирования и теории принятия решений [2].

*Актуальность исследования.* Производственное планирование современного промышленного предприятия является тем инструментом, который обеспечивает необходимой информацией остальные процессы управления. Успешность решения подавляющего большинства экономических задач зависит от наилучшего, самого выгодного способа использования ресурсов. В процессе экономической деятельности приходится распределять такие важные ресурсы, как деньги, товары, сырье, оборудование, рабочая сила и др. И от того, как будут распределяться эти, как правило, ограниченные ресурсы, зависит конечный результат деятельности предприятия.

*Целью данного исследования* является изучение самых эффективных методов принятия решения, определение интеллектуального оптимизационного метода для решения задач управления производственным планированием.

*Задачи исследования.* В рамках данной статьи будут рассмотрены три метода для решения задач о принятии решения в производственном планировании.

*Сущность исследований.* Выбор метода решения – один из важнейших этапов оптимизации. Все многообразие современных методов подчас затрудняет выбор одного из них при решении различных оптимизационных задач. В работе рассмотрены наиболее продуктивные методы.

## 1. Метод муравьиных колоний

Имитация самоорганизации муравьиной колонии составляет основу муравьиных алгоритмов оптимизации. Колония муравьев может рассматриваться как многоагентная система, в которой каждый агент (муравей) функционирует автономно по очень простым правилам.

Основу поведения муравьев составляет самоорганизация, механизмы которой обеспечивают теоретически оптимальное поведение. Принципы его состоят в достижении системой некоторой глобальной цели в результате низкоуровневого взаимодействия ее элементов. Здесь имеется в виду использование системой только локальной информации, при этом исключается любое централизованное управление и обращение к внешнему образу системы.

Муравьиный алгоритм применяется следующим образом. В начальный момент времени в каждой функции базы знаний находится количество муравьев, равное числу кластеров, в которые входит эта функция. При этом каждый муравей имеет строгую принадлежность тому кластеру, из которого он начал свое движение. Принадлежность кластеру проявляется в том, что муравей более восприимчив к феромону, оставленному муравьями из «своего» кластера. Перемещение из функции  $i$  в функцию  $j$  для муравья зависит от следующих показателей:

– видимости  $\eta_{ij}$  — величины, обратной расстоянию между функциями;

– виртуального следа феромона  $\tau_{ij}(t)$  — количества феромона, оставленного на связи ранее другими муравьями и сохранившегося к итерации алгоритма  $t$ .

Вероятность перехода  $k$ -го муравья на  $t$ -й итерации из функции  $i$  в функцию  $j$  определяется следующим стохастическим правилом:

$$P_{ijk}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_l [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(t) = \alpha_{\text{self}} \cdot \tau_{ij,cl} + \sum_{z \neq cl} \alpha_{\text{alien}} \cdot \tau_{ij,z}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — два регулируемых параметра, задающие веса феромона и видимости при выборе маршрута;  $\alpha_{\text{self}}$  — коэффициент доверия «своему» феромону;  $\alpha_{\text{alien}}$  — коэффициент доверия «чужому» феромону.

При переходе из одной функции в другую муравей оставляет на связи, соединяющей эти функции, определенное количество феромона. Для того чтобы избежать схождения маршрута движения всех муравьев к одному циклу, используется испарение феромона:

$$\Delta\tau_{ij}(t+1) = (1-p) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \tau_{ijk}(t), \quad (4)$$

где  $p$   $[0;1]$  — коэффициент испарения;  $m$  — количество муравьев в колонии [3].

Муравьиный алгоритм применяется на двух этапах анализа знаний системы. В начале он запускается на пространственной (многомерной) модели базы, после чего на основании его работы делаются первоначальные выводы. Затем модель упрощается: удаляются некоторые связи между функциями, отдельные функции объединяются в более крупные структурные единицы, структура знаний отображается на двумерное пространство. После этого алгоритм запускается на упрощенной плоской модели знаний.

## 2. Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы используют аналогию между естественным отбором и процессом выбора наилучшего решения из множества возможных. Его суть состоит в том, что более приспособленные особи имеют больше возможностей для выживания и размножения.

В каждой клетке животного содержится вся информация этой особи. Эта информация записана в виде набора очень длинных молекул ДНК. Каждая молекула ДНК — это цепочка, состоящая из молекул нуклеотидов четырех типов, обозначаемых А, Т, С и G. Собственно, информацию несет порядок следования нуклеотидов в ДНК. Таким образом, генетический код индивида — это просто очень длинная строка символов, где используются всего 4 буквы.

В животной клетке каждая молекула ДНК окружена оболочкой – такое образование называется хромосомой. Каждое врожденное качество особи кодируется определенной частью хромосомы, которая называется геном этого свойства. При размножении животных происходит слияние двух родительских половых клеток и их ДНК взаимодействуют, образуя ДНК потомка. Основной способ взаимодействия – кроссовер (скрещивание). При наследовании возможны мутации из-за радиоактивности или других влияний, в результате которых могут изменяться некоторые гены в половых клетках одного из родителей. Измененные гены передаются потомку и придают ему новые свойства. Выбор пар родителей из популяции для порождения потомков производит оператор отбора, а выбор особей для уничтожения – оператор редукции.

Генетический алгоритм – это простая модель эволюции в природе, реализованная в виде компьютерной программы. В нем используются как аналог механизма генетического наследия, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде. В сущности генетические алгоритмы являются разновидностью методов поиска с элементами случайности и имеют целью нахождение лучшего, а не оптимального решения задачи. Это связано с тем, что для сложной системы часто требуется найти хотя бы удовлетворительное решение, а проблема достижения оптимума отходит на второй план.

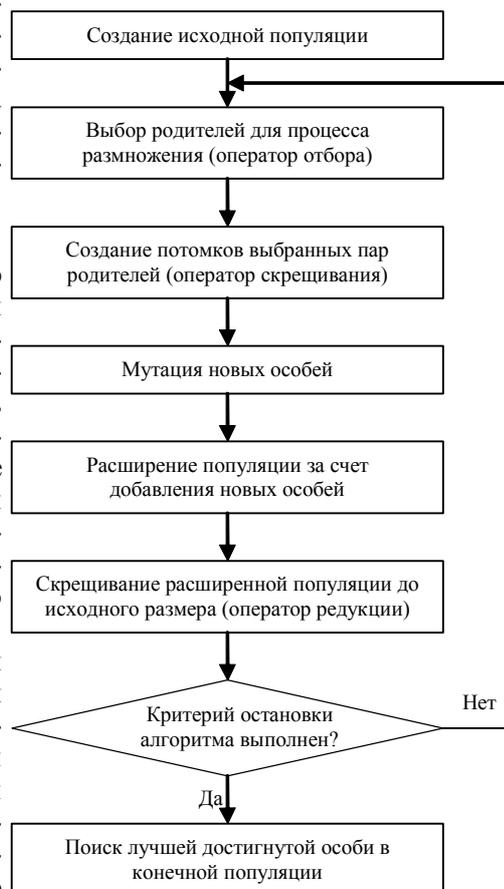
В процессе работы генетического алгоритма все указанные выше операторы применяются многократно и ведут к изменению исходной популяции. Поскольку операторы отбора, скрещивания, мутации и редукции по своей сути направлены на улучшение отдельной особи, то результатом их работы является постоянное улучшение популяции. Блок-схема классического алгоритма решения приведена на рисунке.

Преимуществом генетических алгоритмов перед другими является простота их реализации, относительно высокая скорость работы, параллельный поиск решения сразу несколькими особями, позволяющий избежать попадания в “ловушку” локальных оптимумов (нахождения первого попавшегося, но не самого удачного оптимума). Недостаток — сложность выбора схемы кодирования, возможность вырождения популяции, сложность описания ограничений планирования [4].

### 3. Блочное программирование

Математическое программирование — это прикладная отрасль математики, которая является теоретической основой решения задач оптимального планирования. К этому классу относят алгоритмические методы. Такие методы позволяют получать оптимальные решения, хотя обладают при этом значительной вычислительной сложностью. Наиболее часто используются такие методы, как линейные и нелинейные преобразования. Значительная вычислительная сложность алгоритмических методов зачастую препятствует их эффективному применению в практических задачах.

Блочное программирование — метод решения сложных задач линейного программирования путем разложения модели на блоки. Крупноразмерная модель (включающая много показателей в исходной таблице) сводится к нескольким моделям меньшей размерности. Получившиеся задачи решаются вместе по специальным правилам согласования. Необходимость такого подхода обосновывается тем, что с ростом размерности трудоемкость (сложность) решения задач растет невероятно быстро.



Работа генетического алгоритма

Среди теоретических схем блочного программирования наиболее известны две: метод декомпозиции Данцига-Вульфа и метод планирования на двух уровнях Корнай-Липтака. Обе они представляют собой последовательные (итеративные) пересчеты, взаимно увязывающие решения главной, “отраслевой” задачи и локальных задач предприятий. Различие же между ними состоит в том, что схема Данцига-Вульфа построена по принципу “централизованное определение цен – децентрализованное определение наилучших возможностей”, а схема Корнай-Липтака – по принципу “централизованное лимитирование возможностей – децентрализованное выявление эффекта от их использования”. В обоих случаях важную роль играют двойственные оценки, причем их оптимальный уровень выявляется вместе с оптимальным распределением ресурсов, т. е. собственно планом (именно в этом состоит принцип оптимального планирования) [5].

Характерной особенностью этого метода является использование так называемой «координирующей задачи», которая по сравнению с исходной имеет небольшое число строк (не намного превышающее число связывающих ограничений) и очень много столбцов. При этом для решения координирующей задачи не требуется задание всех столбцов в явном виде. Они генерируются в процессе использования симплекс-метода. Поэтому такой подход называется методом генерации столбцов. Алгоритм включает итерационный обмен между множеством независимых подзадач, целевые функции которых включают варьируемые параметры, и координирующей задачей. В подзадачу вводится ряд параметров (двойственные переменные, оценки), получаемых при решении координирующей задачи. В свою очередь в координирующую задачу вводятся решения подзадач, которые оптимальным образом комбинируются и служат для получения новых оценок. Последние вновь вводятся в подзадачу, и итеративный процесс продолжается вплоть до этапа, на котором удовлетворяется критерий оптимальности. Такая процедура имеет изящную экономическую интерпретацию: ее, например, можно понимать как процедуру децентрализованного планирования, когда основной планирующий (управляющий) орган системы координирует функционирование отдельных подсистем с помощью цен на ограниченные ресурсы [6].

### **Выводы**

В результате данного исследования можно сделать вывод, что наиболее распространенным методом является блочное программирование, поскольку позволяет находить наилучшие решения за короткое число итераций. Генетический алгоритм реже используется, так как он имеет значительный недостаток в процессе кодировки, хотя является самым быстрым алгоритмом. Муравьиный алгоритм – самый молодой, однако при всей своей сложности является самым продуктивным.

*Научная новизна.* В работе были исследованы наиболее распространенные методы для решения задач управления в производственном планировании: линейное программирование, в частности, блочная оптимизация, метод муравьиных колоний и генетический алгоритм. Показаны достоинства и недостатки каждого из методов.

*Практическим значением* полученных результатов является то, что на основании этого исследования можно легко выбрать метод для решения конкретной задачи, а также собранных данных достаточно для разработки качественного программного продукта.

**Список литературы:** 1. *Оптимальный* раскрой промышленных материалов <http://referat.niv.ru/referat/023/02300002.htm> 2. *Синтез* моделей выбора технологических решений на основе двухэтапных мажоритарных схем [http://bankrabort.com/work/work\\_69601.html](http://bankrabort.com/work/work_69601.html) 3. *Штовба С.Д.* Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. №4. С.58-134 4. *Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.* Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении <http://www.neuroproject.ru/Papers/exponenta.doc> 5. IASA: Глава 2.6. Двойственный метод <http://iasa.org.ua/iso?lang=rus&ch=2&sub=6>. 6. *Лэсдон Л.С.* Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975. С.56-83

*Поступила в редколлегию 22.04.2009*

**Гвоздинский Анатолий Николаевич**, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. ак. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 702-38-23.

**Корниенко Юлия Николаевна**, студентка магистратуры специальности интеллектуальные системы принятия решений, факультет КН ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61141, Харьков, ул. Клочковская, 193-б, кв. 188, тел. 701-50-94.

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ**

---

Рассматривается сетевая модель транспортного типа. Предлагается многокритериальная модель иерархической структуры, а также методы и алгоритмы для решения исследуемых задач.

### **Введение**

Общая проблема распределения альтернативных ресурсов в сетевых канонических структурах заключается в определении ресурсов, которые будут использованы каждой работой, интенсивностей, с которыми работы будут эти ресурсы потреблять, а также сроков начала и окончания выполнения работ, при которых принимают экстремальные значения критерии, определяющие условия эффективного функционирования системы. Критерии оптимальности для рассматриваемых систем могут зависеть от организационных и ресурсных условий. Критерии организационных условий связаны с минимизацией нарушений заданных директивных сроков, а критерии ресурсных условий – с равномерностью потребления ресурсов.

### **Актуальность**

В рамках теории исследования операций рассматривается большое количество практических задач, которые можно сформулировать и решить как сетевые модели. Недавние исследования показали, что не менее 70% реальных задач математического программирования можно представить в виде сетевых моделей. Решение задач требует применения различных сетевых оптимизационных алгоритмов. Специфическая структура этих задач позволяет разработать специальные сетевые алгоритмы, более эффективные, чем стандартный симплекс-метод.

### **Состояние проблемы**

Наличие быстродействующих ЭВМ и успехи в применении операционных методов решения организационных задач обеспечили непрерывное совершенствование систем централизованного планирования и управления, а также систем информационного обеспечения, функционирующих в масштабе целых корпораций и фирм. При этом, внедряя централизованное планирование, охватывающее все функции организации, фирме нет необходимости отказываться от стратегии децентрализованного принятия оперативных решений. Напротив, такой «интегрированный» подход позволяет получать данные, необходимые для обеспечения эффективного управления различными структурными подразделениями фирмы. Интегрированная система планирования дает возможность формировать непротиворечивые цели, отражающие как задачи, стоящие перед всей фирмой, так и ограничения, определяющие текущую деятельность отдельных ее подразделений. Обеспечение практической реализуемости столь крупных по масштабам систем обуславливает необходимость разработки эффективных методов решения операционных задач. Этим методам будет уделяться в дальнейшем все большее внимание. Алгоритмы решения задач линейного программирования обусловлены их связью с динамическими и многошаговыми моделями детерминированного класса. Алгоритмы отыскания кратчайшего пути (маршрута), приведенные в общем виде, можно считать основой для получения решений задач на таких моделях.

В основе построения алгоритмов решения оптимизационных сетевых задач лежат четыре понятия. Одним из них является понятие двойственности. Другое понятие — свойство треугольной структуры базиса. Третье понятие связано с определением кратчайших путей. Наконец, четвертое понятие относится к максимизации общей величины потока в сети с промежуточными пунктами и ограниченными пропускными способностями, имеющей один источник и один сток.

*Цель работы* – сравнение методов управления распределения ресурсов в сетевых системах, разработка алгоритмов, а также сравнительный анализ методов.

*Задачей исследования* является изучение существующих методов решения исследуемой задачи и их сравнение.

### **Постановка задачи**

При постановке задач распределения ресурсов предполагается, что проект описан в виде комплекса работ с определенными зависимостями между ними. Зависимости между работами отображаются в виде сетевого графика (сети). Существуют два способа изображения работ в сетевом графике. В первом способе работы изображаются в виде вершин сети, а зависимости между работами – в виде дуг сети. Во втором способе вершины сети соответствуют ее событиям, т.е. моментам завершения одной или нескольких работ, а дуги – работам сети, при этом для отображения всех требуемых взаимосвязей иногда приходится вводить дуги специального вида – фиктивные работы (можно считать, что такие дуги соответствуют работам нулевой продолжительности, не требующим ресурсов).

Сетевые оптимизационные модели, обычно являющиеся частными случаями моделей линейного программирования, важны в двух отношениях. Часто они относятся к задачам распределения продукции. Следовательно, модели этого класса имеют экономический смысл для многих промышленных фирм, располагающих несколькими предприятиями и хранящих запасы продукции на складах, размещенных в различных пунктах. Кроме того, математическая структура сетей идентична структуре других операционных моделей, на первый взгляд не имеющих с ними ничего общего. Однако указанные две причины не могут служить основанием для выделения сетевых моделей в качестве предмета специального изучения.

Важнейшей причиной, обуславливающей целесообразность такого выделения, являются особенности математических характеристик сетевых моделей. Используя эти особенности, можно существенно повысить эффективность процесса отыскания оптимальных решений задач, которые удастся описать на «сетевом языке». В реальных примерах сетевые модели часто содержат тысячи операций (переменных) и сотни ограничений, в связи с чем применение эффективных алгоритмов становится не только выгодным, но просто необходимым.

Наконец, исследуя сети, можно убедиться, что разнообразные, на первый взгляд совершенно непохожие операционные модели допускают применение общего глубокого метода анализа, что, несомненно, обеспечивает существенные преимущества.

Сеть (или линейный граф) состоит из множества узлов (или вершин, точек) и множества дуг (или ребер, звеньев), соединяющих различные пары узлов. На каждой дуге задана определенная ориентация (определено направление). Поэтому говорят, что сеть является ориентированной. Для описания ориентированной сети можно воспользоваться простыми обозначениями. Пронумеруем узлы числами натурального ряда  $1, 2, \dots, p$  и обозначим дугу, исходящую из узла  $i$  и входящую в узел  $j$ , парой номеров  $(i, j)$ . Предположим, что между парой узлов допускается только одна дуга  $(i, j)$  и назовем некоторый объект, перемещающийся из узла  $i$  в узел  $j$  [т.е. по дуге  $(i, j)$ ], единичным потоком по этой дуге. Сеть называется двудольной, если все ее узлы можно разбить на два подмножества  $G_1$  и  $G_2$ , такие, что для любой дуги  $(i, j)$  узел  $i$  принадлежит  $G_1$ , а узел  $j$  — подмножеству  $G_2$ .

### **Математическая модель**

Для решения задачи распределения ресурсов в сетевых системах используются следующие методы: венгерский и метод Данцига – Вулфа.

Рассмотрим алгоритм решения данной задачи с помощью венгерского метода на примере сети, где числа на дугах определяют стоимость единичной перевозки, вершины 1 и 2 - пункты производства продукта в количестве 20 и 10 единиц, вершины 6 и 7 - пункты потребления в количестве 15 и 15 единиц. К тому же на маршрутах 2 - 5 и 3 - 6 пропускная способность не превышает соответственно 5 и 7 единиц продукта.

Воплощая основную идею венгерского метода, введем фиктивные вход 0 и выход 8. Соединим вход 0 с вершинами 1 и 2 дугами с пропускной способностью, равной объемам

производства, и вершины 6 и 7 с выходом 8 - дугами с пропускной способностью, равной объемам потребления. Стоимости перевозок на этих дугах берем нулевыми.

В полученной сети ищем максимальный поток от входа к выходу:

$$L(X) = \sum_{(ij)} c_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

$$\sum_j x_{0j} = A, \quad (2)$$

$$\sum_i x_{in} = A, \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ij} = \sum_k x_{ik}, \quad j \neq 0, n, \quad (4)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \text{ для всех } i, j, \quad (5)$$

где  $V_j$  – неопределенная величина, не превышающая  $A$ . Получаем задачу, внешне похожую на классическую транспортную, тем не менее, более сложную из-за ограничений на пропускные способности.

Один из возможных алгоритмов состоит в следующем.

Отмечаем вход некоторым значком (множество отмеченных вершин в дальнейшем будем обозначать через  $M$ ).

Отыскиваем неотмеченные вершины ( $j$ ), в которые ведут ненасыщенные дуги с нулевыми стоимостями перевозок из вершин множества  $M$ , т.е. дуги с характеристиками  $CM_j = 0$ ,  $XM_j < dM_j$ . При отсутствии таковых переходим к пункту 3 алгоритма и при наличии – к пункту 4.

Отыскиваем среди неотмеченных вершину, из которой идет дуга во множество  $M$  с нулевой стоимостью и ненулевой перевозкой, и переходим к пункту 4. При отсутствии таких – к пункту 7.

Выбранную вершину включаем во множество  $M$  и, если выход остался непомятым, переходим к пункту 2.

По меткам, сопоставленным отмеченным вершинам (откуда и сколько), отыскиваем путь от входа к выходу и его пропускную способность и корректируем суммарный поток и пропускные способности (по аналогии с поиском максимального потока в простейшем случае).

Если пропускные способности дуг, исходящих из вершины входа, не исчерпаны, переходим к пункту 1.

Выясняем наличие дуг, для которых  $CM_j > 0$  при  $j \in M$  или  $CiM < 0$  при  $i \in M$ . Если таковых нет, задача неразрешима.

Среди модулей найденных  $CM_j$  и  $CiM$  отыскиваем минимальное значение  $\delta$  и корректируем матрицу стоимостей, вычитая  $\delta$  из стоимостей на дугах, ведущих из множества  $M$ , и добавляя к стоимостям на дугах, ведущих во множество  $M$ . Возвращаемся к пункту 2.

Рассмотрим метод Данцига-Вулфа для решения задачи оптимального использования сети.

Имеем конечную неориентированную сеть  $S = \{u, v\}$ , где  $u$  – множество узлов,  $v$  – множество дуг. Путём на сети  $S$ , соединяющим корреспондирующую пару узлов  $u_1, u_k$ , будем, как обычно, считать последовательность узлов и дуг, начинающуюся с узла  $u_1$  и заканчивающуюся узлом  $u_k$ . Обозначим через  $K$  количество корреспондирующих пар,  $S_k$  – множество всевозможных путей, соединяющих  $k$ -ю корреспондирующую пару,  $Q_k$  – количество каналов, потребных  $k$ -й корреспондирующей паре,  $b_i$  – ёмкость  $i$ -го элемента сети,  $b_i > 0$ . Тогда условия существования на сети  $S$  требуемого потока (удовлетворения потребности всех корреспондирующих пар) могут быть записаны в виде

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s_k \in S_k} a_{i s_k} w_{s_k} \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (6)$$

$$\sum_{s_k \in S_k} w_{s_k} = Q_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (7)$$

$$w_{S_k} \geq 0, \quad (8)$$

где  $w_{S_k}$  – часть заявки для  $k$ -й корреспондирующей пары по пути  $s_k \in S_k$ ,

$$a_{iS_k} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ – й элемент сети входит в путь } s_k, \\ 0, & \text{если не входит} \end{cases} \quad (9)$$

$m$  – количество рёбер в сети  $S$ . Не всегда можно сразу сказать, существует ли в заданной сети требуемый поток. При достаточно малом  $z > 0$  поток, удовлетворяющий ограничениям (6), (8) и

$$\sum_{s_k \in S_k} w_{S_k} = zQ_k, \quad (10)$$

существует всегда, таким образом, возникает задача

$$\max z \text{ при (1), (3), (4)}. \quad (11)$$

После необходимых преобразований задача может быть решена методом Данцига-Вулфа.

