Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

10
2018

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. – д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. – д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)

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

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Поршнев С.В., Пономарева О.А., Бородин А.М., Мирвода С.Г. Автоматизированная система выпуска металлургической продукции: от разнородных баз данных к созданию единого хранилища данных 435

Сабанчин В.Р., Тугов В.В. Управление процессом обжига керамического кирпича с применением многомерного чёткого логического регулятора с интервальной неопределённостью 441

Шамаев А.Е., Сердобинцев С.П., Шамаев Е.П. Расчётная схема энергоэффективной системы охлаждения газа 444

Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А. Численное исследование влияния непостоянства электродных потенциалов на результаты электрохимической обработки . . 448

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Пролетарский А.В., Сюзев В.В., Гуренко В.В., Бычков Б.И. Алгоритмы преобразования спектров в базисах Хартли и Уолша 453

Иванова Г.С., Головков А.А., Олейник Д.С. Формирование набора данных для обучения системы увеличения резкости фотоизображений 461

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Мешков Н.А., Лукьянова Н.В., Шашурин В.Д., Суркова А.Д. Применение подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием социально-экономических систем 474

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2018

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 10/2018

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Ivanov A.P. – dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Putilov V.N. – LLC «Publishing "Innovative machine building"» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Publishing "Innovative mashine building"»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China
Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov
Yanovich E.A. – dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic. Ins., Poland

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:
107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING "INNOVATIVE MACHINE BUILDING"»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Porshnev S.V., Ponomareva O.A., Borodin A.M., Mirvoda S.G. Automated production system of metallurgical products: from heterogeneous databases to the creation of a united data warehouse 435

Sabanchin V.R., Tugov V.V. Control of the ceramic bricks firing process through the use of a multidimensional clear logic regulator with interval uncertainty 441

Shamaev A.E., Serdobintsev S.P., Shamaev E.P. The calculation scheme of an energy efficiency gas cooling system 444

Zhitnikov V.P., Sherykhalina N.M., Sokolova A.A. Numerical research of the influence of electrode potential variation on the electrochemical processing results 448

MODERN TECHNOLOGIES

Proletarskiy A.V., Syuzev V.V., Gurenko V.V., Bychkov B.I. Algorithms for transforming spectra in Hartley and Walsh bases 453

Ivanova G.S., Golovkov A.A., Oleynik D.S. Forming a data set for learning to system of the picture sharpness 461

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES

Meshkov N.A., Lukyanova N.V., Shashurin V.D., Surkova A.D. The application of the self-organization approach to the forecasting problem decision in the intellectual system for managing the innovative development of socio-economic systems 474

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2018

УДК 004.415.23

С.В. Поршнев, д-р техн. наук, проф., **О.А. Пономарева**
(Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург),
А.М. Бородин, канд. техн. наук
(ООО «Яндекс», г. Екатеринбург),
С.Г. Мирвода
(ООО «Октоника», г. Екатеринбург)

o.a.ponomareva@urfu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫПУСКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ: ОТ РАЗНОРОДНЫХ БАЗ ДАННЫХ К СОЗДАНИЮ ЕДИНОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ

Обоснована актуальность создания единого хранилища данных, обеспечивающего сбор параметров единицы продукции металлургического производства на каждом этапе технологической цепочки. Предложена структура информационной системы, обеспечивающей функционирование и использование единого хранилища данных.

Ключевые слова: хранилище данных; единица продукции металлургического производства; информационные системы.

The creation actuality of a united data warehouse ensuring the collection of the metallurgical production articles parameters at each stage of the technological chain is substantiated. The structure of the information system providing the functioning and utilization of a united data warehouse is proposed.

Keywords: data warehouse; a unit of production of metallurgical production; information systems.