С помощью значений двойственных переменных в оптимальном решении задачи выделяется подмножество корреспондирующих пар, сохраняя оптимальность решения задачи, максимизировать удовлетворение для всех корреспондирующих пар задачи. Не умаляя общности, можем считать, что номера корреспондирующих пар задачи начинаются с  $k_1 + 1$  ( $k_1 \geq 1$ ) и идут подряд до  $K$ .

Формально задача может быть записана так:

$$z_2 \rightarrow \max,$$

$$\sum_{s_k \in S_k} w_{S_k} = z_1 Q_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (12)$$

$$\sum_{s_k \in S_k} w_{S_k} = z_2 Q_k, \quad k = k_1, \dots, K, \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s_k \in S_k} a_{iS_k} w_{S_k} + \sum_{k=k_1+1}^K \sum_{s_k \in S_k} a_{iS_k} w_{S_k} \leq b_i, \quad (14)$$

$$w_{S_k} \geq 0. \quad (15)$$

## Выводы

При решении задачи оптимального использования сети с применением метода Данцига-Вулфа для генерации столбцов необходимо нахождение кратчайших путей для всех корреспондирующих пар. Длинами линий при этом служат двойственные оценки. В начальных итерациях большинство длин равны нулю. На основе этого свойства модифицирован классический алгоритм нахождения кратчайших путей Дijkstra, что позволило уменьшить объем вычислений при решении задачи на 15%. Экономия вычислений достигается за счет отсутствия необходимости поиска минимума временных пометок.

*Научной новизной* приведенных в статье результатов является предложенный метод анализа разветвленности сети, который пригоден для оперативного анализа сетей, содержащих тысячи узлов и линий. Алгоритм оптимального применения сети позволяет максимально использовать ее ресурсы для приоритетного набора потребителей или максимизировать прибыль владельца сети от сдачи каналов в аренду. Алгоритмы решения задач оптимального развития сети позволяют минимизировать капиталовложения на ее развитие для достижения допустимости заданного многопродуктового потока, максимизировать прибыль владельца сети при ее развитии с ограниченными капиталами либо в условиях получения кредита с определением его оптимального объема.

*Практическим значением* рассматриваемых методов является то, что на основании этого исследования можно выбрать оптимальный метод для решения задач распределения ресурсов, что позволит минимизировать капиталовложение и максимизировать доход предприятия.

**Список литературы:** 1. Вагнер Г.М. Основы исследования операций. 1969. 2. Таха Х.А. Введение в исследование операций. 2005. 905 с. 3. Зайченко Ю.П. Исследование операций. К.: Высш. шк., 1988. 552 с. 4. Ларіонов Ю.І., Левикін В. М., Хажмурадов М. А. Дослідження операцій в інформаційних системах. Навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2003. 388 с. 5. Метод Данцига-Вулфа <http://vtit.kuzstu.ru/books/shelf/17/doc/part2.html>.

*Поступила в редколлегию 28.04.2009*

**Гвоздинский Анатолий Николаевич**, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. ак. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 702-38-23.

**Кудряшов Владимир Юрьевич**, студент магистратуры специальности интеллектуальные системы принятия решений, факультет КН ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61141, Харьков, ул. Целиноградская, 36, кв. 215, тел. 8-050-92-22-059.

---

УДК 681.3

*С.В. МИНУХИН, С.В. ЗНАХУР*

## **МЕТОДИ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПОШУКУ ІНФОРМАЦІЇ В GRID-МЕРЕЖІ**

---

Розглядається підхід щодо кластеризації ресурсів GRID-мережі для розподіленого пошуку інформації на основі використання нейронної мережі. Механізм пошуку базується на архітектурі LDAP та асоціює вузли GRID-мережі з відповідними ресурсами та запитамі за допомогою мережі Кохонена.

### **1. Вступ**

Однією з сучасних парадигм побудови глобальних комп'ютерних мереж є парадигма GRID-системи, де реалізована ідея використання архітектури розподіленого комп'ютинга з колективною формою доступу до обчислювальних та інформаційних ресурсів. Ключовою проблемою використання інформаційних ресурсів GRID є експоненціальний ріст інформації та існуюча гетерогенність глобальної мережі [1,2,7,8]. Сучасні інформаційні пошукові системи (ІПС) не дозволяють адекватно та швидко обробити запити користувачів. Тому для пошуку ресурсів у GRID-мережах пропонується здійснити їх метаопис та визначити, на яких серверах (вузлах – сховищах даних) вони будуть зберігатися та оброблятися, тобто необхідно кластеризувати інформаційні ресурси згідно з атрибутами їх метаопису. Для рішення цієї задачі використовувалися статистичні методи кластеризації, які відносять образ ресурсу до відповідного класу (кластеру) із множини вузлів. Аналіз існуючих ієрархічних і неієрархічних методів математичної статистики показав, що існуючі неієрархічні методи виявляють більш високу стійкість по відношенню до шумів (викидів), некоректного вибору метрики, включення незначних змінних для кластеризації. Перевага ієрархічних методів – в наочності побудови дерева кластерів і можливості отримання детального уявлення про структуру даних. Останнім часом ведуться активні розробки нових алгоритмів кластеризації, здатних обробляти надвеликі бази даних. До таких алгоритмів відносяться: Birch, Cure, Clarans, DBScan [1,3]. Основним недоліком цих алгоритмів є те, що вони вимагають вибору деяких порогів щільності для спостережень, що є суб'єктивною апріорною інформацією, яка може бути недоступною. Загальним недоліком статистичних методів є достатньо висока часова затримка рішення задач кластеризації для об'ємів даних більш ніж пентабайт та необхідність апріорної інформації щодо характеристик спостережень або кластерів. Дослідження показали, що нейронні мережі (НМ) з успіхом можуть застосовуватися в різних галузях, особливо в задачах класифікації та кластеризації. Використовуючи відповідний клас НМ, можна реалізувати рішення задачі кластеризації метаінформації відповідно до вузлів мережі. Таким чином, метою роботи є побудова механізму пошукової машини GRID-мережі для ефективного пошуку інформаційних ресурсів, який використовує апарат штучних НМ [4,5]. Задачі дослідження такі:

- 1) визначення загальної архітектури ІПС для GRID-мережі на основі використання протоколу LDAP;
- 2) кластеризація метаінформації ресурсів за допомогою НМ Кохонена та асоціація їх з вузлами обробки (серверами);
- 3) визначення механізму розподілу запитів відповідно до вузлів оброблення (серверів).

## 2. Сутність

Розглянемо механізм пошуку інформації у Grid-системі [2, 6]. Як архітектура пошукової системи для Grid-системи пропонується кластерна модель із вбудованим механізмом пошуку LDAP (рис.1). LDAP (англ. Lightweight Directory Access Protocol - «полегшений протокол доступу до каталогів») - це мережевий протокол для доступу до служби каталогів X.500. Сервіс каталогів - це оснащений засобами пошуку репозиторій, в якому наділені відповідними повноваженнями користувачі та служби можуть знаходити інформацію про ресурси, обчислювальні вузли, мережеві пристрої і програми. На рис. 1 цифрами позначено порядок взаємодії компонентів при надходженні даних до системи, а буквами – порядок дій при обробленні запиту користувача. Дані зберігаються в файльовій системі сервера (серверів), на якому розміщено сховище даних. Індексація даних виконується за допомогою спеціального індексатора, який повинен бути окремо розроблений для кожного типу даних. Його задача полягає в скануванні файлової системи для пошуку нових файлів з даними, виділенні з них метаінформації та генерації XML-документа за встановленою схемою, що містить структуровану інформацію про нові дані.

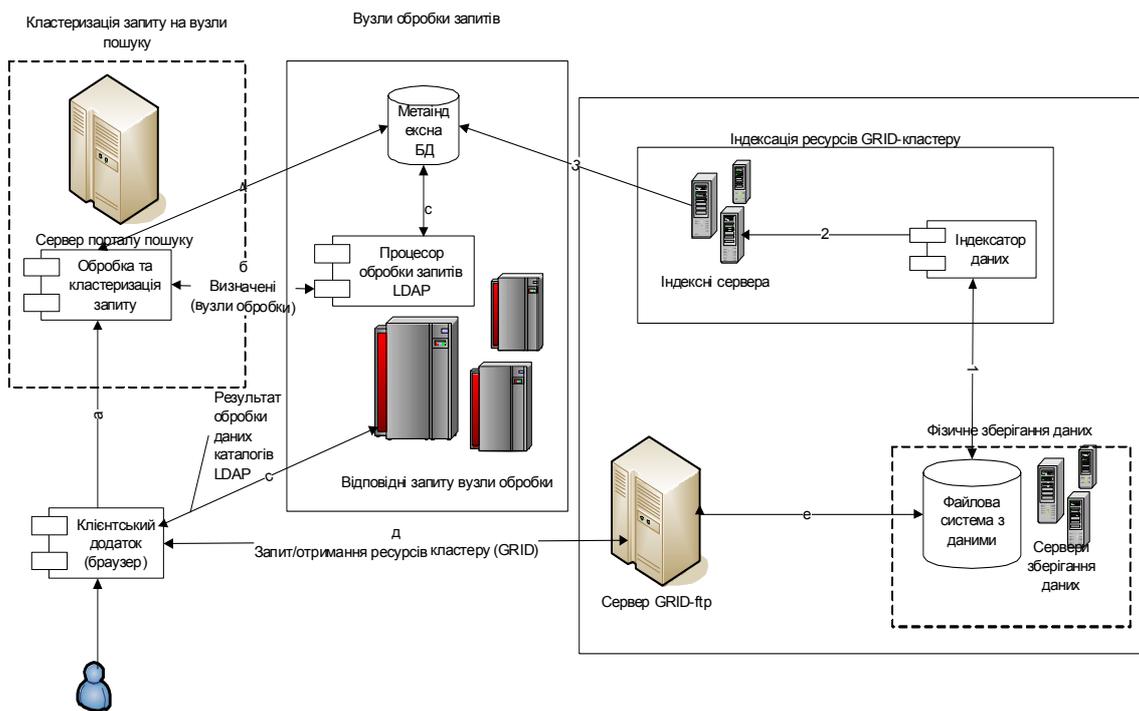


Рис. 1. Архітектура пошукової системи для GRID-мережі

У сучасних пошукових системах на основі індексування вихідні документи заносяться в базу даних без будь-якого додаткового перетворення, але при цьому смисловий зміст кожного документа відображається в деякий пошуковий простір [1, 2]. Процес відображення документа в пошуковому просторі називається індексуванням та полягає в присвоєнні кожному документу деякого індексу-координати в інформаційному просторі. Формалізоване представлення (опис) документа називається пошуковим індексом документа. Користувачеві досить сформувати пошуковий образ запиту для пошуку документа [1, 2].

Пошукова система на основі певних критеріїв і способів шукає документи, пошукові образи яких (ПОД) відповідають пошуковим образам запиту (ПОЗ) користувача, і видає релевантні запиту документи. Загальна схема пошуку на основі ПОЗ наведена на рис. 2.

Індексатор GRID реєструється у індексному сервісі Globus Toolkit, який використовується для розробки та функціонування проміжного програмного забезпечення GRID, і періодично ним виконується [6-8]. Дані, що генерує індексатор, надходять до загального дерева даних індексного сервісу ресурсу, і у випадку, коли цей ресурс не є вершиною ієрархії індексних сервісів, утворених за допомогою сервісу агрегації, передаються вище за ієрархією.

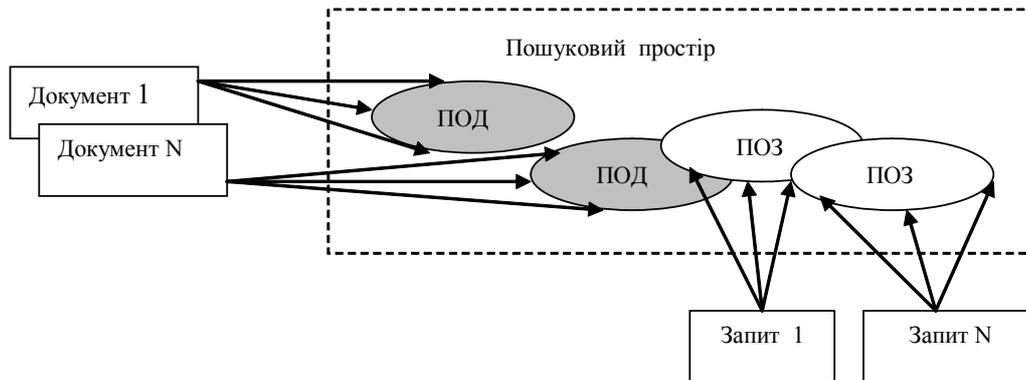


Рис. 2. Пошук інформації по ПОД

В результаті головний індексний сервіс системи завжди має детальну і актуальну інформацію про дані, які присутні в усіх архівах, документах GRID-системи. У тому випадку, коли додаток користувача має отримати певні дані зі сховища даних, він використовує засоби пошуку по індексному сервісу системи і отримує адресу URL файлу, що розташований в певному архіві. Якщо користувачеві відомо, в якому архіві знаходяться необхідні йому дані, він може проводити пошук не за головним індексним сервісом, а за індексним сервісом необхідного йому архіву, що сприяє більш рівномірному розподілу навантаження за ресурсами системи. Опис ресурсу згідно з протоколом LDAP дозволяє використовувати атрибути документа (згідно з ієрархією опису ресурсу).

Для підвищення швидкості пошуку в роботі пропонується використовувати механізм визначення серверів (вузлів) пошуку на основі метаданих щодо ресурсу. Для цього необхідно вирішити такі завдання:

- 1) кластеризація ресурсів на основі їх атрибутів опису в LDAP (метаданих);
- 2) асоціація кластеризованих ресурсів та вузлів їх оброблення;
- 3) асоціація атрибутів запиту з вузлами оброблення;
- 4) визначення достатньої кількості вузлів оброблення для оброблення потоку запитів.

В роботі перші три завдання пропонується вирішити на основі апарату інтелектуальної обробки даних (нейронної мережі).

Для завдання представлення ресурсу у вигляді системи знань вхідними даними є текст, а результатом – система знань у вигляді набору метаданих. Кластеризація метаданих дозволяє кластеризувати документ (ресурс).

Таким чином, індексатори формують метаопис ресурсу GRID-мережі, що має перелік атрибутів, найважливішим з яких є ключові слова й частотна характеристика ключових слів документа. Для подальшого розподілу метаданих щодо серверів БД необхідно здійснити кластеризацію документів у режимі реального часу. В результаті метаданих щодо ресурсу (документа) буде віднесена до відповідного сервера (серверів), що у подальшому дозволить на них здійснити й обробку запитів на пошук документа: ключові слова запиту можливо асоціювати з тими кластерами (серверами), де зберігається відповідна метаданих щодо документа. Реалізувати поставлене завдання пропонується за допомогою мережі Кохонена. Мережа Кохонена – метод, розроблений для відображення багатовимірних даних на двовимірну площину. Ця мережа навчається без вчителя: на вхід поступають навчальні дані і відбувається корекція синаптичних ваг нейронів відповідно до нових спостережень. Швидкість навчання мережі залежить від порядку надходження навчальних даних на вхід мережі [3].

### Рішення завдання

Для функціонування інтелектуального репозитарію метаінформації необхідні такі функціональні модулі:

- модуль індексації документів;
- модуль кластеризації документів.

На модуль індексації покладені завдання передоброблення документів і побудова частотних словників термінів, що зустрічаються. Далі, в рамках модуля кластеризації і класифікації, на основі значень відносних частот повинні створюватися наочно-орієнтовані кластери. В процесі класифікації виконується завдання зіставлення інформаційного ресурсу з певним кластером.

Для оцінки значущості слів в індексаторі використовуються методи визначення частот слів кожного документа і частот, розрахованих за формулою Шенона (відношення «сигнал-шум»)[1]:

$$w_i = \frac{S^k}{N^k},$$

де  $N^k$  – шум терміну,

$$N^k = \sum_{i=1}^n \frac{f_i^k}{F^k} * \text{Log} \frac{F^k}{f_i^k},$$

тут  $f_i^k$  – частота k-го терміну в i-му документі;  $F^k$  – частота k-го терміну по всіх документах;  $S^k$  – сигнал терміну,

$$S^k = \text{Log} F^k - N^k.$$

Для кластеризації застосовується нейронна мережа, що використовує метод навчання без вчителя (unsupervised learning), – самоорганізуючі карти Кохонена (Self-Organizing Map – SOM)[4].

Пропонується використовувати дві основні процедури настройки нейронної мережі: ініціалізація ваг нейронів випадковим чином і самонавчання мережі Кохонена (алгоритм SOM).

#### Алгоритм навчання мережі Кохонена

Крок 1. Ініціалізація параметрів мережі.

Крок 2. Цикл за числом ітерацій в мережі.

Крок 2.1. Визначення відстаней між вхідним вектором X і вектором ваг W кожного нейрона за формулою:

$$D_j = \sqrt{\sum_i (x_i - w_i)_j^2}.$$

Крок 2.2. Визначення нейрона-переможця з мінімальною відстанню.

Крок 2.3. Визначення області активації нейрона-переможця.

Крок 2.4. Визначення ваг нейронів усередині області активації за формулою [4]:

$$W_j(t + 1) = W_j(t) + a[X - W_j(t)],$$

де a – крок навчання для мережі Кохонена.

Крок 3. Запис документа в масив кластерів.

Вихідний потік кластерів представляється у вигляді динамічного двомірного масиву. При попаданні документа в кластер на перетині «документ-кластер» в комірку ставиться одиниця. Навчання нейронної мережі відбувається на кожному документі. Таким чином, метаінформація щодо кожного документа буде зберігатися у відповідному кластері (серверах).

Аналіз роботи мережі Кохонена показав, що вона здатна розділяти спостереження лише за ступенем близькості їх ознак. При цьому номер вузла, до якого віднесено спостереження, та номер його класу, в загальному випадку, не збігаються, тобто мережа не наділяє кожен з вузлів конкретним змістом. Результати експериментів показали, що мережу доцільно застосовувати тільки для виділення центрів кластерів спостережень, а не для асоціювання серверів відповідним кластерам [4].

Після кластеризації метаданих щодо ресурсів та асоціації її відповідним вузлам GRID- мережі необхідно вирішити наступне завдання пошукової системи – асоціювати запити користувачів з вузлами, які містять відповідну до запитів метадані. В роботі навчену мережу Кохонена пропонується використати для кластеризації запитів користувачів згідно з існуючими кластерами (серверами) обробки БД метаданих. Для цього запит користувача за допомогою процедури парсингу (parsing) [2] розділяється на окремі ключові слова, яким необхідно дати вагу (аналог частотної характеристики) [1]. Отриманий вектор атрибутів подається на вхід мережі Кохонена для його асоціювання з кластером (серверами обробки). Послідовність рішення задачі кластеризації запитів на отримання інформаційних ресурсів представлено за допомогою нотації діаграми IDEF0 (рис. 3), що дозволяє структуровано уявити механізм асоціації запитів до серверів, які зберігають метадані щодо кластеризованих ресурсів. На діаграмі рис. 3 слід виділити такі процеси: розміщення інформаційного ресурсу (документа), індексування документа і формування БД пошукової машини, тестування й експлуатація пошукової системи, попередній статистичний аналіз результатів виконання запитів, кластеризація інформаційних ресурсів на основі статистичної обробки даних з використанням апарату штучного інтелекту.

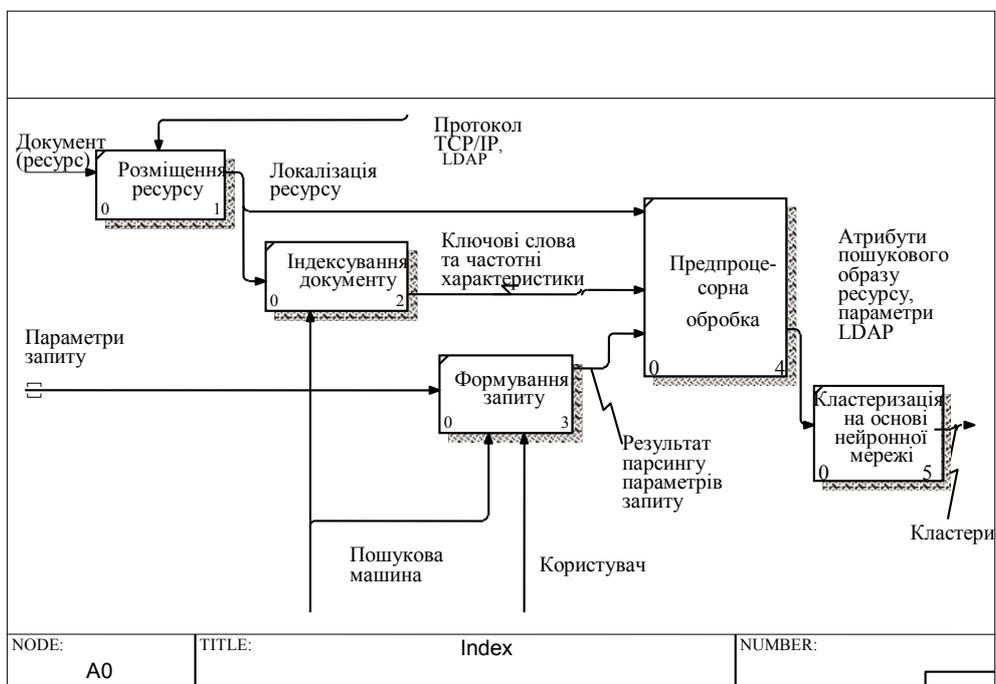


Рис. 3. Основні процеси організації інтелектуального пошуку в GRID- мережі

Сервер-диспетчер (сервер порталу рис. 1), отримавши запит від користувача, на основі кластеризації його параметрів асоціативно зв'язує запит з вузлами (серверами) GRID-мережі. Мережа Кохонена дозволяє визначити декілька серверів, які містять близьку за складом метадані (але не тотожну). У випадку, коли сервери вільні, запит можливо обробити на них одночасно. Сервери, які виділені в асоційовані таксономічні кластери, містять близьку за змістом інформацію й відповідають однаковим параметрам запити користувачів. Тому для збільшення швидкості отримання результатів пошуку доцільно організувати запит до БД кожного з них.