Большинство современных российских металлургических предприятий представляют собой крупные промышленные холдинги: Евразхолдинг, Магнитогорский металлургический комбинат (ММК), Северсталь и др., в которых реализован полный цикл металлургического производства (МП) «руда — металл — прокат». С точки зрения системного анализа технологические процессы МП относятся к классу непрерывно-дискретных процессов [1], поскольку они включают в себя как непрерывные процессы в течение заданного временного интервала, которые будучи начатыми, должны быть полностью законченными (например, производство чугуна, выплавка стали и т. д.), так и циклические процессы (например, циклическая загрузка сырья на соответствующих этапах технологической цепочки). Упрощённая схема технологического процесса МП представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что технологический процесс МП включает в себя следующие этапы (переделы): подготовка сырья, доменное производство, конверторное производство, производство металлопродукции (машины непрерывного литья заготовок — МНЛЗ, прокатные станы и т. д.). При этом на каждом переделе используются ресурсы, которые можно разделить на следующие группы: технические (агрегаты, машины и инструменты), материальные (сырьё, энергия и другие предметы труда), трудовые (люди) и информационные (данные и документы). В процессе МП происходит преобразование сырья, получаемого с предыдущего

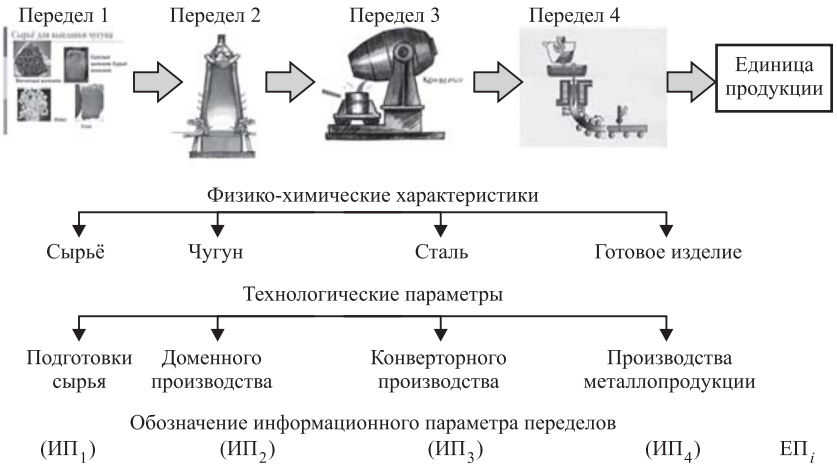


Рис. 1. Упрощённая схема технологического процесса МП

передела, и, соответственно, информации, относящейся к данному переделу. Укрупнённая схема материальных и информационных потоков МП показана на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что максимально точная информационная модель единицы продукции (ЕП) МП представляет собой совокупность всех информационных параметров (ИП) материальных и информационных потоков на каждом переделе МП:

$$\text{ЕП}_i = \cup\{\text{ИП}_1^i, \text{ИП}_2^i, \text{ИП}_3^i, \text{ИП}_4^i, t_i\},$$

где ЕП_i — i-я единица продукции; ИП_1^i, ..., ИП_4^i — совокупность ИП переделов 1...4 соответственно; t_i — время появления единицы продукции ЕП_i,

$$\text{ИП}_1^i = \{\text{Д, И, С, ФХР}, t_\text{с}\},$$

где Д — совокупность информационных параметров технологического процесса дробильного отделения (взвешивание поступившей руды, тип мельницы, количество мельниц, плотность слива, дробящая среда, масса дробящей среды); И — совокупность информационных параметров технологического процесса измельчительного отделения (длина стержня, диаметр шара, производительность); С — совокупность информационных параметров технологического процесса сушильного отделения (расход природного газа, давление газа в горелке, давление воздуха, давление в топочном пространстве, температура отходящих газов, температура в топочном пространстве, температура сухого шпата на выходе из барабана и др.); ФХР — совокупность физико-химических характеристик руды (влажность, плотность, коэффициент крепости, процентное содержание оксидов железа, кальция, магния, алюминия, кремния, калия, натрия и др.; минералогический состав сырья и др.); $t_\text{с}$ — время производства данной партии сырья.

Совокупность ИП передела 2:

$$\text{ИП}_2^i = \{\text{Ш, КД, ДП, ПП, О}, t_\text{д}\},$$

где Ш — совокупность ИП шихты, шихтоподачи и загрузки (содержание в шихте железа, кремнезёма, извести, магнезии, фракции, %; влажность кокса, содержание серы в коксе; скорость опускания шихты, м/мин; масса железорудных компонентов в подаче, сухого кокса в подаче, добавок, т; загрузка печи по заданной программе; профиль и уровень засыпи шихты и т. д.); КД — совокупность ИП комбинированного дутья (расход, м^3/мин: холодного дутья, горячего дутья; давление горячего и холодного дутья, Па; температура горячего дутья, °С; влажность горячего дутья, г/м^3; содержание кислорода в дутье, %; расход природного газа на печь, м^3/ч; расход кислорода, м^3/ч; соотношение между природным газом и кислородом дутья, распределение дутья по фурмам, м^3/мин; распределение природного газа по фурмам, м^3/мин, и др.); ДП — совокупность ИП доменного процесса; ПП — совокупность ИП чугуна и шлака (процентное содержание в чугуне и шлаке: кремния, марганца, серы; температура чугуна, масса чугуна; температура шлака, масса шлака); О — совокупность ИП состояния системы охлаждения и огнеупорной кладки печи (температура: подкупольной зоны