Таким чином, досягається оптимізація пошуку за рахунок одночасного використання декількох серверів та розподільного зберігання метаданих щодо документів у кластерах.

### 3. Висновки

В статті описано модель пошукової системи, яка дозволяє одночасно обробляти запити користувачів до ресурсів GRID-систем на асоційованих вузлах GRID (серверах обробки

метаінформації). Рішення задачі розподілу запитів між вузлами (серверами) дозволяє суттєво збільшити ефективність обробки запитів за рахунок одночасного використання достатньої кількості вільних серверів. Ефективність визначається зменшенням часу обслуговування запиту відповідно до варіанту централізованої його обробки. Запропонований в роботі апарат інтелектуального пошуку базується на вирішенні задач кластерного аналізу метаінформації щодо ресурсів GRID, що дозволило класифікувати образ ресурсу до відповідного вузла мережі. Вирішення задачі кластеризації здійснюється за допомогою штучної нейронної мережі Кохонена, яка визначає у оперативному режимі приналежність ресурсу до відповідного класу (множини) вузлів обчислювального кластера (GRID-мережі). Мережа Кохонена дозволяє вирішувати й зворотне завдання – визначення відповідних вузлів кластера для оброблення запитів користувачів, які містять метаінформацію щодо необхідних ресурсів для формування переліку відповідей щодо запитів. Практичне значення дослідження полягає у можливості побудови механізму пошуку інформації, який дозволяє в результаті кластеризації та асоціації запитів у нейронній мережі отримати підмножину вузлів мережі, де запити будуть оброблюватися одночасно. Подальші дослідження можливо проводити у напрямку розробки алгоритмів для паралельного рішення завдання кластеризації на декількох процесорах (вузлах) GRID-мережі в MPI.

**Список літератури:** 1. *Игумнов Е.* Основные концепции и подходы при создании контекстно-поисковых систем на основе реляционных баз данных // [http://www.citforum.ru/database/articles/search\\_sys.shtml](http://www.citforum.ru/database/articles/search_sys.shtml). 2. *Пономаренко В.С.* Методы и модели планирования ресурсов в Grid-системах / В.С. Пономаренко, С.В. Листровой, С.В. Минухин, С.В. Знахур: Монография. Х.: ВД «ИНЖЕК», 2008. 408 с. 3. *Уиллиамс У.Т., Ланс Д.Н.* Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. М. Б. Малютов. М.: Наука, 1986. С. 269–301. 4. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с. 5. *Барсегян А.А., Курьянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И.* Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336с. 6. *Валиев М.К., Кутаев Е.Л., Слепенков М.И.* Использование службы директорий LDAP для представления метаинформации в глобальных вычислительных системах (Using LDAP directory service for representation of metainformation in global computing systems): <http://www.keldysh.ru/metacomputing/ism99.html>. 7. *Globus Toolkit*: <http://www.globus.org>. 8. <http://www.gridclub.ru/activity/kiam/documents.html>.

*Надійшла до редколегії 12.04.2009*

**Мінухін Сергій Володимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних систем ХНЕУ. Наукові інтереси: інтелектуальна обробка інформації. Адреса: Україна, 61145, Харків, вул. Новгородська, 6-а, кв. 77, тел. 702-18-31, e-mail: [ms\\_vl@mail.ru](mailto:ms_vl@mail.ru).

**Знахур Сергій Вікторович**, канд. економ. наук, доцент кафедри інформаційних систем ХНЕУ. Наукові інтереси: інтелектуальна обробка інформації. Адреса: Україна, Харків, пр. 50-річчя ВЛКСМ, 32/186, тел. 702-18-31, e-mail: [sergznaokhur@mail.ru](mailto:sergznaokhur@mail.ru).

---

УДК 519.816

*В.А.ТИМОФЕЕВ, И.Г. ДЕНИСОВА*

## **ОЦЕНКА ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОТИВОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СУБЪЕКТАМИ КАК ПЕРВОПРИЧИНА КОНФЛИКТОВ ИЛИ СОТРУДНИЧЕСТВА В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

---

Рассматриваются основные принципы отношений, возникающих в организационном управлении, с учетом известного понятия рефлексии между руководителем и подчиненным; предлагается метод оценки несовпадения рефлексивных оценок. С учетом ранее известных оценочных характеристик противоречий между субъектами управления предлагается использовать их наряду с рефлексией для построения модели принятия решений в условиях риска для оценки уровня конфликтности.

### **1. Введение**

Сегодняшнее поколение специалистов в Украине должно поставить перед собой вопросы, которые являются ключевыми для того, чтобы понять, почему наша страна и, прежде всего, ее экономика сравнительно слабо продвигается в сфере научно-производственных

достижений. Известно, что независимо от того, на каком уровне – макроэкономическом, микроэкономическом – находятся рассматриваемые проблемы, в любом случае речь может идти об организационной системе, особым и, в определенном смысле, главным ресурсом которой является людской ресурс.

Первопричины неудач украинской экономики кроются не только в сугубо экономических проблемах, но и в поведенческих мотивах отношений между субъектами организационных систем, независимо от их уровней.

*Цель* работы состоит в том, чтобы построить модель поведенческого взаимодействия между двумя субъектами организационного управления, с помощью которой можно было бы оценивать степень конфликтности в организационной системе.

Для достижения поставленной цели необходимо предложить метод для самооценки и взаимооценки субъектов с учетом наличия различных типов лидеров организационной системы и, используя оценки противоречий, построить модель конфликтности по типу моделей теории игр.

## **2. Оценки рефлексивности между субъектами**

Известно, что любая организационная система имеет в своей структуре как минимум два человека (субъекта) и при этом один из них так или иначе становится лидером, т.е. между субъектами возникают управленческие отношения (УО). Такие отношения формируются лидером в сфере его влияния (власть) и в поле его влияния (авторитет). С другой стороны, субъект – руководитель (лидер) сам находится в объективно существующих управленческих отношениях ответственности и зависимости: его вертикальные, горизонтальные и диагональные связи, как во внутренней, так и во внешней среде. Все эти управленческие отношения проявляются в общем случае как два главных типа: формализованные и персонифицированные [1].

Примем за основу то, что для лидера стиль его управленческих отношений с другим субъектом – «не лидером» проявляется в следующих видах, которые мы назовем гипотезами ориентации типа лидера:

- технократ подчиняет сотрудников рабочим функциям, нередко сугубо рационалистическим;
- автократ – будет подчинять своей власти (воле, силе) работников, вопреки их интересам и интересам системы;
- демократ производит управление на основе постоянного изучения мнения работников фирмы;
- гуманизатор управляет на основе уважения работника как личности;
- инноватор руководствуется в управлении результатами анализа стимуляции, оценки и внедрения инициативных предложений;
- бюрократ стремится подчинять работников принятому организационному порядку, нередко в ущерб делу.

При этом используем те же ориентационные оси (рис. 1), которые предложены ранее [1]. Отличительной особенностью проведенного исследования является то, что управленческие отношения между субъектами могут быть разными еще и в том смысле, что подчинение можно рассматривать в интеллектуальном ракурсе (когда речь идет о том, кто из субъектов больше знает, имеет больший опыт или лучше образован) и в психологическом ракурсе (когда у субъектов присутствует харизма, сильнее стремление оставить за собой последнее слово).

Проведенные исследования показали, что лидер редко может быть в чистом виде бюрократом, автократом или другим типом. Задача исследования была поставлена таким образом, что лидер сам себя должен оценить по десятибалльным шкалам (см. рис.1), а также по этим же шкалам подчиненный должен оценить лидера. В зависимости от управленческого типа лидера площади треугольников оказываются различными; при этом сам лидер и его подчиненный видит картину треугольников  $S^1_1, S^1_2, S^2_2, S^1_3, S^1_4, S^1_5, S^2_5, S^1_6$  по-своему. Таким образом, в каждом случае результат выполнения поставленной задачи получен разный.

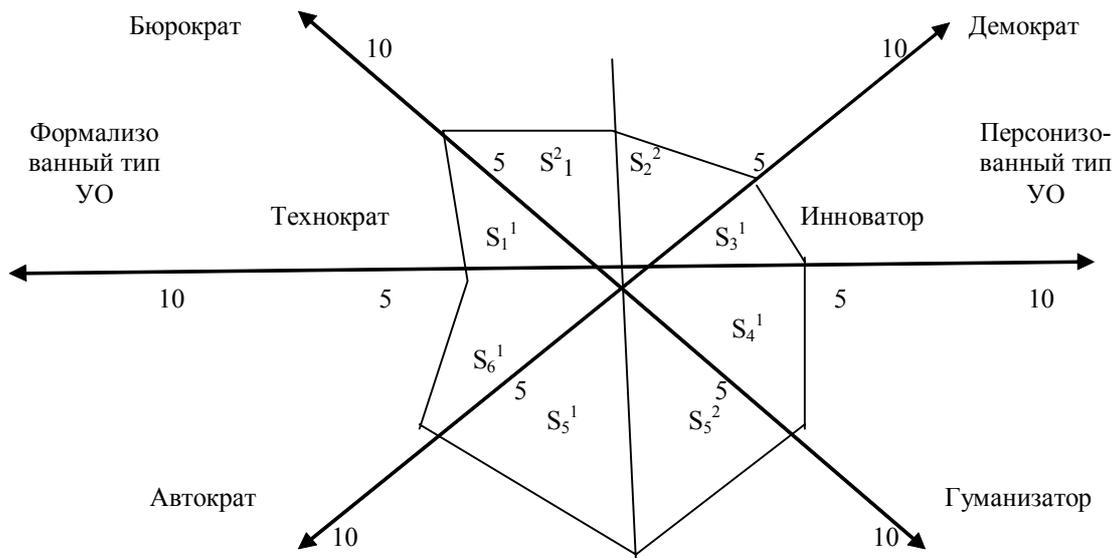


Рис. 1. Гипотезы ориентации типа лидера в организационной системе

В качестве вывода можно утверждать то, что не каждый лидер признает в себе «чистый тип». Например, самооценка типа лидера (или саморефлексия, CP) может иметь вид:

$$X_1 = CP = \lambda_1 (-S_1^1 - S_2^1 - S_5^1 - S_6^1),$$

$$Y_1 = CP = \lambda_1 (S_2^2 + S_3^1 + S_4^1 + S_5^2),$$

где  $X_1$ ,  $Y_1$  – оценки саморефлексии лидера на интеллектуальном и психологическом уровнях соответственно;  $\lambda_1$  – оценка вероятности того, насколько руководитель знает себя;  $S_i$  ( $i=1-6$ ) – площади треугольников, образовавшихся вследствие самооценки, использованные с противоположными знаками соответственно расположению относительно горизонтальной оси.

Аналогично можно получить взаимоценку типа (или взаиморефлексию, BP), если такие же оценки предложить построить подчиненному на аналогичном рисунке:

$$X_2 = BP = \lambda_2 (S_1^1 - S_2^1 - S_5^1 - S_6^1),$$

$$Y_2 = BP = \lambda_2 (S_2^2 + S_3^1 + S_4^1 + S_5^2),$$

где  $X_2, Y_2$  – оценки взаиморефлексии лидера на интеллектуальном и психологическом уровнях соответственно;  $\lambda_2$  – оценка вероятности того, насколько подчиненный знает руководителя.

Чем больше отличаются между собой полученные таким образом оценки, тем вероятнее возникновение конфликтов между такими субъектами. Изображая полученные оценки рефлексии в двумерном пространстве (рис. 2), можно сказать, что степень априорной конфликтности между лидером и не лидером будет определяться мерой удаленности между собой концов векторов рефлексии, т. е. можно ввести понятие коэффициента рефлексии в виде тангенса угла между векторами:  $\lambda = \text{tg} \beta$ . Использование такого коэффициента для анализа меры конфликтности между субъектами позволяет рассчитывать на то, что будут учтены интеллектуальная и психологическая составляющая априори, т.е. независимо от целей, которые могут возникнуть в системе. Понятно, чем больше отдаленность в рефлексии между лидером и подчиненным, тем меньше вероятность внушения лидером цели «не лидеру» и меньше вероятность наступления консенсуса в конфликтной ситуации. Поэтому далее можно перейти к целям и противоречивости в системе.

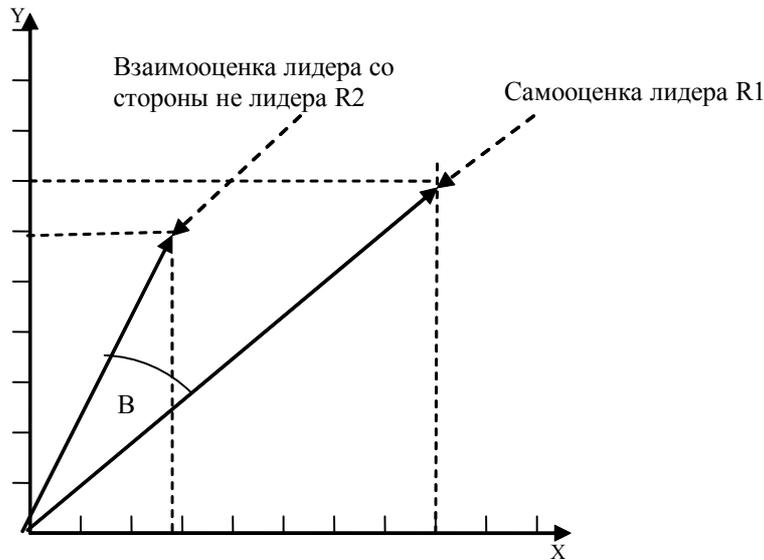


Рис. 2. Определение саморефлексии и взаиморефлексии лидера

### 3. Противоречие между субъектами и его оценки

Противоречие – это отражение противоположности и различия сопоставляемых сторон, рассматриваемых систем, порождающих конкурентные или конфликтные взаимодействия между системами, которые вызывают в них или в окружающей среде позитивные или негативные последствия (вплоть до полной ликвидации, вытеснения, поглощения и т. д. одной из систем) [ 2].

Противоречие в гомеостатических системах – это характеристика, различия и противоположности целей подсистем, вызывающих конкурентную борьбу между ними с соответствующими негативными последствиями для этих подсистем («плат» за противоречие) и позитивного эффекта для всей системы (виде повышения качества управления и устойчивости системы), если местным «шефом» обеспечивается оптимальное управление противоречием с точки зрения заданной ему цели [ 2 ].

В случае, когда речь идет о межличностных отношениях в организационных системах, количественная оценка взаимодействия руководителя и подчиненного носит в сущности тот же характер противоречий между личными, уровневными и системными целями. Поэтому для количественной оценки степени противоречия и возможности предотвращения конфликтов применим следующие показатели: величину противоречия между целями ( $Y_{12}$ ), степень разнонаправленности действия целей ( $\Pi_{12}$ ), остроту противоречия  $Q_{12}$  [2].

Будем полагать, что величина ( $Y_{12}$ ) должна стремиться к нулю, когда нет различия между целями, и неограниченно возрастать, если различие стремится к бесконечности. Такой нежесткой аксиоматике удовлетворяет большое число функций. Будем пользоваться простейшей зависимостью, когда величина противоречия соответствует модулю вектора между центрами целей 1 и 2 в многомерном пространстве. Векторная величина противоречия ( $Y_{12}$ ), в свою очередь, может находиться через координатные противоречия, применительно к двумерному пространству (рис.2):

$$Y = \sqrt{Y_{12i}^2 + Y_{12j}^2},$$

$$Y_{12i} = x_{1i} - x_{2i}, \quad Y_{12j} = x_{1j} - x_{2j}.$$

Примем, что  $\Pi_{12}$  (степень разнонаправленности действия целей) должен стремиться к 0, если  $\alpha_{12} \rightarrow 0$ ; относительно медленно нарастать при возрастании  $\alpha_{12}$  в пределах от 0 до 90°, т.е. когда действие целей еще не приобрело противоположного характера; и стремиться к  $\infty$ , когда цели имеют диаметрально противоположную направленность ( $\alpha_{12} = 180^\circ$ ). Простейшей функцией, удовлетворяющей таким условиям, будет:

$$\Pi_{12} = \frac{1}{\cos \alpha_{12}/2},$$

при  $\alpha_{12} = 0$   $\Pi_{12} = 0$ , при  $\alpha_{12} = 180^\circ$   $\Pi_{12} = \infty$ .

Острота противоречия  $Q_{12}$  – это его качественный показатель, определяемый через относительную противоположность целей взаимодействующих сторон. При разработке методов количественной оценки  $Q$  приняты следующие аксиомы [2]:

– если проекции  $x_{1i}$ ,  $x_{2i}$  конкурирующих целей на  $i$ -ю ось координат имеют одинаковые знаки, то  $Q_i = 1$ , в противном случае  $Q_i > 1$ ;

– если проекции  $x_{1i}$ ,  $x_{2i}$  имеют разные знаки и выполняется равенство  $x_{1i} = -x_{2i}$ , то возникает «резонанс» противоречия по координате  $i$  и  $Q_i \gg 1$ . В том случае, если рассматривается линейная система, то  $Q_i \rightarrow \infty$ , а если учитываются факторы нелинейности, то  $Q_i \rightarrow Q_{i \max}$ , где  $Q_{i \max}$  – предельная острота противоречия по  $i$ -й координате, которая может возникать в системе.

Исходя из принятой аксиоматики, запишем выражение для векторной остроты противоречия в предложении линейной зависимости:

$$\hat{Q}_{1,2} = \sqrt{Q_{12i}^2 - Q_{12j}^2},$$

а координатную остроту противоречия – как:

$$Q_{12i} = \frac{|x_{1i} - x_{2i}|}{|x_{1i} - p_1 x_{2i}|},$$

где  $p_1$  – логический оператор, меняющий знак при втором члене знаменателя с минуса на плюс, если  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  имеют разные знаки.

Следует также учесть, что  $Q$  меняется от 1 до  $\infty$ , это значит, что при полной противоположности  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  по координате  $x_1$  возникает «резонанс» противоречия. При оценке появления конкурирующих (конфликтных) отношений между системами удобно пользоваться векторной величиной противоречия, взвешенной по ее остроте или степени антагонизма (аналогично для координатной величины противоречия):

$$Y_{12}^Q = Y_{12} * Q_{12}; \quad Y_{12}^A = Y_{12} * A_{12}.$$

Плата за противоречие – это прагматическая оценка, характеристика негативных последствий в системах, вызванных конкурентными или конфликтными отношениями между ними. При прочих равных условиях негативные последствия будут тем выше, чем больше значения  $Y_{12}$  и  $A_{12}$ .

#### 4. Построение модели конфликтности между субъектами

Будем рассматривать модель взаимодействия между двумя субъектами в системе в следующем виде. Пусть имеется одна гипотеза состояния системы в смысле целеполагания, т.е. субъекту известны две цели: цель личная и цель системы; пусть субъект видит для себя три альтернативы поведения (табл. 1). В качестве критерия оценки взаимодействия примем показатель «Плата за противоречие» на межличностном уровне, который будем рассчитывать с учетом того, что известен коэффициент рефлексии между лидером и подчиненным. Тогда модель может быть представлена матрицей следующего вида (табл. 1).

Предполагаемые платы за противоречие вычисляются таким образом:

$$E(S1) = 0,25(20) + 0,50(10) + 0,1(10) = 11,0;$$

$$E(S2) = 0,25(40) + 0,50(10) + 0,1(0) = 15,0;$$

$$E(S3) = 0,25(10) + 0,50(10) + 0,1(35) = 11,0.$$

Понятно, что  $S1$  или  $S3$  предпочтительнее, чем  $S2$ . Но для того чтобы сделать выбор между  $S1$  и  $S3$  такими, что имеют одинаковую предполагаемую плату, следует использовать какой-то другой критерий. Таким критерием может оказаться степень риска.

Поскольку предполагаемая стоимость служит измерением основной тенденции, степень риска может быть определена как степень отклонения реальной платы от предполагаемой.

Таблица 1. Матрица конфликтности

Альтернативы поведения не лидера	Характеристики гипотезы противоречия между целями			
	Величина противоречия между целями, $Y_{12}^A$	Степень разнонаправленности действия целей, $\Pi_{12}$	Острота противоречия целей, $Q_{12}$	Плата за противоречие $E(i)$
Полное осознанное подчинение (S1)	20	10	10	11
«Изображение» подчинения, с главенствованием собственного мнения (S2)	40	10	0	15
Собственное мнение превышает необходимость подчинения (S3)	10	10	10	11
Коэффициент рефлексии $\lambda = tgB$	0.25	0.5	0,1	

Степень риска, таким образом, будет вторичным или вспомогательным измерением предполагаемой «платы» за противоречие.

#### 5. Измерение риска: размах и среднее квадратичное отклонение

Из табл. 1 следует, что хотя S1 и S3 имеют одинаковую предполагаемую плату, равную 11, S1 фактически может иметь плату либо в 20, либо в 10, тогда как S3 могло бы иметь плату, равную 10, т.е. явно имеется риск. Одним из способов измерения риска можно считать вычисление размаха, который является разницей между самыми крайними величинами платы. В нашем примере размах S1 равняется 10 (от низкого, равного 10, к высокому, равному 20). Размах учитывает лишь крайние платы и не учитывает те, что расположены между ними. Если допустить наличие нормального распределения, то более точным измерением риска будет среднеквадратичное отклонение: чем выше среднеквадратичное отклонение, тем выше риск выбираемой альтернативы поведения (табл. 2).

Таблица 2. Измерение рисков для выбора альтернативы поведения субъекта

Поведение	$(X_i - \mu)$	$(X_i - \mu)^2$	$\lambda_s$	$(X_i - \mu)^2 \lambda_s$	$\sigma$
S1	20-15=5	25	0,25	6,25	
	10-15=-5	25	0,50	12,50	
	10-15=-5	25	0,1	2,5	
				$(\sigma_1)^2 = 21,25$	$\sigma_1 = 4,5$
S2	25	625	0,25	156,25	
	-5	25	0,50	12,50	
	-15	225	0,25	56,25	
				$(\sigma_2)^2 = 225,00$	$\sigma_2 = 15$
S3	0	0	0,25	0,0	
	0	0	0,50	0,0	
	0	0	0,25	0,0	
				$(\sigma_3)^2 = 0,0$	$\sigma_3 = 0,0$

Как следует из табл.2, альтернатива S1 представляется достаточно рискованным поведением, в то время как поведение S3 вообще при данной ситуации не содержит риска.

## 6. Выводы

В результате использования комплекса оценок и построения модели очевидно, что огромную важность приобретают человеческие особенности и возможности, которые надо изучать и направлять на цели организационной системы. При этом важно то, что нельзя сбросить со счетов личные цели, корпоративные цели: их надо стремиться совместить с целями системы (например, предприятия, города, страны), учитывая, если невозможно предотвратить, возникновение противоречий и, следовательно, конфликты.

*Научная новизна* состоит в том, что разработан метод, с помощью которого можно определять численные значения саморефлексии. Благодаря этому появляется возможность объединить его с другими разработками для построения модели конфликтности.

*Практическая значимость* состоит в том, что становится возможным моделировать поведение субъектов на любом уровне организационного проектирования для минимизации конфликтности в системе.

**Список литературы:** 1. Красовский Ю.Д. Управление поведением в фирме: эффекты и парадоксы. Практическое пособие. М.: ИНФРА-М, 1997. 368с. 2. Введение в прикладную теорию игр / Г.Н. Дюбин, П.Г. Суздаль. М.: Наука, 1981.

*Поступила в редколлегию 08.04.2009*

**Тимофеев Владимир Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры экономической кибернетики ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 8 (057) 70-21-490.

**Денисова Ирина Георгиевна**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры экономической кибернетики ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 8 (057) 70-21-490, e-mail: vladira36@rambler.ru.

---

УДК 519.22

*Н.В. ГИБКИНА, С.В. ВОЛКОТРУБ*

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРАХОВОЙ КОМПАНИИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

---

Рассматриваются гибкие и традиционные схемы страхования. Проводится анализ изменения величины нетто-премий при изменении процентной ставки, волатильности процесса цен рискованного актива, величины гарантированной выплаты, а также при изменении начальных взносов в безрисковые и рискованные активы.

### 1. Введение

Страховщик обеспечивает защиту имущественных интересов страхователя при наступлении страхового случая за счет денежных фондов, которые формируются путем получения страховых премий и доходов от размещения средств этих фондов. Особенностью страхового бизнеса является то, что размер страхового тарифа необходимо определить до наступления момента возможных выплат.

В данной работе рассматривается задача определения оптимальных размеров нетто-премий страховой компании в условиях ее инвестиционной деятельности. Эта задача актуальна на современном этапе развития финансового и страхового рынка, поскольку для привлечения большего количества клиентов страховые компании сталкиваются с необходимостью внедрять новые схемы страхования, способствующие уменьшению страховых тарифов. Одной из таких схем является инвестирование страховой компанией собранных средств на финансовом рынке, вследствие чего появляется возможность увеличения размера страховых выплат.

*Целью* данной работы является сравнительный анализ существующих методов расчета параметров страхования в условиях инвестиционной деятельности страховой компании. В работе рассматриваются традиционные и инновационные схемы расчета нетто-премий в долгосрочном страховании жизни, когда страховая компания в целях повышения своей конкурентоспособности инвестирует собранные средства на финансовом рынке.

## 2. Задачи определения оптимального размера нетто-премий в инновационных и традиционных схемах страхования

Рассмотрим договор страхования на дожитие сроком на  $T$  лет для супругов в возрасте  $x$  и  $y$  лет соответственно и заключающийся в обеспечении страховой выплаты в случае, когда оба они или хотя бы один из них проживет  $T$  лет с момента заключения договора. Вероятность страховой выплаты в этом случае будет равна

$${}_T P_{xy} = {}_T P_x {}_T Q_y + {}_T P_y {}_T Q_x + {}_T P_x {}_T P_y,$$

где  ${}_T P_x$  и  ${}_T P_y$  – вероятности прожить еще  $T$  лет для каждого из супругов;  ${}_T Q_x = 1 - {}_T P_x$  и  ${}_T Q_y = 1 - {}_T P_y$  – вероятности смерти для каждого из супругов в течение  $T$  лет с момента заключения договора.

Величина страховой выплаты для страхового договора на дожитие сроком на  $n$  лет имеет вид:

$$Z = \begin{cases} 0 & \leftarrow T_x < n, \\ K v^{T_x} & \leftarrow T_x \geq n, \end{cases}$$

где  $T_x$  – случайная величина, определяющая количество прожитых лет с момента подписания договора для человека в возрасте  $x$  лет до момента его смерти;  $K$  – страховая сумма;  $n$  – продолжительность страхования;  $v^T$  – дисконтный множитель по принятой норме доходности.

Традиционные схемы накопительного страхования гарантируют страхователю лишь минимальную доходность его вложений, поскольку страховая компания для обеспечения максимальной надежности заинтересована в фиксированной доходности инвестиций. В традиционных страховых контрактах используется принцип эквивалентности, согласно которому размер кумулятивной нетто-премии равен математическому ожиданию дисконтированных кумулятивных выплат.

Размер нетто-премии в традиционной схеме страхования на дожитие равен

$${}_T E_{xy} = K {}_T P_{xy} v^T,$$

где  $K$  – размер страхового возмещения;  $v^T$  – дисконтный множитель по принятой норме доходности;  ${}_T P_{xy}$  – вероятность дожития обоих супругов до возраста  $x+T$  и  $y+T$  лет соответственно или дожитие только одного из них до оговоренного возраста.

Развитие рыночных отношений и конкуренции на страховом рынке приводят к необходимости адаптации страхования к изменяющимся условиям развития финансовой системы. Это приводит к созданию гибких схем страхования, в которых при наступлении страхового случая размер выплаты зависит от рыночной цены портфеля ценных бумаг. В отличие от традиционных схем страхования, выплата по таким контрактам является случайной величиной.

Введем обозначения:  $g(S)$  – функция, определяющая размер выплаты по страховому обязательству,  $S$  – цена единицы выбранного рискового актива.

В работе [1] рассмотрены два типа гибких контрактов: «чистый» контракт:

$$g(S) = S$$

и контракт с «гарантией»

$$g(S) = \max(S, K),$$

где  $K = B_0 \exp(rT)$  – положительная постоянная величина, обеспечивающая страховые выплаты за счет инвестирования средств только в безрисковые активы;  $B_0$  – размер вклада в безрисковые активы в начальный момент времени;  $r$  – процентная ставка;  $T$  – продолжительность страхования.

Согласно методике, приведенной в [1], можно рассчитать нетто-премии для задачи страхования на дожитие супружеской пары сроком на  $T$  лет в условиях гибких схем страхования. Нетто-премия «чистого» контракта будет равна

$$T E_{xy} = T P_{xy} S_0, \quad (1)$$

где  $S_0$  – рыночная цена рискового актива в начальный момент времени;

$T P_{xy} = T P_x T Q_y + T P_y T Q_x + T P_x T P_y$  – вероятность того, что оба супруга в возрасте  $x$  и  $y$  лет или хотя бы один из них проживет  $T$  лет с момента заключения контракта.

Нетто-премия контракта «с гарантией» будет равна

$$T E_{xy} = T P_{xy} [ K \exp(-rT) \Phi(-d_2(T)) + S_0 \Phi(d_1(T)) ], \quad (2)$$

где  $T$  – продолжительность страхования;  $\sigma$  – волатильность;  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  –

функция стандартного нормального распределения,

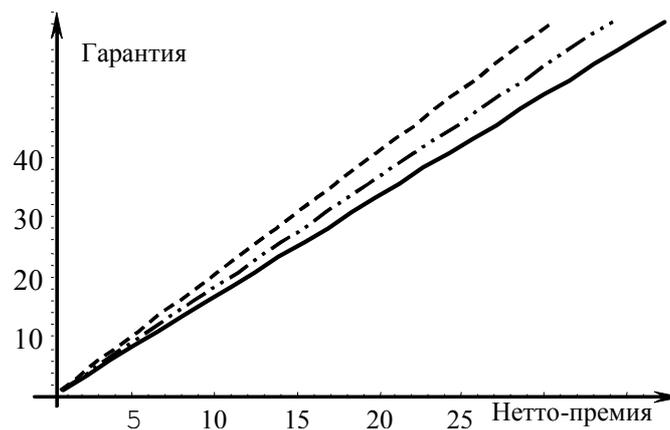
$$d_1(T) = \frac{\ln \frac{S_0}{K} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right) T}{\sigma \sqrt{T}}, \quad d_2(T) = \frac{\ln \frac{S_0}{K} + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right) T}{\sigma \sqrt{T}}.$$

### 3. Численный анализ параметров страхования в инновационных и традиционных схемах страхования

Исследуем влияние некоторых параметров финансового рынка, таких как процентная ставка, волатильность процесса цен рискового актива, величина гарантированной выплаты, а также влияние величины и соотношения начальных взносов в безрисковые и рисковые активы, на размер нетто-премии страховой компании, участвующей в инвестиционной деятельности на этом рынке.

Проведем анализ изменения размера нетто-премии контракта с «гарантией» при изменении волатильности процесса цен рискового актива (рисунок).

Из рисунка очевидно, что при увеличении волатильности процесса цен рискового актива размер нетто-премии контракта с «гарантией» увеличивается. Это объясняется тем, что увеличение волатильности цен ведет к увеличению колебаний уровня цен относительно среднего значения, что увеличивает риск убытков страховой компании при инвестировании средств. Для того чтобы застраховать себя от больших убытков, страховая компания увеличивает размер нетто-премии.



Изменение размера нетто-премии контракта с «гарантией» при изменении волатильности (соответствует наибольшей величине волатильности, соответствует наименьшей величине волатильности)

Проанализируем изменение размера нетто-премий при изменении процентной ставки. В табл. 1 приведены результаты вычислений.

Как видно из табл. 1, при заданных начальных условиях ( $V_0$  – размер вклада в безрисковые активы в начальный момент времени,  $\sigma$  – волатильность процесса цен рискового актива,  $S_0$  – цена портфеля ценных бумаг в начальный момент времени) изменение процентной ставки не влияет на размер нетто-премии ни традиционного контракта, ни

контракта с „гарантией”. В этом случае происходит изменение только величины гарантированной выплаты, которая при постоянной величине вклада в безрисковый актив (и, таким образом, при постоянной нетто-премии) будет тем больше, чем больше процентная ставка.

Таблица 1

Изменение размера нетто-премий при изменении процентной ставки

Процентная ставка	Вклад в рискованные активы	Размер гарантии	Нетто-премия традиционной схемы	Нетто-премия контракта с «гарантией»
0.04	100	182.212	133.885	97.6048
0.06	100	245.96	133.885	97.6048
0.08	100	332.012	133.885	97.6048

Далее рассмотрим «чистый» контракт страхования. При  $K = 0$  размер нетто-премии контракта с «гарантией» и «чистого» контракта совпадает, поскольку в первом случае страховая компания формирует резерв для выплат гарантированных сумм при длительном неблагоприятном состоянии финансового рынка. В этом случае формулы для вычисления нетто-премий «чистого» контракта и контракта с «гарантией» совпадают. Размер нетто-премии контракта с «гарантией» при увеличении  $K$  увеличивается по сравнению с «чистым» контрактом. Это объясняется тем, что страховой компании требуются дополнительные средства для накопления гарантированных выплат.

Проведем анализ изменения размера нетто-премии контракта с «гарантией» при изменении начальных взносов в безрисковые и рискованные активы. Результаты будем сравнивать с размерами нетто-премий, рассчитанных по традиционной схеме. В табл. 2 приведены результаты вычисления нетто-премий в различных схемах страхования.

Таблица 2

Изменение размера нетто-премии контракта с «гарантией» при изменении начальных взносов в безрисковые и рискованные активы

Начальный взнос в безрисковые активы	Начальный взнос в рискованные активы	Размер гарантии	Нетто-премия контракта с «гарантией»	Нетто-премия «чистого» контракта	Нетто-премия традиционного контракта
60	100	147.576	110.661	97.6048	156.168
80	100	196.768	121.29	97.6048	175.689
100	100	245.96	133.885	97.6048	195.21
140	100	344.344	163.039	97.6048	234.252
100	0	245.96	97.6048	0	97.6048
100	5	245.96	97.61	4.88	102.485
100	10	245.96	97.6837	9.76048	107.365
100	60	245.96	110.661	58.5629	156.168
100	100	245.96	133.885	97.6048	195.21

Как видно из табл. 2, для контракта с «гарантией» при увеличении начального вклада в безрисковые активы различие в величине нетто-премии гибких и традиционных схем страхования становится незначительным, и в случае вложения начальных средств только в безрисковые активы размер нетто-премии контракта с «гарантией» равен нетто-премии традиционного контракта. Если размер гарантированной выплаты  $K = 0$ , то контракт с «гарантией» преобразуется в «чистый» контракт (размеры нетто-премий указанных контрактов совпадают), что соответствует выражениям (1), (2).

#### 4. Выводы

Рассмотрена задача определения оптимальных параметров страховой деятельности в инновационных схемах страхования.

Проведено сравнение традиционных и гибких схем страхования, «чистого» контракта и контракта с «гарантией» для супружеских пар. Проведен анализ зависимости размера нетто-премий от процентной ставки, процесса цен рискового актива, величины гарантированной выплаты, начальных взносов в безрисковые и рисковые активы.

*Научная новизна* результатов исследования заключается в установлении условий, в которых выгодным является заключение каждого из рассмотренных типов контрактов страхования.

Данная задача может быть обобщена на случай других типов финансовых рынков, в частности, неполного финансового рынка.

*Практическая значимость* результатов исследования состоит в возможности применения предложенных расчетов для обеспечения актуарной деятельности в страховых компаниях, заинтересованных во внедрении инновационных схем страхования в целях повышения конкурентоспособности на развивающемся страховом рынке.

**Список литературы:** 1. Мельников А. В. Риск-Менеджмент: стохастический анализ рисков в финансах и страховании. М: АНКИЛ, 2001. 345с. 2. Мельников А. В. Финансовые рынки: Стохастический анализ и расчет производных ценных бумаг. М: ТВП, 1997. 354с. 3. Шоломицкий А.Г. Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска. М: ГУ ВШЭ, 2005. 400с. 4. Четыркин Е.М. Актуарные расчеты в негосударственном пенсионном и медицинском страховании. М.: Дело, 2002. 267с.

*Поступила в редколлегию 25.05.2009*

**Гибкина Надежда Валентиновна**, доцент кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

**Волкогруб Светлана Владимировна**, студентка ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, e-mail: dmitrenko\_sv@mail.ru.

---

УДК 004.942:621.6:622.691

*А.Д. ТЕВЯШЕВ, И.Г. ГУСАРОВА, А.В. КАМИНСКАЯ*

## **УЧЕТ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**

---

Рассматривается математическая модель и метод расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта природного газа, учитывающие модель течения газа через запорную арматуру и позволяющие рассчитывать параметры газовых потоков в линейных участках магистральных газопроводов с учетом динамики работы запорной арматуры.

### **1. Введение**

Многониточные магистральные газопроводы (ММГ) являются наиболее сложными объектами газотранспортной системы, при моделировании режимов транспорта газа по ММГ необходимо учитывать все особенности транспортирования газа под высоким давлением на большие расстояния. Через определенные интервалы на ММГ установлены компрессорные станции, поддерживающие давление в газопроводе, и краны, необходимые для локализации в случае аварии участка трубопровода или отключения участков трубопроводов при проведении на них ремонтно-профилактических работ. При этом технологическое оборудование на ММГ, а именно: запорные и регулирующие устройства, сужающие сечение трубы – может оказывать влияние на режимы транспорта газа, которые в силу различных причин являются нестационарными и неизотермическими. Это влияние заключается в гидравлической потере давления на так называемых местных гидравлических сопротивлениях: вентилях, кранах, задвижках, диафрагмах, всевозможных закруглениях, сужениях, расширениях и т.д., т.е. всюду, где поток претерпевает деформацию, которые в отдельных случаях могут значительно влиять на изменение параметров газового потока (давление, расход газа и температуру) при расчетах реальных процессов течения природного газа. Поэтому актуальной задачей является необходимость учитывать эти потери при моделировании нестационарных неизотермических режимов транспорта газа (ННРТГ) по линейным участкам (ЛУ) ММГ через запорную арматуру.

В связи с этим *целью* данного исследования является разработка метода решения системы дифференциальных уравнений математической модели (ММ) ННРТГ в ЛУ ММГ, включающей ММ запорной арматуры, в целях учета динамики ее работы.

Решаются следующие *задачи*: выбор ММ запорной арматуры и разработка метода расчета ННРТГ в ЛУ ММГ, математическая модель которых включает в себя ММ участков трубопроводов (УТ) и запорной арматуры.

## 2. Структура и математическая модель ЛУ ММГ

Математической моделью структуры ЛУ ММГ является ориентированный граф  $G(V, M)$ , где  $V$  – множество узлов графа,  $M$  – множество дуг графа. Узлы графа представляют собой места соединения технологических элементов между собой. Множество дуг  $M = M_1 \cup M_2$ , где  $M_1$  – множество дуг графа, соответствующих УТ,  $M_2$  – множество дуг графа, соответствующих кранам. Множество узлов  $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$ , где  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – множество входов ММГ, множество промежуточных узлов, множество выходов ММГ, множество входов и выходов в  $f$ -й кран,  $f = \overline{1, \theta}$ ,  $f \in M_2$  соответственно,  $|V| = v$ ,  $|V_1| = v_1, |V_2| = v_2, |V_3| = v_3, |V_4| = |V_5| = \theta$ .

В качестве математической модели ННРТГ по участку трубопровода, представляющему собой цилиндрическую трубу постоянного диаметра, взята система дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающая дроссель-эффект (индекс УТ для удобства опущен) [1, 2]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (1 - \alpha ST \frac{W^2}{P^2}) \frac{\partial P}{\partial x} + 2\alpha ST \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \beta ST \frac{W|W|}{P} + \frac{g}{\alpha S T} \frac{P}{dx} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \alpha ST \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \alpha S \gamma T \frac{W}{P} \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha S (\gamma - 1) \frac{T^2}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{4K}{D} (\gamma - 1) \frac{T}{P} (T - T_{гр}) + g (\gamma - 1) \frac{WT}{P} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (3)$$

где  $\alpha = \frac{zgR}{S}$ ,  $\beta = \frac{\lambda\alpha}{2D}$ ,  $\gamma = \frac{C_p}{C_p - zgR}$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы;  $C_p$  – удель-

ная теплоемкость газа;  $z$  – коэффициент сжимаемости газа;  $W(x, t)$ ,  $P(x, t)$ ,  $T(x, t)$  – удельный массовый расход, давление и температура,  $t$ ;  $x$  – временная и пространственная координаты;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  – диаметр трубы;  $K$  – коэффициент теплопередачи от трубы к грунту;  $T_{гр}$  – температура грунта;  $h$  – глубина залегания трубы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Систему уравнений (1)–(3) для  $j$ -го УТ (индекс УТ опущен) запишем в матричной форме:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + B \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \Phi, \quad (4)$$

где

$$B = \begin{bmatrix} 2\alpha TS \frac{W}{P} & 1 - \alpha TS \frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha TS & 0 & 0 \\ \alpha (\gamma - 1) S \frac{T^2}{P} & 0 & \alpha \gamma TS \frac{W}{P} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} -\beta TS \frac{W|W|}{P} - \frac{g}{\alpha S T} \frac{P}{dx} \frac{dh}{dx} \\ 0 \\ -\frac{4K}{D} (\gamma - 1) \frac{T}{P} (T - T_{гр}) - \frac{g}{S} (\gamma - 1) \frac{TW}{P} \frac{dh}{dx} \end{bmatrix}, \quad \varphi = (W, P, T).$$

Условно все виды запорной арматуры (задвижки, клапаны и краны) будем называть кранами. В качестве ММ линейного крана при переводе всех единиц параметров в систему единиц СИ предлагается выбрать модель, представляющую собой уравнения сохранения энергии и местных потерь давления, которые описывают режимы транспорта газа (РТГ) через  $f$ -й кран ( $f = \overline{1, \theta}$ ). Модель имеет следующий вид [3]:

$$P_K^f = P_H^f - \zeta \frac{Rg}{2(F_{\text{ВЫХ}}^f)^2} \frac{T_K^f z_K^f}{P_K^f} (G_H^f)^2, \quad (5)$$

$$T_K^f = T_H^f - D_j (P_H^f - P_K^f), \quad (6)$$

где  $P_H^f$ ,  $P_K^f$  — давление на входе и выходе f-го крана соответственно;  $\zeta$  — коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $D_j$  — коэффициент Джоуля-Томсона;  $z_K^f$  — коэффициент сжимаемости;  $G_H^f$  — массовый расход газа на входе f-го крана;  $F_{\text{ВЫХ}}^f$  — площадь сечения трубы за краном;  $T_H^f$ ,  $T_K^f$  — температура на входе и выходе f-го крана.

Уравнение (5) описывает местную потерю давления. Поскольку кран можно рассматривать как местное сопротивление, то наибольшее влияние на температуру оказывает эффект Джоуля-Томпсона, т.е. изменение температуры газа при адиабатическом дросселировании — медленном протекании газа под действием постоянного перепада давлений сквозь дроссель, местное препятствие газовому потоку. Учитывая малую протяженность сечения крана, используем расчетную формулу (6).