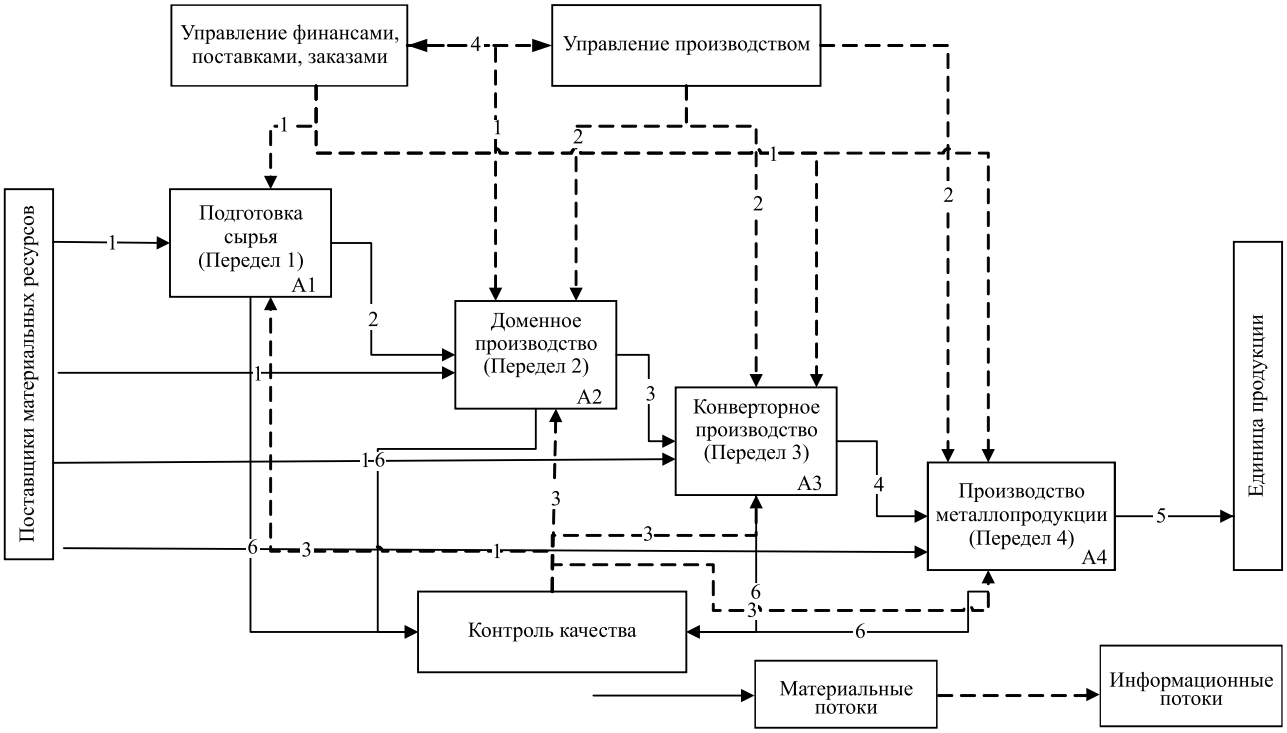


Рис 2. Схема материальных и информационных потоков МП

воздухонагревателей, на границе динас—шамот (динас—каолин), продуктов сгорания в камере горения; наличие факела в камере горения; расход и давление: чистого доменного газа на воздухонагреватели, коксового (природного) газа на воздухонагреватели, воздуха для сжигания газа; теплота сгорания смешанного газа и др.); $t_д$ — время производства данной партии чугуна.