Для m-го промежуточного узла условия согласования параметров газового потока (для массового расхода, давления и температуры соответственно) принимают следующий вид:

$$\sum_{j \in V_m^+} G_j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G_i(x^+, t), m \in V_2, \quad (7)$$

$$P_j(x^{++}, t) = P_i(x^+, t), j \in V_m^+, i \in V_m^-, \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} ((G_j(x^{++}, t))^+ \cdot T_j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G_i(x^+, t))^- \cdot T_i(x^+, t)) = T_{\text{ср}}^m \cdot (\sum_{j \in V_m^+} ((G_j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G_i(x^+, t))^-), \quad (9)$$

кроме того,

$$\text{если } G_j(x^{++}, t) < 0, \text{ то } T_j^m(x^{++}, t) = T_{\text{ср}}^m(t), j \in V_m^+,$$

$$\text{если } G_i(x^+, t) > 0, \text{ то } T_i^m(x^+, t) = T_{\text{ср}}^m(t), i \in V_m^-,$$

где  $(a)^+ = \begin{cases} a, a \geq 0 \\ 0, a < 0 \end{cases}$ ,  $(a)^- = \begin{cases} -a, a < 0 \\ 0, a \geq 0 \end{cases}$ ,  $x^+$ ,  $x^{++}$  — начальная и конечная координата соответствующего участка;  $V$  — множество узлов сети;  $V_m^+$ ,  $V_m^-$  — множество индексов дуг, входящих и выходящих из m-го узла сети;  $G(x, t)$ ,  $T(x, t)$ ,  $P(x, t)$  — массовый расход ( $\text{кг}/\text{с}$ ), давление (Па) и температура (К) для j-го участка;  $T_{\text{ср}}^m(t)$  — средняя температура вытекающего из m-го узла газа (К).

Структура модели крана представлена в виде двухполюсника, имеющего один вход и один выход. Условия согласования в f-м узле ( $f \in V_3$ ), являющемся входом f-го крана, ( $f = \overline{1, \theta}$ ) имеют следующий вид:  $P(x^{++}, t) = P_H^f(t)$ ,  $W(x^{++}, t)S = G_{\text{КР}}^f(t)$ ,  $T(x^{++}, t) = T_H^f(t)$ , где  $x^{++}$  — конечная координата соответствующего участка, прилегающего к входу f-го крана;  $S$  — площадь поперечного сечения трубы соответствующего участка, прилегающего к входу f-го крана;  $W(x, t)$ ,  $P(x, t)$ ,  $T(x, t)$  — удельный массовый расход, давление и температура газа участка, прилегающего к входу f-го крана;  $G_{\text{КР}}^f(t)$  — массовый расход газа через f-й кран.

Условия согласования в f-м узле, ( $f \in V_4$ ), являющемся выходом f-го крана, ( $f = \overline{1, \theta}$ ) имеют следующий вид:  $P(x^+, t) = P_K^f(t)$ ,  $W(x^+, t)S = G_{\text{КР}}^f(t)$ ,  $T(x^+, t) = T_K^f(t)$ , где  $x^+$  — начальная координата соответствующего участка, прилегающего к выходу f-го крана;  $S$  — площадь поперечного сечения трубы соответствующего участка, прилегающего к выходу f-го крана;  $W(x, t)$ ,  $P(x, t)$ ,  $T(x, t)$  — удельный массовый расход, давление и температура газа участка, прилегающего к выходу f-го крана.

Таким образом, общая математическая модель ННРТГ в ЛУ ММГ представляет собой взаимосвязанные системы дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих каждому УТ, и системы нелинейных алгебраических уравнений, соответствующих каждому крану, которые связаны между собой системой линейных алгебраических уравнений, соответствующих условиям согласования параметров газового потока в узлах графа.

Для того чтобы система уравнений (4) была разрешимой, необходимо задать граничные условия для узлов, соответствующих входам и выходам ЛУ ММГ. Граничные узлы 1-го типа – это узлы, для которых задано давление, как функция времени, и 2-го типа - задан расход, как функция времени.

Граничные условия для  $m$ -го выходного и входного узлов имеют вид:

$$G_v^m(t) = G^m(t) \text{ (узел 2-го типа) или } P_{y3}^m(t) = P^m(t) \text{ (узел 1-го типа),}$$

кроме того, на входах задана температура поступающего газа  $T_v^m(t) = T^m(t)$ .

Задается также начальное распределение расходов, давлений и температур для ЛУ:  $W_j(x_j, 0) = W_j^0(x_j)$ ,  $P_j(x_j, 0) = P_j^0(x_j)$ ,  $T_j(x_j, 0) = T_j^0(x_j)$ , где  $x_j \in [x_j^+, x_j^{++}]$ ,  $\forall j \in M$ .

### 3. Метод решения системы уравнений математической модели ЛУ ММГ

Для получения численного решения система (4) аппроксимируется разностными уравнениями с использованием неявной конечно-разностной схемы, определенной на пятиточечном шаблоне (с разностными операторами второго порядка аппроксимации по пространственной и временной переменным) (рис. 1) [1].

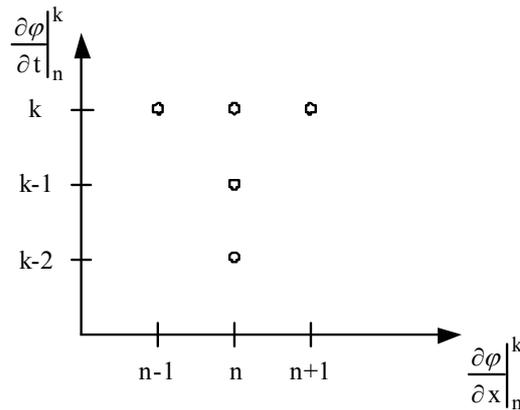


Рис. 1. Пятиточечный шаблон

Устанавливаем равномерную сетку с постоянными шагами по пространственной и временной переменным и систему дифференциальных уравнений аппроксимируем следующими соотношениями [1]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}|_n^k = \frac{3\varphi_n^k - 4\varphi_n^{k-1} + \varphi_n^{k-2}}{2\Delta t}, n = \overline{0, N}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x}|_n^k = \begin{cases} \frac{\varphi_1^k - \varphi_0^k}{\Delta x}, & n = 0, \\ \frac{\varphi_{n+1}^k - \varphi_{n-1}^k}{2\Delta x}, & n = \overline{1, N-1}, \\ \frac{\varphi_N^k - \varphi_{N-1}^k}{\Delta x}, & n = N. \end{cases} \quad (11)$$

С учетом (10) – (11) система уравнений для  $j$ -го участка трубопровода принимает вид:

$$\frac{3}{2\Delta t} \varphi_0^k - \frac{1}{\Delta x} B_0^k \varphi_0^k + \frac{1}{\Delta x} B_0^k \varphi_1^k = \Phi_0^k + \frac{2}{\Delta t} \varphi_0^{k-1} - \frac{1}{2\Delta t} \varphi_0^{k-2}, \quad (12)$$

$$-\frac{1}{2\Delta x} B_n^k \varphi_{n-1}^k + \frac{3}{2\Delta t} \varphi_n^k + \frac{1}{2\Delta x} B_n^k \varphi_{n+1}^k = \Phi_n^k + \frac{2}{\Delta t} \varphi_n^{k-1} - \frac{1}{2\Delta t} \varphi_n^{k-2}, n = \overline{1, N_j-1}, \quad (13)$$

$$\frac{3}{2\Delta t} \varphi_{N_j}^k + \frac{1}{\Delta x} B_{N_j}^k \varphi_{N_j}^k - \frac{1}{\Delta x} B_{N_j}^k \varphi_{N_j-1}^k = \Phi_{N_j}^k - \frac{2}{\Delta t} \varphi_{N_j}^{k-1} - \frac{1}{2\Delta t} \varphi_{N_j}^{k-2}. \quad (14)$$

Таким образом, получили систему нелинейных алгебраических уравнений, которая содержит  $3(N+1)$  уравнение и  $3(N+1)$  переменных. Данная система линеаризуется методом Ньютона.

Полученная линейная система для  $k$ -го временного слоя,  $r$ -й итерации и  $j$ -го УТ записывается в итерационном виде:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_0^{k,r,j-1} \delta \varphi_0^{k,r,j} + \frac{1}{\Delta} B_0^{k,r,j-1} \delta \varphi_1^{k,r,j} = \psi_0^{k,r,j-1}, \\ & \dots \\ & -\frac{1}{2\Delta} B_n^{k,r,j-1} \delta \varphi_{n-1}^{k,r,j} + \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_n^{k,r,j-1} \delta \varphi_n^{k,r,j} + \frac{1}{2\Delta} B_n^{k,r,j-1} \delta \varphi_{n+1}^{k,r,j} = \psi_n^{k,r,j-1}, n = \overline{1, N_j-1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_{N_j}^{k,r,j-1} \delta \varphi_{N_j}^{k,r,j} + \frac{1}{\Delta} B_{N_j}^{k,r,j-1} \delta \varphi_{N_j-1}^{k,r,j} = \psi_{N_j}^{k,r,j-1},$$

где  $\delta \varphi_0^{k,r,j}, \dots, \delta \varphi_{N_j}^{k,r,j}$  – векторы поправок к неизвестным;  $\psi_0^{k,r,j-1}, \dots, \psi_{N_j}^{k,r,j-1}$  – векторы

невязок в соответствующих точках пространства;  $\left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_0^{k,r,j-1}, \dots, \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_{N_j}^{k,r,j-1}$  – матрицы Якоби в соответствующих точках пространства.

Для решения системы линейных алгебраических уравнений (15) необходимо вычислить векторы невязок для каждого  $j$ -го участка трубопровода [2]:

$$\begin{aligned} \psi_0^{k,r,j} &= \frac{3}{2\Delta t} \varphi_0^{k,r,j} - \frac{1}{\Delta x} B_0^{k,r,j} \varphi_0^{k,r,j} + \frac{1}{\Delta x} B_0^{k,r,j} \varphi_1^{k,r,j} - \Phi_0^{k,r,j} - \frac{2}{\Delta t} \varphi_0^{k-1,j} + \frac{1}{2\Delta t} \varphi_0^{k-2,j}, \\ \psi_n^{k,r,j} &= -\frac{1}{2\Delta x} B_n^{k,r,j} \varphi_{n-1}^{k,r,j} + \frac{3}{2\Delta t} \varphi_n^{k,r,j} + \frac{1}{2\Delta x} B_n^{k,r,j} \varphi_{n+1}^{k,r,j} - \Phi_n^{k,r,j} - \frac{2}{\Delta t} \varphi_n^{k-1,j} + \frac{1}{2\Delta t} \varphi_n^{k-2,j}, n = \overline{1, N_j-1}, \\ \psi_{N_j}^{k,r,j} &= \frac{3}{2\Delta t} \varphi_{N_j}^{k,r,j} + \frac{1}{\Delta x} B_{N_j}^{k,r,j} \varphi_{N_j}^{k,r,j} - \frac{1}{\Delta x} B_{N_j}^{k,r,j} \varphi_{N_j-1}^{k,r,j} - \Phi_{N_j}^{k,r,j} - \frac{2}{\Delta t} \varphi_{N_j}^{k-1,j} + \frac{1}{2\Delta t} \varphi_{N_j}^{k-2,j}. \end{aligned}$$

По невязкам вычисляются элементы матрицы Якоби  $\left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_0^{k,r,j}$  в начальной точке 0,

$\left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_n^{k,r,j}$  во внутренних точках ( $n = \overline{1, N_j-1}$ ) и  $\left[ \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \right]_{N_j}^{k,r,j}$  в конечной точке  $N_j$  [2].

В итоге полученную линейную систему уравнений (15) упрощаем при помощи условий согласования. Условия согласования (7)-(8) линеаризуем:

$$\sum_{j \in V_m^+} S_j \delta W_{N_j}^{k,r,j} = \sum_{i \in V_m^-} S_i \delta W_i^{k,r,i}, m \in V_2, \quad (16)$$

$$\delta P_{N_j}^{k,r,j} = \delta P_i^{k,r,i}, j \in V_m^+, i \in V_m^-. \quad (17)$$

В соответствии с предложенным методом из условия (16) необходимо выбрать переменную по удельному массовому расходу  $\delta W_{N_{j_0}}^{k,r,j_0}$ , равную

$$\delta W_{N_{j_0}}^{k,r,j_0} = \frac{\sum_{i \in V_m^-} S_i \delta W_i^{k,r,i}}{S_{j_0} \sum_{\substack{j \in V_m^+ \\ j \neq j_0}} S_j \delta W_{N_j}^{k,r,j}}, m \in V_2,$$

и исключить ее из системы уравнений. При этом для промежуточных узлов уравнение, в котором находилась исключенная переменная по удельному массовому расходу, складываем с уравнением с подобной переменной по удельному массовому расходу. Из условия

(17) для промежуточных узлов графа ММГ необходимо оставить переменную  $\delta P_{j_0}^{k,r,j_0}$ ,  $j_0 \neq j_f$ ,

а все остальные переменные из системы уравнений исключить, кроме переменных, относящихся к участкам трубопровода, на которых находятся краны. При этом для промежуточных узлов уравнения, в которых находились исключенные переменные по давлению, складываем с уравнением с подобной переменной по давлению.

Совместный расчет режимов транспорта газа УТ через краны осуществляем следующим способом. Для всех узлов, являющихся выходами из кранов, соответствующие уравнения для определения невязок в 0 точке j-го участка по УТ заменяются уравнениями невязок модели крана (индекс крана для удобства опущен):

$$\psi_{0,2 \text{ кр}}^{k,r,j} = P_H^{k,r,j} - P_K^{k,r,j} - \zeta \frac{Rg}{2(F_{\text{ВЫХ}}^{k,r,j})^2} \frac{T_K^{k,r,j} z_K^{k,r,j}}{P_K^{k,r,j}} (G_H^{k,r,j})^2,$$

$$\psi_{0,3 \text{ кр}}^{k,r,j} = T_H^{k,r,j} - T_K^{k,r,j} - D_j (P_H^{k,r,j} - P_K^{k,r,j}),$$

Условия согласования для f-го крана линеаризуем:

$$\delta P_{N_j}^{k,r,j} = \delta P_H^f(t), \quad \delta G_{\text{КР}}^f(t) = \delta W_{N_j}^{k,r,j} S_j, \quad \delta T_{N_j}^{k,r,j} = \delta T_H^f(t),$$

$$\delta P_i^{k,r,i} = \delta P_K^f(t), \quad \delta G_{\text{КР}}^f(t) = \delta W_i^{k,r,i} S_i, \quad \delta T_i^{k,r,i} = \delta T_K^f(t).$$

Далее переменную по удельному массовому расходу, относящуюся ко входу или выходу из крана, также исключаем из системы уравнений следующим способом. Заменяем переменную  $\delta W_{N_j}^{k,r,j}$  в системе уравнений в соответствии с условиями согласования для f-

го крана по формуле:  $\delta W_{N_j}^{k,r,j} = \frac{S_i}{S_j} \cdot \delta W_i^{k,r,i}$ . При этом для узлов, являющихся входом и выходом из крана, уравнение, в котором находилась исключенная переменная по удельному массовому расходу, складываем с уравнением с подобной переменной по удельному массовому расходу.

После преобразований система уравнений решается относительно векторов поправок к неизвестным методом Гаусса с выбором главного элемента.

На каждом шаге итерационного процесса после нахождения параметров газового потока на каждом временном слое в соответствии с формулой (11) вычисляем среднюю температуру газа в узлах ММГ.

#### 4. Пример

Рассмотрим пример расчета ННРТГ по ММГ через запорную арматуру с учетом динамики закрытия крана. Расчетная схема и граф рассматриваемого ММГ представлена на рис. 2 и 3 соответственно.

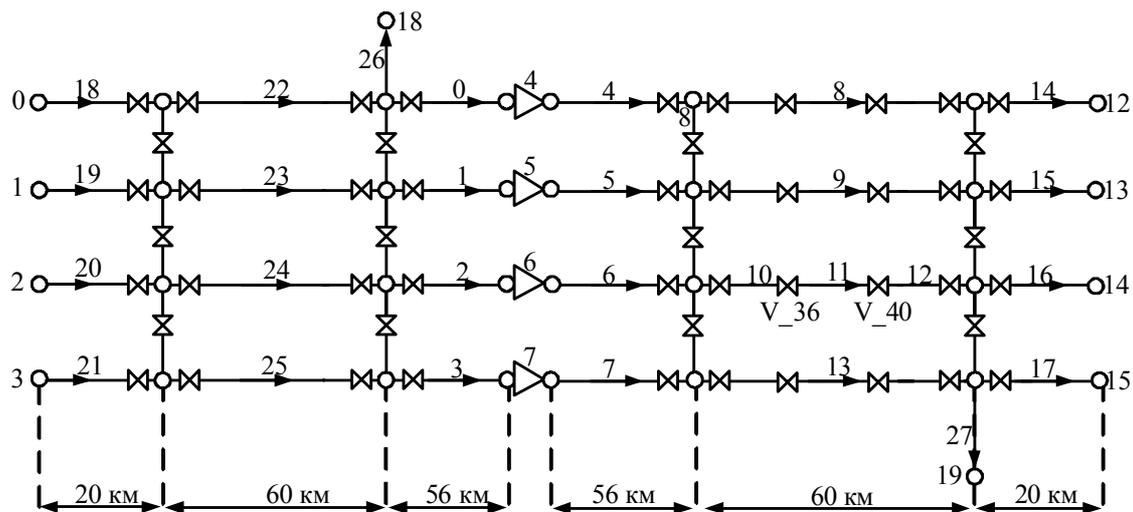


Рис. 2. Расчетная схема многониточного магистрального газопровода

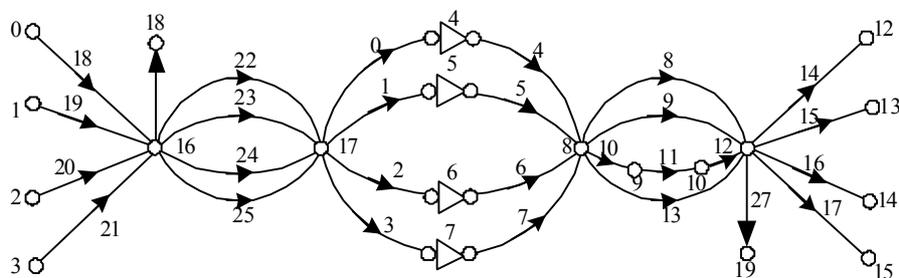


Рис. 3. Граф расчетной схемы многониточного магистрального газопровода

В качестве начального условия принимаем стационарное течение газа с давлением  $P=84,636$  атм., температурой  $T=40$  °С и суммарным коммерческим расходом природного газа, равным  $265$  млн.м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 1. Основные параметры, их обозначения и значения

Обозначение	Численная величина	Название параметра
Характеристики УТ		
$D_i$	1400	Внутренние диаметры труб, мм
$h$	10	Толщина стенок, мм
$C_p$	0,655952	Удельная теплоемкость, ккал/(кг·°С)
$K$	1,4	Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·°С)
$\Delta$	0,604707	Относительная плотность газа по воздуху
$t_{гр}$	10	Температура грунта на глубине заложения газопровода, °С

В тестовом примере краны  $V_{36}$  и  $V_{40}$  линейно закрывались в течение 2-х минут через 30 и 45 мин. после начала расчета соответственно, а остальные предполагались полностью открытыми. График зависимости площади сечения крана при его закрытии от времени представлен на рис. 4. Граничные условия представлены в табл. 2. В узлах 4 – 7 расчетного графа располагались компрессорные цеха, моделирование которых проводилось по алгоритму, представленному в [2]. Расчет проводился в течение 24-х часов с шагом разностной сетки по времени 30 с и с шагом по пространству, равным 10 км. В

результате расчета получаем распределение параметров газового потока по рассматриваемому ММГ. Промоделированный переходной процесс заканчивается по расходу и давлению за 1200 мин., а по температуре – за 24 часа.

Моделирование динамики закрытия крана происходило при помощи изменения площади сечения крана во времени (рис. 4).

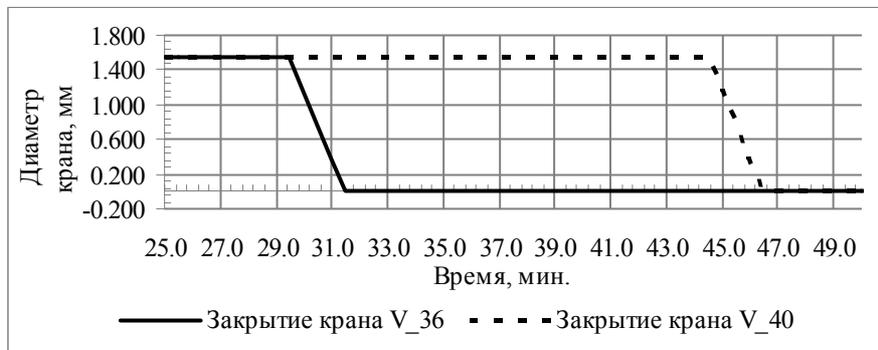


Рис. 4. График зависимости площади сечения крана при его закрытии от времени

Таблица 2. Граничные условия

Узлы сети	Значения в узлах сети	Узлы сети	Значения в узлах сети
0	$P(t) = 8,4 \text{ МПа}, T(t) = 40^0 \text{ С}$	13	$q^{13}(t) = 60 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, t \geq 0 \text{ мин.}$
1	$P(t) = 8,4 \text{ МПа}, T(t) = 40^0 \text{ С}$	14	$q^{14}(t) = 65 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, t \geq 0 \text{ мин.}$
2	$P(t) = 8,4 \text{ МПа}, T(t) = 40^0 \text{ С}$	15	$q^{15}(t) = 60 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, t \geq 0 \text{ мин.}$
3	$P(t) = 8,4 \text{ МПа}, T(t) = 40^0 \text{ С}$	18	$q^{18}(t) = 15 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, t \geq 0 \text{ мин.}$
12	$q^{12}(t) = \begin{cases} 55 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, & t \leq 360 \text{ мин.} \\ 70 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, & t > 360 \text{ мин.} \end{cases}$	19	$q^{19}(t) = \begin{cases} 10 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, & t \leq 120 \text{ мин.} \\ 30 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут.}, & t > 120 \text{ мин.} \end{cases}$

На рис. 5 – 7 представлены графики зависимости параметров газового потока от времени для 3-й нитки (на которой расположены краны V\_36 и V\_40) в местах расположения крановых площадок.

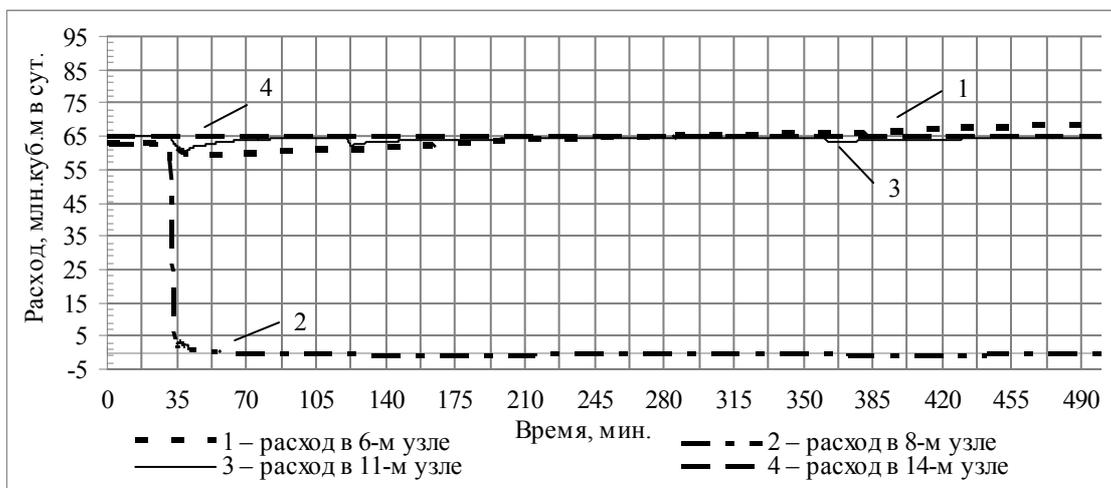


Рис. 5. График зависимости расхода от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

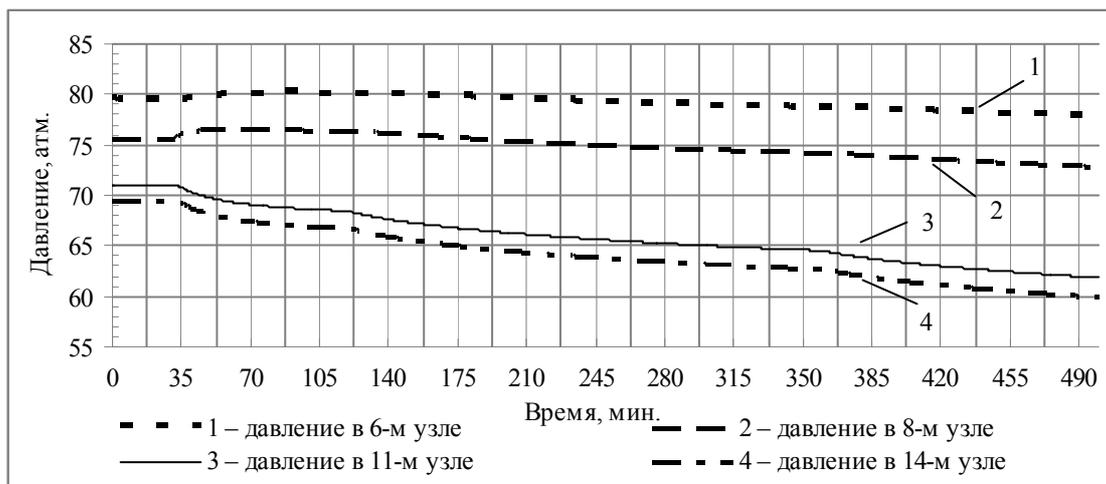


Рис. 6. График зависимости давления от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

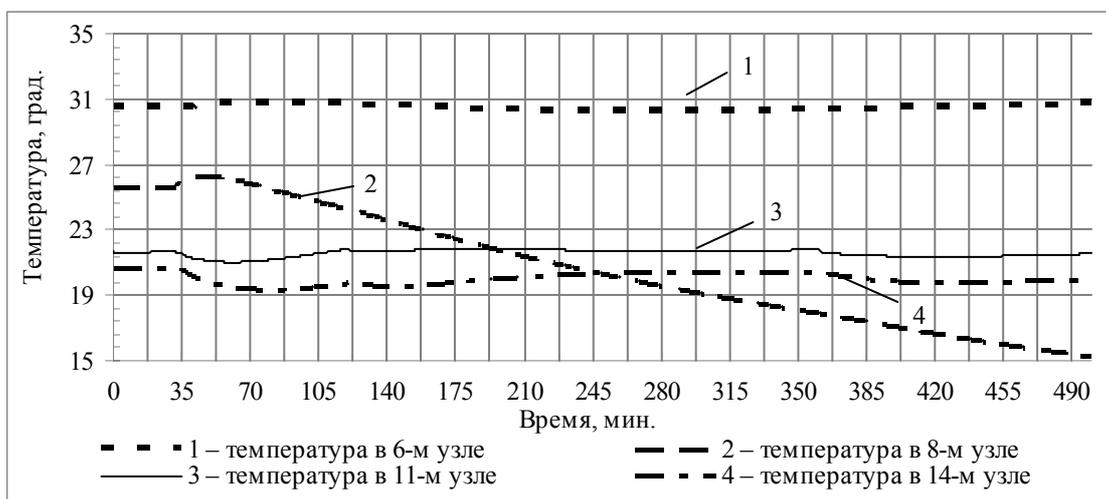


Рис. 7. График зависимости температуры от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

## 5. Вывод

*Новизна* – впервые предложен метод расчета ННРТГ в ЛУ ММГ, математическая модель которых включает в себя математические модели участков трубопровода и запорной арматуры, отличающийся от существующих методов расчета способом включения и исключения уравнений моделей всех элементов ММГ в общую систему уравнений общей математической модели и позволяющий с высокой точностью рассчитывать реальные процессы течения газа в ММГ в реальном масштабе времени, а также прогнозировать различные ситуации в целях принятия необходимых управляющих воздействий. В качестве математической модели по УТ взята система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая ННРТГ.

Экспериментальные исследования, проведенные по различным тестовым примерам, показали, что предложенный метод расчета ННРТГ в ММГ через запорную арматуру можно применять при моделировании переходных процессов в магистральных газопроводах с учетом времени полного перекрытия кранов.

*Практическая значимость* – учет действия запорной арматуры на ММГ позволяет наиболее адекватно описывать ННРТГ по ЛУ в ММГ. Важность разработанного метода состоит в том, что расчет ННРТГ по ММГ с учетом динамики работы запорной арматуры позволит в дальнейшем моделировать аварийные ситуации в целях своевременной локализации аварий на магистральных газопроводах.

**Список литературы:** 1. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Каминская А.В.* Математическая модель и метод расчета нестационарных режимов в линейных участках магистральных газопроводах // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 2(37). С. 144-150. 2. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Буданцева Ю.В.* Особенности численного моделирования нестационарных неизотермических режимов транспорта газа по фрагменту сети с активными элементами // Проблемы нефтегазовой промышленности: Сб. научн. трудов. Вып. 5. Киев, 2007. С. 446-452. 3. *Сарданашивили С.А.* Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 577 с.

*Поступила в редколлегию 11.04.2009*

**Тевяшев Андрей Дмитриевич**, академик УНГА, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: теория стохастических моделей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.

**Гусарова Ирина Григорьевна**, канд. техн. наук, проф. кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование и управление систем с распределенными параметрами. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.

**Каминская Анна Владимировна**, аспирантка кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: численное моделирование трубопроводных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.

---

УДК 631.2 : 631.175 : 65.011.56

*А.П. СЛЕСАРЕНКО, М.А. РОМАНЧЕНКО, О.С. СОРОКА*

## **ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ РЕЖИМАМИ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕХНОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ЗОНАХ ВИРОБНИЧИХ СПОРУД**

---

На основі ефективних математичних моделей обчислення й прогнозування розподілу енергопотоків у багаторівневої електротеплоакумуляційній системі обігріву (БЕТСО) обґрунтовується методологія розробки автоматизованих електротеплоакумуляційних установок, що забезпечують дотримання стандартів теплового режиму мікроклімату виробничих споруд різного функціонального призначення. Пропонується структура системи автоматичного регулювання, у контур зворотного зв'язку якої входить блок моделювання БЕТСО. Формуються вимоги до математичної моделі БЕТСО.

### **1. Постановка проблеми**

В індустрії цивільного і промислового будівництва існує концепція «енергоефективних будівель», яка передбачає автоматизацію енергоспоживання, діагностику, захист, диспетчеризацію процесів вентиляції і опалення. В цілому рівень сучасного розвитку систем автоматизованого життєзабезпечення будівель, які перебувають в умовах постійної зміни зовнішніх і внутрішніх збурюючих факторів, дозволяє вважати такі будівлі «інтелектуальними» [1,2]. Останнє передбачає необхідність програмувати керуючі системи так, щоб параметри внутрішнього середовища будівлі зберігалися в заздалегідь заданих межах. Цей досвід має певну цінність також і для виробничих споруд (ВС) АПК, де досягнення високої енергоефективності електротехнологій та технічних засобів забезпечення стандартів теплових режимів виробництва має актуальне значення в цілому для економіки України [3,4]. Найбільш перспективними в цьому плані є електротеплоакумуляційні установки, які можуть застосовуватись як основні для повного опалення ВС, так і додаткові в складі інших основних систем опалення (водяних, парових, повітряних).

*Метою роботи* є обґрунтування доцільності використання системи автоматичного регулювання (САР) для керування електротеплоакумуляційною системою мікроклімату виробничих споруд АПК, обґрунтування складу і структури САР, режимів та алгоритмів функціонування САР й формулювання вимог до її складових.

## 2. Концепція автоматичного керування БЕТСО

Для вирішення проблем прогнозування теплового стану, контролю та регулювання обігріву технологічно активних зон (ЗТА) приміщень АПК запропонована нагрівальна система (НС), що забезпечує більш високий якісний рівень дотримання стандартів теплового режиму у ВС завдяки застосуванню енергозберігаючих багатофункціональних систем БЕТСО як обігрівних приладів резисторного типу, розташованих нижче рівня підлоги, при живленні їх нагрівачів від традиційних і нетрадиційних поновлювальних джерел енергії [5-8]. Конструкція БЕТСО, яка являє собою паралелепіпед з N-шаровою структурою пасивних та активних (з підводом енергії) шарів, розглянута, наприклад, у роботах [5,6]. З урахуванням прийнятих припущень щодо характеру теплообміну на граничних поверхнях розроблена математична модель теплових процесів у такій структурі, яка зводиться до рішення задачі теплопровідності в системі плоских шарів із дискретним енергопідводом до спеціальних нагрівачів трубчастого типу (СЕТ) активного шару з різною потужністю. Усього в 3-х активних шарах (ярусах) обігрівної системи, що розглядається, по висоті паралелепіпеда (1.1 .. 1.5 м) розташовано від поверхні підлоги відповідно 9, 7 та 5 СЕТ (на смузі завширшки 5 м) з диференційованим підводом електроенергії. Таке конструктивне рішення системи обігріву ЗТА виправдане не тільки підвищенням технологічної надійності, але й з точки зору досягнення сукупності нових функціональних можливостей. Система дозволяє забезпечувати режими: а) максимального енергозбереження; б) термостабілізації поверхні підлоги; в) акумуляції тепла; г) працювати в режимі “споживач-регулятор”.

В роботі БЕТСО доцільно розрізнити 5 варіантів підведення енергії до ярусів НС, які будемо називати режимами БЕТСО: режим I – підвід енергії у ВЕРХНІЙ (від поверхні підлоги) ярус; режим II – підвід енергії одночасно у ВЕРХНІЙ і СЕРЕДНІЙ яруси; режим III – підвід енергії тільки в СЕРЕДНІЙ ярус; режим IV – підвід енергії одночасно у СЕРЕДНІЙ і НИЖНІЙ яруси; режим V – підвід енергії тільки в НИЖНІЙ ярус. На рис. 1 схематично показано розташування шарів НС та відповідні позначення.

Режими →	I	II	III	IV	V	
Співвідношення енергоресурсу $P$ і граничних потужностей $P_{i0}$	$P=P_{10}$	$P_{10}<P<P_{20}$	$P=P_{10}$	$P_{20}<P<P_{30}$	$P=P_{30}$	
Поверхня підлоги	$t_n=t_n^H$	$t_n=t_n^H$	$t_n=t_n^H$	$t_n=t_n^H$	$t_n=t_n^H$	
Бетон						11
Бетон						10
Бетон						9
Ярус 1: пісок, СЕТ						8
Пісок						7
Ярус 2: пісок, СЕТ						6
пісок						5
Ярус 3: пісок, СЕТ						4
Керамзитобетон						3
Пісок						2
Гідроізоляція						1
Масив ґрунту						

Рис. 1. Схематичне зображення багатошарової НС і варіанти розподілу енергії по активних ярусах (Режими); зафарбованими шарами позначено подачу енергії в яруси НС; ліворуч показано заповнення шарів, праворуч – нумерація шарів НС, починаючи від дна траншеї

Указані режими можуть бути реалізовані за допомогою САР, яка в реальному часі, використовує оперативну інформацію з датчиків, визначає кількість електроенергії, яку необхідно підвести до електронагрівників того чи іншого ярусу БЕТСО. Умови перерозподілу наявного енергоресурсу  $P$  представлені у верхньому рядку рис. 1, де  $P_{10}$  – потужність джерел енергії (питома потужність, Вт/м<sup>2</sup>), що підводиться до нагрівальних елементів 1-го ярусу і забезпечує на поверхні підлоги задану нормативну температуру  $t_n=t_n^H$  (режим 1). В

режимах 2 і 3 потужності джерел енергії, що підводяться до елементів 2-го або 3-го ярусів, також можуть забезпечувати на поверхні підлоги заданий рівень температур  $t_n = t_n^H$ , позначаються відповідно  $P_{20}$  (Вт/м<sup>2</sup>) і  $P_{30}$  (Вт/м<sup>2</sup>). При цьому має місце очевидне співвідношення  $P_{10} < P_{20} < P_{30}$ . При комбінованому живленні НС (живлення суміжних ярусів, режими II та IV) наявний енергоресурс  $P$  розщеплюється на дві складові з певними коефіцієнтами:

$$P^{(II)} = k_1^{(2)}P_1 + k_2^{(2)}P_2, \quad P^{(IV)} = k_2^{(4)}P_2 + k_3^{(4)}P_3. \quad (1)$$

Рівні споживання ярусів  $P_{j0}$  та величини коефіцієнтів  $k_j^{(2, 4)}$  ( $j=1, 2, 3$ ) визначаються геометричними параметрами БЕТСО і теплофізичними характеристиками її складових і можуть бути точно визначені з рішення відповідної задачі теплопровідності [5].

В теперішній час на ринку енергоресурсів між енергопостачальником та споживачем-виробником в галузі АПК складаються нові умови, які вимагають побудови гнучких енергоефективних систем забезпечення теплових стандартів мікроклімату ВС. Це досягається шляхом урахування таких підходів до енергоспоживання і енергозабезпечення систем створення мікроклімату:

децентралізація систем опалення – передбачає застосування автономних автоматизованих засобів опалення;

універсалізація систем опалення – передбачає можливість одночасного використання декількох видів енергоносіїв і джерел енергії, у тому числі НВДЕ;

функціональна адаптація до тарифної політики постачальників енергоресурсів, яка передбачає удосконалення організаційних і впровадження енергоефективних засобів гнучкого використання переваг пільгових тарифів з метою економії ресурсів виробників тієї або іншої продукції;

електрифікація й автоматизація (комп'ютеризація) виробничих процесів – передбачає істотне вдосконалення автоматизованих електротехнологій і технічних засобів, що базуються на прогресивних методах застосування електроенергії для забезпечення технологічних процесів виробництва сільськогосподарської продукції.

Висунуті вище принципи ефективного споживання енергії у сільському господарстві дозволяють цілеспрямовано підійти до розробки структури керованої системи мікроклімату виробничих приміщень. Надалі, враховуючи особливості певних видів приміщень, під такими будемо розуміти приміщення з виділеними технологічно активними зонами, наприклад, для утримання тварин. Необхідно враховувати, що розглянутий об'єкт керування й контролю – мікроклімат ВС, можна віднести до класу складних систем, який характеризується досить складною динамікою в умовах постійної зміни температурно-вологісних параметрів зовнішнього й внутрішнього середовища. Це спричиняє необхідність використовувати в системі регулювання математичну модель об'єкта для ідентифікації важливих функціональних взаємозв'язків її елементів [9, 10].

Отже, до структури запропонованої САР, яка будується з урахуванням багатофункціональності БЕТСО, необхідно включити такі підсистеми: інформаційно-вимірювальну, обробки даних і моделювання та виконавчу, причому саме математична модель БЕТСО є ключовою складовою САР. Функціонування такої САР дозволить відтворювати необхідний (оптимальний) перерозподіл всіх наявних енергоресурсів у системі, забезпечуючи в різних режимах або максимальну ефективність енергоспоживання, або оптимальне акумулювання надлишку енергоресурсів, або енергоефективну стабілізацію температурного розподілу в області ЗТА. Спеціалізований мікропроцесорний комплекс призначений виконувати діагностування і контроль стану об'єкта регулювання, розрахунок рівнів оптимальних витрат енергії та розподіл енергопотоків в БЕТСО, а також виконувати формування сигналів керування, відображення поточного стану системи в процесі виробничого циклу та формування сигналів щодо нештатного режиму роботи системи нагрівальних елементів.

На рис. 2 у графічному вигляді представлена концепція структури системи автоматичного регулювання мікроклімату при застосуванні БЕТСО. Система функціонує в такий спосіб. Періодично від системи датчиків, розташованих у контрольних точках БЕТСО, інформація в цифровому або аналоговому вигляді через лінії зв'язку й концентратор надходить у запам'ятовувальний пристрій керуючої обчислювальної машини (наприклад, ПК), де проводиться її обробка відповідно до закладеного в комп'ютер пакета спеціальних програм,

основною з яких є комп'ютерна модель функціонування БЕТСО, для підтримки заданого режиму. У випадку відхилення поточних параметрів у ЗТА, насамперед розподілу температури на поверхні підлоги або зміни умов теплообміну БЕТСО з навколишнім середовищем ВС, формуються сигнали керування, які через блок розподілу БРП регулюють розподіл енергопотоків у системі СЕТ у кожному з ярусів БЕТСО.

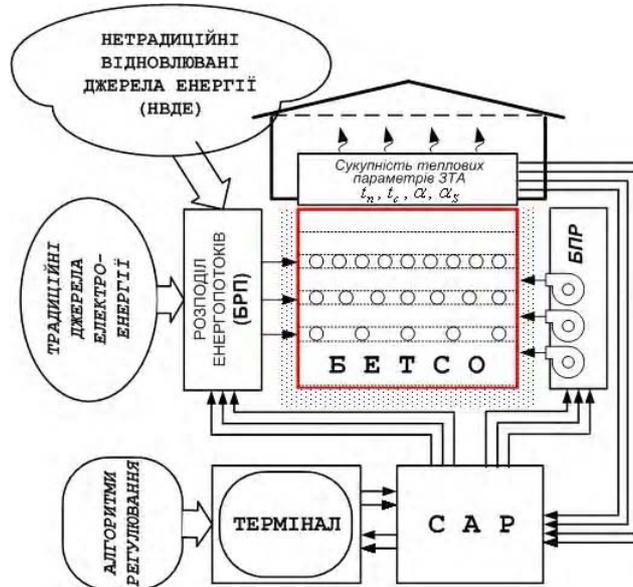


Рис. 2. Функціональна схема регулювання мікроклімату: БРП – блок розподілу енергопотоків; БПР – блок примусової регенерації тепла; термінал – пристрій відображення інформації щодо зовнішніх метеорологічних умов, поточного стану мікроклімату в ЗТА, енергопотоків у БЕТСО, вибору алгоритмів регулювання і корекції керування в ручному режимі

Програмне забезпечення САР дозволяє операторові в будь-який момент часу одержати на терміналі (екран монітора, друкувальний пристрій, пристрій уведення) дані про тепловий стан в будь-якій з контрольних точок об'єкта і, при необхідності, вносити корективи в хід процесу. При виникненні нештатних ситуацій в БЕТСО система САР, виконуючи діагностування в режимі реального часу, виробляє сигнали, що свідчать про пошкодження або аварію в системі.

Накопичувач інформації ПК дозволяє зберігати дані вимірів і обчислень, які в будь-який момент часу можуть бути отримані на термінальному пристрої. З їх допомогою можна проаналізувати поточний стан функціонування системи, поточну наявність всіх доступних видів енергії, ефективність їх використання та ін. Особливий інтерес представляють дані про кількість заощадженої енергії, витрати електричної і теплової енергії, оптимальний час запуску й останову системи нагрівання БЕТСО, параметри мікроклімату в ЗТА, метеорологічні дані.

### 3. Вимоги щодо спеціалізованої математичної моделі БЕТСО

Запропонована система керування мікрокліматом дозволить підтримувати заданий тепловий режим у ЗТА з високою точністю, тому що вона виконана за замкненою схемою з використанням головного зворотного зв'язку щодо основних параметрів – температури підлоги й повітря та характеристик тепловіддачі на граничних поверхнях БЕТСО.

Математична модель, призначена для використання в системі керування БЕТСО, відрізняється від моделей, призначених для дослідження або проектування аналогічних систем. При цьому пріоритетними можуть бути дві основні вимоги до такої спеціалізованої моделі: 1) для якісного регулювання необхідний досить високий ступінь наближення моделі до реального об'єкта й точність виконання числових розрахунків (висока точність моделі); 2) використання моделі в САР БЕТСО в режимі реального часу вимагає виконання необхідних прорахунків досить великого обсягу інформації за відносно короткий час (висока швидкодія моделі).

Необхідність одночасного виконання цих вимог примушує використовувати не універсальну математичну модель [5,6], а спеціалізовану модель, яка б дозволяла при скороченні обсягу обчислень не тільки не втратити точність моделювання теплового режиму, але й використовувати в обчисленнях експериментальні поточні дані в режимі реального часу, і в результаті підвищити її адекватність у порівнянні з універсальною моделлю. Передумовою розробки спеціалізованої моделі слугує універсальна математична модель багат шарової активної нагрівальної структури БЕТСО з розподіленими параметрами [7]. Пропонуються такі напрями, за якими можна здійснити її «звуження» без втрати точності.

1. Удосконалення алгоритму обчислень шляхом скорочення часу обчислень і підвищення точності результатів, виходячи з конкретизації постановки задачі. У певній мірі це дозволяє скористатися більш ефективним обчислювальним алгоритмом. Зокрема, перехід від універсальної моделі до спеціалізованої дозволяє замінити процедуру розрахунку температурного поля у вигляді системи лінійних неоднорідних рівнянь досить високого порядку (порядок системи дорівнює подвоєному числу шарів БЕТСО) розрахунком температурного розподілу на поверхні підлоги за допомогою кінцевих формул у вигляді спеціально підібраних сукупностей поліномів й експонент. Приклад такого рішення представлено в [8].

2. Скорочення кількості незалежних змінних (при проектуванні це вихідні дані, при керуванні – вхідні параметри) шляхом фіксації їх у вигляді параметрів розрахункової моделі. Зокрема, у моделі для керування БЕТСО необхідно зафіксувати групу параметрів, що відносяться до геометрії системи, групи даних, що характеризують теплофізичні властивості шарів й теплоізолюючих елементів, та ін.

3. Використання теоретико-експериментального підходу, що передбачає підвищення точності моделювання теплового режиму БЕТСО за рахунок використання поточних значень експериментальних даних. Це може бути введення в розрахунок за моделлю експериментальних даних як параметрів, отриманих від датчиків у процесі експлуатації установки (як показано на рис. 2 – передача на блок обробки САР сукупності даних про реальні температури й теплові потоки від датчиків:  $t_n$  – температура поверхні підлоги в ЗТА,  $t_c$  – температура повітряного середовища над поверхнею підлоги,  $t_0$  – температура ґрунту на рівні дна БЕТСО,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні підлоги,  $\alpha_s$  – коефіцієнт тепловіддачі з бічної стінки БЕТСО у ґрунт). При цьому можливі уточнення в результаті проведення вимірів щодо деяких припущень у вихідній моделі (наприклад, в універсальній моделі приймається лінійний характер розподілу температури по висоті БЕТСО, а в результаті вимірів у конкретному приміщенні цей розподіл може бути уточнений).

Відзначимо, що введення в розрахункову модель уточнених даних, які стосуються коефіцієнтів теплообміну на граничних поверхнях БЕТСО, має велике практичне значення. Крім того, за результатами вимірів буде значною мірою підвищуватись точність обліку акумульованого тепла. Сформульовані підходи мають принципове значення для реалізації САР і їх необхідно враховувати при розробці варіантів спеціалізованих математичних моделей стосовно керування різних варіантів конструкцій нагрівної системи БЕТСО.

Крім розглянутих особливостей проектування САР електротеплоакумулювальною системою нагрівання БЕТСО тваринницьких ВС, необхідно підкреслити більш широкі функціонально-технологічні можливості запропонованої САР з убудованою математичною моделлю щодо реалізації інформаційних функцій. Перш за все мається на увазі можливість відображення в режимі реального часу на екрані монітора або інших пристроях інформації про найбільш важливі характеристики процесу, а саме: метеорологічні умови та стан енергопотенціалу НВДЕ; температурні розподіли на поверхні підлоги в ЗТА (реальні й прогнозовані щодо можливого розподілу за результатами моделювання); реальні й прогнозовані за результатами моделювання розподіли енергопотоків по нагрівальних елементах в ярусах БЕТСО; карти-поверхні очікуваної сумарної витрати енергії залежно від характеристик поточного стану тепловіддачі від поверхні підлоги й стінок траншеї; рівень запасу акумульованої енергії в блоці БЕТСО й інші параметри.

Як приклад на рис. 3 наводимо залежності сумарної потужності енергопотоків БЕТСО (погонна потужність обігрівної смуги, Вт/м) в режимах I та V від двох впливових параметрів – інтенсивності теплообміну на поверхні підлоги ( $7.5 \leq \alpha \leq 15$ , Вт/(м·К)) і через бічні стінки

( $0 \leq \alpha_s \leq 2.25$ , Вт/(м·К)), які забезпечують термостабілізацію поверхні підлоги на рівнях  $t_{n1}=18^\circ\text{C}$  (нижня поверхня) та  $t_{n2}=38^\circ\text{C}$  (верхня поверхня).

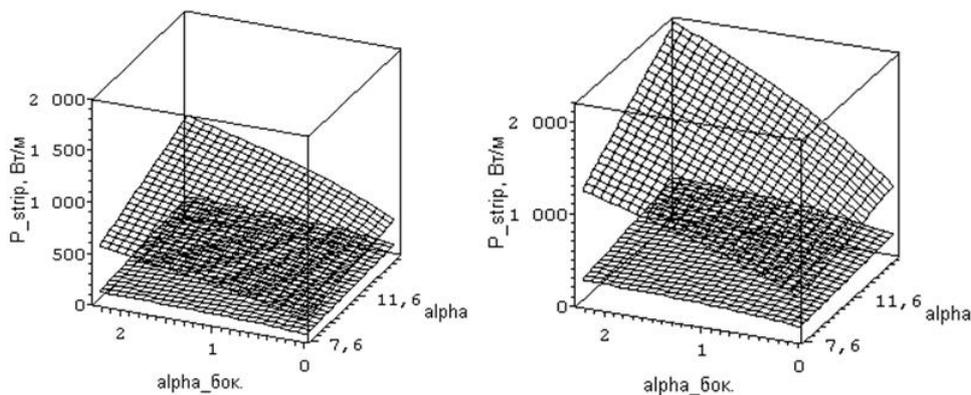


Рис. 3. Карти-поверхні прогнозованої погонної потужності БЕТСО для режимів I (ліворуч) та V (праворуч) при термостабілізації температури поверхні підлоги на рівнях нагріву  $t_{n1}=18^\circ\text{C}$  та  $t_{n2}=38^\circ\text{C}$  при варіаціях параметрів теплообміну  $\alpha$  та  $\alpha_s$

В таблиці наведені відповідні інтерполяційні поліноми 3-го ступеня як функції параметрів  $\alpha$  та  $\alpha_s$  (в таблиці  $\alpha_0$ ) щодо відповідних погонних потужностей для режимів I і V. Одержані аналітичні вирази дозволяють з допомогою мікропроцесорних засобів обчислення САР оперативно прогнозувати величину необхідної потужності, яку треба залучити для забезпечення заданого рівня температури поверхні підлоги при зміні умов теплообміну. Набір таких даних стосовно конкретної системи обігріву ВС певного функціонального призначення для певного набору температур підлоги являє собою базу даних, яка може бути покладена в основу спеціалізованої енергоощадної (з залученням як традиційних джерел енергії, так і НВДЕ) системи управління мікрокліматом для забезпечення заданих стандартів при певних внутрішніх і зовнішніх параметрах навколишнього середовища, що змінюються.

Таким чином, пропонуються заходи щодо “інтелектуалізації” ВС, що відрізняється від автоматизованого керування можливістю програмувати керуючу систему таким чином, щоб реакція на збурення умов теплообміну відбувалася по заздалегідь заданому сценарію.

а	б
$P_{18}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 18,99 + 5,198a_0 - 0,9509a_0^2 + 0,1149a_0^3 +$ $+ 6,381a + 7,313aa_0 - 3,121aa_0^2 + 0,5419aa_0^3 -$ $- 0,002a^2 - 0,0044a^2a_0 + 0,0002a^2a_0^2 + 0,0001a^2a_0^3$	$P_{38}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 46,62 - 0,8825a_0 + 13,67a_0^2 - 4,239a_0^3 +$ $+ 14,481a + 19,46aa_0 - 11,39aa_0^2 + 2,483aa_0^3 -$ $- 0,1212a^2 - 0,3613a^2a_0 + 0,4402a^2a_0^2 - 0,1221a^2a_0^3$
$P_{18}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 28,86 + 10,14a_0 + 0,4086a_0^2 - 0,1023a_0^3 +$ $+ 9,792a + 12,45aa_0 - 4,261aa_0^2 + 0,7168aa_0^3 -$ $- 0,0001a^2 + 0,0006a^2a_0 - 0,0038a^2a_0^2 + 0,0011a^2a_0^3$	$P_{38}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 79,01 + 25,86a_0 - 1,390a_0^2 + 0,3609a_0^3 +$ $+ 20,03a + 26,24aa_0 - 8,591aa_0^2 + 1,388aa_0^3 +$ $+ 0,0124a^2 + 0,0427a^2a_0 - 0,061a^2a_0^2 + 0,0165a^2a_0^3$
$P_{18}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 58,91 + 24,68a_0 + 3,831a_0^2 - 0,6705a_0^3 +$ $+ 19,94a + 27,40aa_0 - 7,231aa_0^2 + 1,231aa_0^3 -$ $- 0,0013a^2 - 0,0041a^2a_0 - 0,0047a^2a_0^2 + 0,0005a^2a_0^3$	$P_{38}(\alpha, \alpha_0) =$ $= 160,5 + 57,69a_0 + 9,567a_0^2 - 1,502a_0^3 +$ $+ 40,94a + 59,26aa_0 - 15,731aa_0^2 + 2,581aa_0^3 +$ $+ 0,0119a^2 - 0,0609a^2a_0 - 0,0147a^2a_0^2 + 0,014a^2a_0^3$

Зауважимо, що будь-яка підсистема такого об'єкта має функціонувати автономно, фіксуючи свої дії, або оперативно взаємодіяти з оператором для підтвердження дій ручного керування. На рис. 4 представлено можливий алгоритм моделювання перерозподілу сукупності вхідних енергопотоків у БЕТСО для забезпечення заданого постійного рівня нагріву підлоги за умовами, які показані на рис. 1. Розглянутий підхід до автоматизації засобів забезпечення теплових параметрів мікроклімату з використанням математичної моделі об'єкта припускає впровадження більш складних і ефективних алгоритмів керування нагріву на основі результатів досліджень [11].

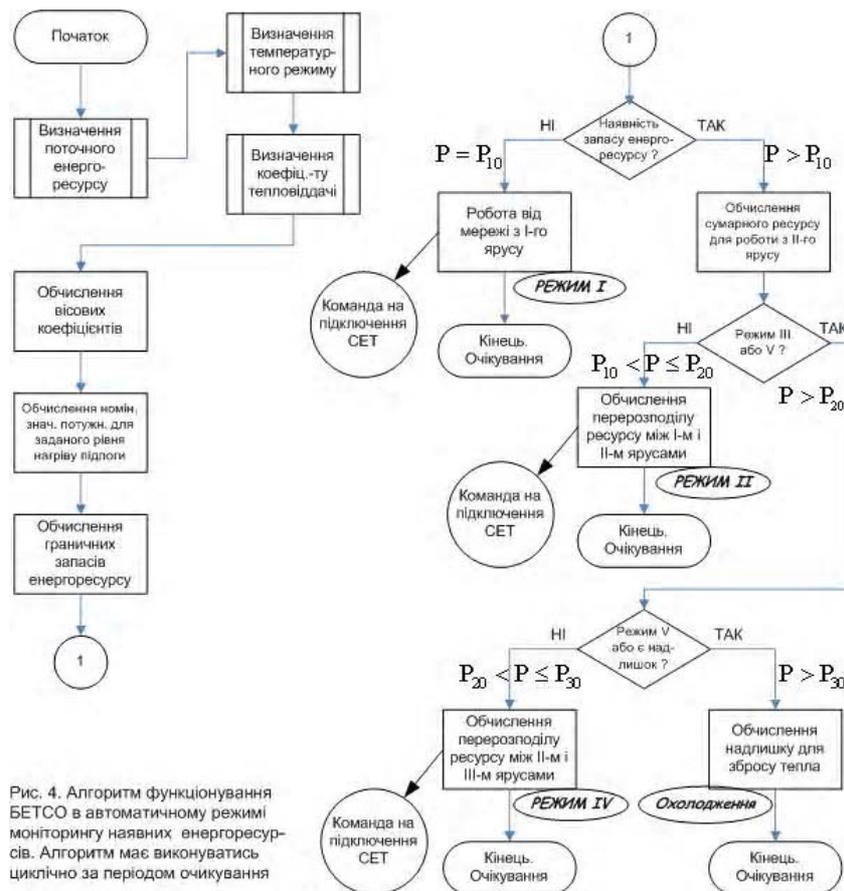


Рис. 4. Алгоритм функціонування БЕТСО в автоматичному режимі моніторингу наявних енергоресурсів. Алгоритм має виконуватись циклічно за періодом очікування

## Висновки

1. Вперше розроблено структуру САР багаторівневої електротеплоакумуляційної системи обігріву виробничої сільськогосподарської споруди і обґрунтовано вимоги до спеціалізованої математичної моделі БЕТСО, убудованої в контур зворотного зв'язку САР, що дозволяють реалізувати високоефективний теоретико-експериментальний підхід при керуванні розглянутою складною багатопараметричною системою обігріву приміщення.

2. Запропонована побудова САР дозволяє почати її використання при малому ступені автоматизації й спрощеному математичному забезпеченні з наступним ускладненням функцій шляхом більш повного обліку в математичній моделі теплових параметрів виробничого приміщення та більш ефективних алгоритмів керування.

3. Застосування БЕТСО в системах мікроклімату виробничих споруд різного функціонального призначення, в тому числі в АПК, дозволить більш ефективно використовувати енергетичні ресурси традиційних джерел енергії і НВДЕ; знижувати негативний вплив виробничих процесів на довкілля; формувати біоконверсні комплекси в галузі АПК.

**Список літератури:** 1. Табуницьков Ю.А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт // Энергия. 2004, № 10. С. 20-28; № 11. С. 26-29. 2. Табуницьков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В.

Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. 193 с. **3.** Мартыненко И.И., Гирнык Н.Л., Полищук В.М. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов. М.: Колос, 1984. 151 с. **4.** *Электротеплоаккумуляционное отопление греющим полом* / Под ред. Д.И. Розинского. К.: ИТТ НАНУ, НПП «ЭЛЕТЕР», 2001. 156 с. **5.** *Вісн. ХДТУСГ ім. П. Василенка «Пробл. енергозабезпеч. та енергозбереж. в АПК України»*. Харків, 2004. Вип. 27. Т. 1. С. 245-250. **6.** Романченко Н.А., Слесаренко А.П., Сорока А.С. Математическая модель стационарного режима многослойного обогреваемого пола. *Вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка «Вдосконалення технологій та обладнання виробництва продукції тваринництва»*. Харків, 2005. Вип. 42. С. 247-252. **7.** Романченко М.А., Слесаренко А.П., Сорока О.С., Румянцев О.О. Багаторівневі електротеплоаккумулявальні установки в системах мікроклімату виробничих споруд АПК. **8.** Романченко М.А., Мазоренко Д.І., Слесаренко А.П., Сорока О.С. Энергозберігаючі електротехнології забезпечення стандартів теплового режиму виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами // *Електрифік. та автоматиз. сільськ. госп.* 2006. №2. С. 82-92. **9.** *Вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпеч. та енергозбереж. в АПК України»*. Харків, 2007. Вип. 57. Т. 1. С. 187-194. **10.** Романченко М.А., Слесаренко А.П., Сорока О.С. Параметризація теплових джерел в комп'ютерній моделі функціонування багаторівневої електротеплоаккумулявальної системи опалення. **11.** Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио, 1980. 232 с. **11.** Советов Б.Я. Моделирование систем. М.: Высш. шк., 2005. 343 с. **12.** Слесаренко А.П. Моделирование и управление нестационарными температурными режимами при ограничениях на скорость нагрева // *Доповіди НАНУ*. 2009. №2. С. 83-88.

*Надійшла до редколегії 16.06.2009*

**Слесаренко Анатолій Павлович**, лауреат Держ. премії України, д-р фіз.-мат. наук, професор, пров. наук. співроб. Інст. проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Наукові інтереси: комплексне математичне моделювання, діагностика та ідентифікація теплових процесів; теплофізика; математична фізика та диференційні рівняння; оптимальне керування тепловими режимами в енергетиці, радіоелектроніці, в елементах енергетичного, електронного та космічного обладнання. Захоплення та хобі: пошук невирішених проблем. Адреса: Україна, 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10, тел.: 95-95-64 (роб.), 65-51-89 (дом.).

**Романченко Микола Анастасійович**, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнологій сільськогосподарського виробництва, завідувач кафедри Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Наукові інтереси: електротехнології та електроенергетика, проблеми ефективного використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії. Захоплення та хобі: бджільництво. Адреса: Україна, 61125, Харків, вул. Енгельса, 19, тел. 712-28-33 (роб.), 733-15-89 (дом.).

**Сорока Олександр Степанович**, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв ХНУРЕ. Наукові інтереси: радіофізика та електроніка, прикладна електродинаміка пристроїв НВЧ та КВЧ, математичне моделювання теплових та електромагнітних процесів в технологічних установках НВЧ. Захоплення та хобі: історія Росії. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, тел. 702-13-62 (роб.), 336-82-24 (дом.).

## РЕФЕРАТИ

---

УДК 004.732

**Дослідження процесів передачі даних в реальному режимі часу** / Г.В. Бабіч, В.І. Хаханов, Мурад Алі А. // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.4-9.

Розглянуто механізми процесів передачі даних в реальному масштабі часу, характеристики трафіка реального масштабу часу, а також основні вимоги, що висуваються до передачі даних в режимі real-time. Розглянуто архітектуру протоколу RTP/RTCP та виконано аналіз відповідності її реалізації вказаним вимогам. Визначено задачі, розв'язання яких є досить актуальним для досягнення мети забезпечення відповідності вимогам, які висуваються до передачі даних в реальному масштабі часу. Для розв'язання вказаних задач запропоновано використання апарату ройового інтелекту і системи AntNet.

Л. 3. Бібліогр.: 4 назви.

UDC 004.732

**Investigation of data transmission processes in real-time mode** / G.V. Babich, V.I. Hahanov, Murad Ali A. // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.4-9.

The mechanisms of data transmission processes in real-time mode, characteristics of real-time traffic and general requirements to real-time data transmission have been considered. The architecture of RTP/RTCP protocol has been represented as an example of realization of considered mechanisms. The analysis of compliance of indicated realization to considered requirements has been executed. The tasks, which should be solved for providing of compliance of requirements to real-time data transmission, have been defined. For those tasks solving the usage of swarm intelligence apparatus and AntNet system has been proposed.

Fig. 3. Ref.: 4 items.

---

УДК 519.713:681.326

**Метод аналізу тестопридатності цифрових пристроїв для псевдовипадкового тестування в системах убудованого самотестування** / Е.М. Кулак, М.О. Камінська, Ю.К. Константинова // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 9-15.

Розроблено метод аналізу тестопридатності цифрових пристроїв. Запропоновано стратегію модифікації схеми з низькими показниками спостережуваності й керованості. Метод дозволяє аналізувати тестопридатність комбінаційних пристроїв до 1000000 вентилів.

Табл. 2. Л. 2. Бібліогр.: 11 назв.

UDC 519.713:681.326

**Testability analysis approach for pseudo-random testing in BIST system** / E.N. Kulak, M.A. Kaminska, Y.K. Konstantinova // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.9-15.

Testability analysis for digital devices for pseudo-random test pattern generation is offered. Strategy of circuit with low testability measures modification is proposed. Method allows to analyze testability for combinational circuits which consist of 1000000 logic gates.

Tab. 2. Fig. 2. Ref.:11 items.

---

УДК 681.325

**Нетрадиционный взгляд на рабочее диагностирование вычислительных устройств** / О.В. Дрозд // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 15-24.

Розглянуто питання робочого діагностування обчислювальних пристроїв. Показано, що його розвиток проходив під дією моделі точних даних, що визначила мета, основна вимога до методів, оцінку їхньої ефективності тільки для частки випадку обробки точних даних. Розглянуто особливості наближених обчислень, які вказують на необхідність перегляду основних положень робочого діагностування. Аналіз справжньої мети робочого діагностування виявив низьку вірогідність традиційних методів при їхньому використанні в умовах росту значимості обробки наближених даних.

Табл. 3. Л. 8. Бібліогр.: 18 назв.

UDC 681.325

**Increase in reliability of on-line testing methods using natural time redundancy** / A.V. Drozd // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.15-24.

This paper addresses to questions of on-line testing for the computing circuits processing the approximate data. A problem of low reliability of on-line testing methods in checking the result is considered. This problem is connected to ignoring the natural time redundancy, which allows detecting the errors produced by the circuit fault during some interval of time. It reduces detection probability of errors, which are essential to reliability of result. The increase of this probability leads to detection of inessential errors and reduces reliability of on-line testing methods. The method of segments checking, which provides check of segments in the calculated result with the error detection probabilities determined by the natural time redundancy, is offered. This method significantly increases reliability in checking the result.

Tab. 3. Fig. 8. Ref.:18 items.

УДК 517.95 : 519.63

**Застосування методу R-функцій до розрахунку течій у канавці підшипника** / А.В. Артюх, Н.В. Гибкіна, М.В. Сидоров, Є.Є. Агапов // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.25-31.

Розглянуто застосування методу R-функцій до розв'язання задачі розрахунку стаціонарної течії у канавці підшипника. Обчислювальний експеримент був проведений для одиночного квадрата, отримані результати порівняні з розв'язками, отриманими іншими авторами.

Л. 2. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 517.95 : 519.63

**About one method mathematical modeling of some process with the help of R-function method** / A.V. Artjukh, N.V. Gibkina., M.V. Sidorov, E.E. Agapov // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 25-31.

Consider the time-independent incompressible free convection flow in simply connected 2D-domains. According to the R-function method and method of successive approximations numerical solution was build.

Fig. 2. Ref.: 10 items.

---

УДК 519.86

**Моделі та методи оптимізації напружено-деформованого стану торсатрону «УРАГАН-2М»** / С.О. Мартинов, В.П. Воробйова, М.С. Круголь, А.Ю. Юркін, М.А. Хажмурадов // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 32-37.

Розглянуто моделі і методи тривимірного геометричного моделювання гвинтової обмотки торoidalної магнітної системи «Ураган-2М». Обґрунтовано застосування методів кінематичного моделювання і кінцево-елементного аналізу для отримання геометричних характеристик й характеристик напружено-деформованого стану гвинтової обмотки «Ураган-2М».

Л. 6. Бібліогр.: 6 назв.

UDC 519.86

**Models and methods of optimization of URAGAN-2M torsatron mode of deformation** / S.A. Martynov, V.P. Vorobyova, M.S. Krugol, A. Yu. Yurkin, M.A. Khazhmuradov // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 32-37.

Models and methods of three dimensional modeling of screw-type winding of URAGAN-2M toroidal magnetic system are considered. Using of the kinematic modeling methods and finite-element method for determining of the geometric and mode of deformation parameters of URAGAN-2M screw-type winding are based.

Fig. 6. Ref.: 6 items.

---

УДК 621.555.6

**Оптимальне планування експерименту для дослідження пристрою контролю якості діелектричних матеріалів** / М.Д. Кошовий, О.М. Костенко, О.В. Заболотний // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 38-42.

Для дослідження пристрою контролю якості діелектричних матеріалів застосовуються методи оптимального за вартісними затратами планування експерименту. Показана ефективність цих методів, причому найкращі результати отримані при використанні ітераційного методу планування експерименту, а найгірші – при використанні методу випадкового пошуку.

Табл. 6. Бібліогр.: 3 назви.

UDC 621.555.6

**Optimum experiment planning at study the device for checking quality of dielectric materials** / N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, A.V. Zabolotny // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 38-42.

Methods of optimum experiments planning by price expenses were used for study the device for checking quality of dielectric materials. Efficiency of these methods were shown, moreover the best results were got, when method of the iterating experiments planning were use, but the worst ones were when we use the method of casual searching.

Tab. 6. Ref.: 3 items.

---

УДК 621.396.96

**Оптимізація системи зв'язку на основі раціонального використання її елементів** / К.С.Васюта, М.В. Булаєнко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.42-46.

Проаналізована математична модель системи зв'язку і методи побудови систем на основі раціонального розподілу елементів, засобів і каналів зв'язку в процесі забезпечення управління.

Табл. 1. Л. 1. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 621.396.96

**Title of the paper** / K.S. Vasiyta., M.V. Bulayenko // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.42-46.

The mathematical model of communication network and methods of construction of the systems on the basis of the rational distributing of elements, facilities and communication channels in the process of providing of management is analyzed

Tab. 1 Fig. 1. Ref.: 5 items.

---

УДК 631.432:626.86

**Автоматизована система керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні** / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.46-52.

Розглянуто розробку структури, алгоритм роботи та технічної реалізації автоматизованої системи керування (АСК) вологістю ґрунту при крапельному зволоженні сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з врахуванням дії стохастичних збурюючих факторів. В алгоритмі керування вологістю використано механізми нечіткої логіки, що змодельовані у редакторі Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab. Наведено алгоритм роботи усієї АСК. Розроблено програмне забезпечення для організації автоматизованого зчитування даних метеопрогнозу з Internet сайту. Запропоновано технічну реалізацію системи керування на базі мікроконтролера PIC16C71 фірми Microchip, GSM модуля та автоматизованого робочого місця (АРМ) диспетчера.

Табл. 1. Іл. 7. Бібліогр.: 2 назви.

UDC 631.432:626.86

**Automated control system of agricultural cultures' water well being with drip irrigation** / V. Pastushenko, A. Stetsenko // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.46-52.

The article is devoted to designing of the structure, algorithm of work and technical realization of the automated control system (ACS) of soil's moistness with drip irrigation of the agricultural cultures within the modular field subject to the stochastic disturbances' actions. In the work's algorithm for moistness's control fuzzy logic mechanisms was used and simulated in Fuzzy Logic Toolbox of Matlab system. The algorithm of the all ACS's work is represented. The software for organizing of automated reading of meteorological forecast from the Internet site is developed. The technical realization of the control system on the bases of Microchip's microcontroller PIC16C71, GSM module and automated work station (AWS) of dispatcher is proposed.

Tab. 1. Fig. 7. Ref.: 2 items.

---

УДК 681.326:519.613

**Технологія покриття дефектних блоків резервними компонентами** / В.І. Хаханов, С.В. Чумаченко, Є.І. Литвинова, О.В. Захарченко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.52-64.

Запропоновано технологію мінімального покриття дефектних блоків резервними компонентами при відновленні роботоздатності логічної частини цифрової системи на кристалі. Розглянуто загальні положення та правила покриття для матриці конфігуруємих логічних блоків з дефектними комірками. Розроблено критерії покриття дефектних комірок. Наведено приклади реалізації алгоритма.

Іл. 17. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 681.326:519.613

**Technology of a covering of defective blocks reserve components** / V.I. Hahanov, S.V. Chumachenko, E.I. Litvinova, O.V. Zaharchenko // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.52-64.

The technology of the minimum covering of defective blocks reserve components is offered at restoration of working capacity of a logic part of digital system on a crystal. General provisions and rules of a covering for a matrix of configured logic blocks with defective cells are considered. Criteria of a covering of defective cells are developed. Examples of realisation of algorithm are resulted.

Fig. 17. Ref.: 12 items.

---

УДК 004.932.2

**Проекційні методи в задачах нормалізації та розпізнавання зображень** / О.В. Гороховатський // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.64-69.

Запропоновано методи нормалізації та розпізнавання зображень із використанням проекційного аналізу. Досліджено вплив геометричних викривлень та їх комбінацій на перетворення Радона. Запропоновано метод визначення параметрів геометричних викривлень зображення та їх комбінацій для нормалізації на базі проєкцій, а також метод побудови та зіставлення систем інваріантних ознак зображень на основі перетворення Радона та моментних інваріантів. Наведено результати комп'ютерних експериментів, що підтверджують ефективність запропонованих методів.

Табл. 1. Лл. 2. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 004.932.2

**Projective methods in the tasks on image normalization and recognition** / O.V. Gorokhovatskiy // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 64-69.

The methods of image normalization and recognition with the use of projective analysis are offered. The influence of geometrical transforms and their combinations on Radon transform is shown and explored. The method of determination geometrical transform parameters of image and their combinations is offered for normalization, based upon projections, also method of construction and comparison for systems of image invariant features is presented, based upon Radon transform and moment invariants. Computer simulation experiments are performed, confirming the efficiency of the presented methods.

Tab. 1. Fig. 2. Ref.: 5 items.

---

УДК 681.003.66

**Діагностична модель IP-мережі** / С.О. Соколов, О.Л. Стокіпний, О.В. Голдаєв // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.70-76.

Надано теоретичний опис діагностичної моделі IP-мережі, в основі якої лежить представлення стану мережі у вигляді набору подій. Кожна подія є фактом прийняття діагностичним параметром значення з раніше заданої множини. Діагностичні параметри в кількісному вигляді надають інформацію про поточний стан джерел діагностичної інформації, серед яких автори виділяють три основних типи: програмні компоненти, апаратні компоненти та канали зв'язку. Запропонована модель дозволяє на заданому часовому інтервалі сформуванати базу даних діагностичної інформації (БДДІ) IP-мережі.

Лл. 2. Бібліогр.: 9 назв.

UDC 681.003.66

**Diagnostic model of IP-network** / S.A. Sokolov, A.L. Stokipny, A.V. Goldaev // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 70-76.

The article provides a theoretical description of the diagnostic model of IP-network, which is based on the representation of the network as a set of events. Each event is the adoption of the diagnostic parameter values from the previously given set. Diagnostic parameters in quantitative form provides information about the current state of the sources of diagnostic information, which the authors identify three main types: software components, hardware components and communication channels. The proposed model allows for a specified time interval to establish a database of diagnostic information (DBDI) IP-network.

Fig. 2. Ref.: 9 items.

---

УДК 519.7

**Еволюційний підхід до рішення оптимізаційних задач транспортного типу** / А.М. Гвоздинський, С.В. Мельник // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.76-81.

На основі аналізу оптимізаційних задач взагалі та класу транспортних задач зокрема зроблений огляд сучасного стану проблеми оптимізації перевезень, а також проаналізовані існуючі алгоритми знаходження оптимального плану перевезень. Також розроблений новий еволюційний метод на базі генетичних алгоритмів, що дозволяє швидше знаходити рішення, а отже може використовуватися на значно більших об'ємах даних, а також не потребує значних розрахункових потужностей.

Табл. 1. Бібліогр.: 4 назви.

UDC 519.7

**Evolutional approach to the optimization problems of transport type solving** / A.N. Gvozdinskiy, S.V. Melnik // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 76-81.

On the basis of the optimization problem analysis an observation of the modern optimization of transportation situation has been made. Present methods of optimization are observed and a new one is created. The new method is based on the evolutional approach and on genetic algorithms which allows to find an optimal solution much n faster and thus can be applied on higher data level. Also the created algorithm has lover hardware requirements so it's economically sound.

Tab. 1. Ref.: 4 items.

---

УДК 519.7

**Дослідження інтелектуальних систем прийняття рішень у виробничому плануванні** / А.М. Гвоздинський, Ю.М. Корнієнко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.81-84.

На основі змістовного аналізу предметної галузі досліджені інтелектуальні системи управління у виробничому плануванні підприємством. Зокрема досліджені такі інтелектуальні методи як метод мурашиних колоній, генетичний алгоритм та блочна оптимізація лінійного програмування. Показано переваги та недоліки кожного з цих методів.

Л. 1. Бібліогр.: 6 назв.

UDC 519.7

**Research of the intellectual systems of decision-making is in the production planning** / A.N. Gvozdinskiy, Yu.N. Kornienko // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.81-84.

On the basis of the substantial analysis of a subject domain intellectual control systems in industrial planning by the enterprise are investigated. In particular such intellectual methods as a method of ant colonies, genetic algorithm and block optimization of the linear programming are investigated. It is shown advantages and lacks each of these methods.

Fig. 1. Ref.: 6 items.

---

УДК 519.7

**Аналіз методів розподілу ресурсів у мережних системах** / А.М. Гвоздинський, В.Ю. Кудряшов // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.85-89.

На основі аналізу предметної області, були досліджені методи розподілу ресурсів у мережних системах. Зокрема такі як Вірменський метод та метод Данцига – Вулфа. Були показані переваги та недоліки кожного з досліджуваних методів.

Бібліогр.: 5 назв.

UDC 519.7

**Analysis of the resource allocation methods in network systems** / A.N. Gvozdinskiy, V.U. Kudriashov / Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.85-89.

On the base of the problem domain analysis the methods of resources allocation in network systems were researched. Particularly the Hungarian method and the Dantzig—Wolfe method. Advantages and disadvantages of these methods were analyzed and shown.

Ref.: 5 items.

---

УДК 681.3

**Методи інтелектуального пошуку інформації в GRID-мережі** / С.В. Мінухін, С.В. Знахур // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.89-94.

Описано механізм пошукової машини GRID-мережі для ефективного пошуку інформаційних ресурсів, який використовує апарат штучних нейронних мереж. Пошук інформації базується на розподіленні метайнформації щодо ресурсу (документа) по вузлах GRID-мережі на основі мережі Кохонена. Експлуатація мережі Кохонена дозволяє вирішити задачу асоціації запитів користувачів відповідним сховищам (вузлам обробки) метайнформації. Запит одночасно обробляється на асоційованій підмножині вузлів мережі, що покращує часову й якісну характеристику пошукової машини.

Л. 3. Бібліогр.: 7 назв.

UDC 681.3

// Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.

The article discussed methods of solving the problem of effective search and distribution of information resources through the use of artificial neural networks. Find information based on the distribution metainformation on the resource (document) by GRID-node network based on network Kohonena. Operation of the network can solve the problem Kohonena associations relevant repository metainformation. Request is processed at the associated subset of network nodes, which improves the time and quality of search engine.

Fig. 3. Ref.: 7 items.

---

УДК 519.816

**Оцінка поведінкових мотивів взаємодії між суб'єктами як першопричина конфліктів або співробітництва в організаційних системах** / В.О. Тимофєєв, І.Г. Денисова // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С.94-100.

Обґрунтована побудова моделі поведінкової взаємодії між суб'єктами організаційної системи, за допомогою якої можна оцінювати ступінь конфліктності в організаційній системі. Використано понятійний апарат теорії суперечностей і наведено приклад вибору альтернативи поведінки з урахуванням рефлексії і взаєморефлексії суб'єктів.

Табл. 2. Іл. 2. Бібліогр.: 2 назви.

**Estimation of behavioural motives of interaction between subjects as an original cause of conflicts or cooperation in organizational systems** / V.O. Timofeev, I.G. Denisova // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P.94-100.

The construction of model of povedencheskogo co-operation is grounded between the subjects of organizational co-operation, by which it is possible to estimate the degree of conflict in the organizational system. The concept vehicle of theory of contradictions is utilized and an example of choice of alternative of conduct is made taking into account a reflection and vzaimoreflleksii subjects.

Tab. 2. Fig. 2. Ref.: 2 items.

---

УДК 519.22

**Чисельний аналіз деяких задач визначення оптимальних параметрів страхової компанії в умовах її інвестиційної діяльності** / Н.В. Гибкіна, С.В. Дмитренко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 94-100.

В роботі розглянено задачу визначення розмірів нетто-премій страхової компанії в умовах її інвестиційної діяльності. Розглянено традиційні та інноваційні схеми розрахунку нетто-премій довгосрокового страхування життя. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів для кожної схеми. Визначені умови, за яких умови кожного із розглянутих контрактів є найвигіднішими. Результати є актуальними для страхових компаній, які зацікавлені у впровадженні інноваційних схем страхування з метою підвищення конкурентноспроможності на страховому ринку.

Табл. 2. Іл. 1. Бібліогр.: 4 назви.

UDC 519.22

**Numerical analysis some problems of optimal parameters definition for insurance company in conditions her investment activity** / N.V. Gibkina, S.V. Dmytrenko // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 94-100.

In given work we consider the problem of net premium definition for insurance company in conditions her investment activity. We consider traditional and innovation schemes of net premium calculation in long-term life insurance. Contrastive analysis of results for each scheme was done. As a result, we determine conditions in which insurance contract signing is profitable. Research is relevant for insurance companies that are interested in inculcation of innovation insurance schemes to increase competitiveness in insurance market.

Tab. 2. Fig. 1. Ref.: 4 items.

---

УДК 004.942:621.6:622.691

**Урахування динаміки роботи запірної арматури при моделюванні нестационарних режимів транспорту газу в магістральних газопроводах** / А.Д. Тевяшев, І.Г. Гусарова, А.В. Камінська // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 100-113.

У роботі розглядається математична модель і метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів транспорту природного газу, що враховує модель перебігу газу через запірну арматуру і дозволяє розраховувати параметри газових потоків в лінійних ділянках магістральних газопроводів з урахуванням динаміки роботи запірної арматури.

Табл. 1. Іл. 7. Бібліогр.: 2 назв.

UDC 004.942:621.6:622.691

**Taking into account of dynamics of constipation armature work during modeling of non-stationary modes of gas transport in the gas-main pipelines** / A.D. Tevjashev, I.G. Gusarova, A.V. Kaminska // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 100-113.

There are the mathematical model and the method of calculation of the non-stationary non-isothermal modes of transport of natural gas are considered in the work. They take into account the model of flow of gas through a constipation armature and allow to calculate gas streams parameters in the linear areas of main gas pipelines.

Tab. 1. Fig. 7. Ref: 2 items.

---

УДК 631.2: 631.171 : 65.011.56

**Оптимальное управление тепловыми режимами в технологически активных зонах в соответствии с заданными стандартами** / А.П. Слесаренко, Н.А. Романченко, А.С. Сорока // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 147. С. 113-120.

На основе эффективных математических моделей расчета и прогнозирования распределения энергопотоков в многоуровневой электротеплоаккумуляционной системе обогрева (БЭТСО) обосновывается методология разработки управляемых электротеплоаккумуляционных установок, которые обеспечивают стандарты теплового режима микроклимата производственных сельскохозяйственных со-

оружений. Предложена структура системы автоматического регулирования, в контур обратной связи которой входит блок моделирования БЭТСО. Сформулированы требования к математической модели БЭТСО.

Табл. 1. Илл. 4. Библиогр.: 11 назв.

UDC 631.2 : 631.171 : 65.011.56

**Optimum control of thermal modes in technologically active zones according to the given standards /** A.P. Slesarenko, N.A. Romanchenko, A.S. Soroka // Management Information System and Devises. 2009. N 147. P. 113-120.

On the basis of effective mathematical models of computation and forecasting of energy flow distribution in multilevel electroheating and accumulating system (MEHAS), the methodology of development of controlled electroheating and accumulating installations which provide the standards of a thermal mode of a microclimate in industrial agricultural structures is grounded. The structure of system of automatic control with the block of MEHAS modeling in a contour of feedback is offered. The requirements to a mathematical model of MEHAS are formulated.

Tab. 1. Fig. 4. Ref.: 11 items.

## ПРАВИЛА

### оформления рукописей для авторов научно-технического сборника

#### "АСУ и приборы автоматики"

Формат страницы — А4 (210x297мм), поля: сверху, справа, слева, снизу – 30 мм. Редактор: Pagemaker 6.0, 6,5 (можно, но нежелательно Word), гарнитура Times New Roman Sug, кегль – 11 пунктов, межстрочное расстояние — 110 %, табуляция — 5 мм.

Объем рукописи – до 10 с. (языки: русский, украинский, английский). Содержание должно отражать актуальность исследования, постановку задачи, цель, сущность, научные и практические результаты, сравнение с лучшими аналогами, выводы.

Структура рукописи: заголовок, аннотация, текст, литература, реферат на украинском и английском языках, сведения об авторах.

### ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ

---

УДК 519.713

И.О. ФАМИЛИЯ

#### НАЗВАНИЕ РУКОПИСИ

---

Аннотация (абзац 5-10 строк, кегль 10) помещается в начале статьи и содержит информацию о результатах описанных исследований.

Основной текст можно разделять на 2 и более подразделов с заголовками, выделенными полужирным шрифтом, пронумерованными арабскими цифрами, как показано в следующей строке.

#### 1. Название раздела

Рисунки и таблицы (черно-белые, контрастные) помещаются в текст после первой ссылки в виде *переносимых объектов* и отдельно нумеруются, при наличии более одного рисунка (таблицы), арабскими цифрами. Рисунок содержит подрисовочную центрированную подпись (текстовая строка, расположенная вне рисунка, кегль 10) под иллюстрацией, как показано на рис. 1.

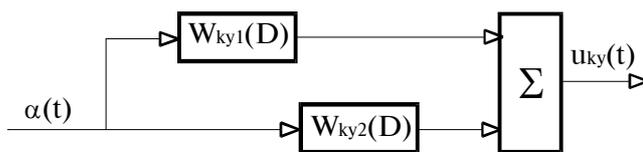


Рисунок 1. Двухзвенная система

Табличный заголовок располагается справа над таблицей, что иллюстрируется табл.1. Редакторы: CorelDraw, Table Editor и др.

Формулы нумеруются при наличии ссылок на них в рукописи. Рекомендуемый кегль формульного набора: обычный (переменная) – 11 пунктов, крупный индекс – 8, мелкий индекс (над- и подиндекс) – 8, крупный символ (основной) – 12, мелкий (индексный) математический символ – 10:

Таблица 1

Шагя	1	2	3	4	5	6
$\Phi_1(1,3)$	1	2	2	4	6	1
$\Phi_1(1,4)$	1	2	2	4	4	8

ра: обычный (переменная) – 11 пунктов, крупный индекс – 8, мелкий индекс (над- и подиндекс) – 8, крупный символ (основной) – 12, мелкий (индексный) математический символ – 10:

$$F_{i+j} = \sum_{i=1}^{b^k} F_j^i - \prod_{j=1}^{1+h^2} P_{R_{j+i}} + F^{j-1} + X^{\Sigma n^k} \quad (1)$$

Формат переменных (желательно не курсивом – без наклона) в тексте и формулах должен быть идентичным. В тексте над- и подиндексы составляют 70 % от кегля, которые рекомендуется опускать (поднимать) на 17 (33) % относительно основной строки.

Список литературы (включает опубликованные источники, на которые имеются ссылки в тексте, заключенные в квадратные скобки) печатается без отступа, кегль 9 пунктов.

Образец окончания текста рукописи (литература, сведения об авторах, реферат) представлен ниже.

**Список литературы:** 1. *Фамилия И.О.* Название книги. Город: Издательство, 1900. 000 с. 2. *Название сборника / Под ред. И.О. Фамилия.* Город: Издательство, 1900. 000 с. 3. *Фамилия И.О.* Название статьи / / Название журнала. Название серии. 1997. Т. 00, № 00. С. 00-00.

*Поступила в редколлегию 00.00.00*

**Фамилия, имя, отчество**, ученая степень, звание, должность и место работы. Научные интересы. Адрес, контактный телефон.

Рефераты на украинском и английском языках. Текст аннотации не должен дублировать реферат.

---

УДК 000.000.00

**Назва статті українською мовою / Ініціали. Прізвище // АСУ та прилади автоматики.** 2000. Вип. 00. С. 000-000.

Текст реферату.

Табл. 00. Іл. 00. Бібліогр.: 00 назв.

UDC 000.000.00

**Title of paper / Initials. Surname // Management Information System and Devices.** All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2000. N 00. P. 000-000.

Text.

Tab. 00. Fig. 00. Ref.: 00 items.

#### Представление материалов

Рукопись, реферат, сведения об авторах — в одном файле, *поименованном фамилией первого автора*, на дискете 3,5 дюйма. Твердая копия материалов — для граждан Украины — в одном экземпляре: рукопись, подписанная авторами, рефераты, акт экспертизы, внешняя рецензия, подписанная доктором наук, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах.

Адрес редакции: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, ХНУРЭ, комната 321, тел. 70-21-326.

E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Тематика статей, публикуемых в сборнике:

- Компьютерная инженерия
- Математическое моделирование
- Оптимизация и процессы управления
- Автоматизация проектирования и диагностика
- Информационные интеллектуальные системы
- Проектирование интегральных схем и микросистем
- Компьютерные технологии в образовании

Відповідальний випусковий В.І. Хаханов  
Редактор О.П. Гужва  
Комп'ютерна верстка Г.В. Хаханова, С.В. Чумаченко

Підп. до друку 27.06.2009. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Умов. друк. арк. .  
Обл.-вид. арк. . Тираж 300 прим.  
Зам. № . Ціна договірна.

---

Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ).  
Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.

---

Оригінал-макет підготовлено і збірник віддруковано  
в навчально-науковому видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.