Совокупность информационных параметров передела 3:

$$ИП_3^i = \{Вз,\ Из,\ У,\ t_к\},$$

где Вз — совокупность ИП параметров процесса взвешивания (металлического лома на платформенных весах, жидкого чугуна при переливе, сыпучих материалов в промежуточных бункерах и ферросплавов); Из — совокупность измеряемых ИП (температура чугуна в ковшах после перелива, расход и состав кислорода на продувке, положение и прогар продувочных фурм; расход, давление и химический состав конвертерных газов; параметры развития процесса шлакообразования; положение конвертеров; температура и содержание углерода в металле и др.); У — совокупность ИП процессов управления (дозирование материалов в конвертер и ферросплавов в сталеразливочный ковш, расход кислорода на продувку, положение продувочной фурмы, перемещение измерительного зонда, регулирование давления конвертерного газа); $t_к$ — время производства данной партии стали.

Совокупность ИП передела 4:

$$ИП_4^i = \{ТХ,\ ФХСл,\ t_{МНЛЗ}\},$$

где ТХ — совокупность ИП МНЛЗ (температура металла в сталеразливочном ковше, температура металла в промежуточном ковше, температура воды в кристаллизаторе, температура поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения, уровень металла в промежуточном ковше, уровень металла в кристаллизаторе, расход охлаждающей воды в кристаллизаторе, усилие вытягивания слитка, скорость разливки, мерная длина слитка и др.); ФХСл — совокупность ИП физико-химических характеристик сляба (химический состав, металлургическое качество сляба; структура литого металла; размеры сляба, загрязнённость, ликвационная неоднородность в заготовке и др.); $t_{МНЛЗ}$ — время производства сляба.

Схема распределения информационных параметров ЕП между информационными системами (ИС), используемыми на МП (таблица), представлена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что ЕП является сложной совокупностью ИП, распределённых между различными информационными системами, используемых на МП. В то же время при решении многочисленных управленческих и технологических задач (например, анализ причин возникновения брака) одновременно необходима информация (ИП ЕП), разме-

Информационные системы, используемые на ведущих российских МП

Уровень АСУП	ЕвразХолдинг	ММК	Северсталь
ERP	Система SAP R/3 (модули финансового учёта, учёта затрат, управления материалами, управления персоналом, управления сбытом, планирования производства, бюджета, управления качеством, документооборота и функционального развития действующих подсистем планирования процессов) [2]	АСУ «Персонал» (модули начисления заработной платы и учёта рабочего времени, системы управления финансами, закупками и материальными запасами) [3]	Система электронного документооборота «Босс-Референте», планируется переход на систему SAP R/3 и SAP Transportation Management (SAP TM) [4]
MES-системы	Модули управления ремонтами, управления основными средствами [2]	Модули управления производством, «домна — конвертерный цех — десятый листопрокатный цех» [5]; система Яндекс — «Снайпер» [4]	Система наблюдения за индикаторами грузопотоков и производственных процессов в режиме реального времени (по индикаторам основных производственных параметров, проводится оценка технологических процессов, которые используются для управления производством). Отдельные модули автоматизированной системы слежения и контроля процессов АС СКП «Технология» [2]
АСУ ТП	АСУ ТП цехов основного производства	АСУ ТП цехов основного производства	АСУ ТП цехов основного производства

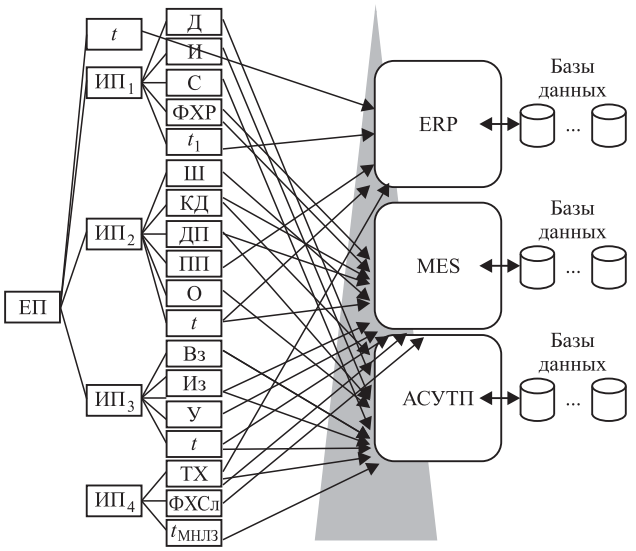


Рис. 3. Распределение ИП ЕП по информационным системам МП

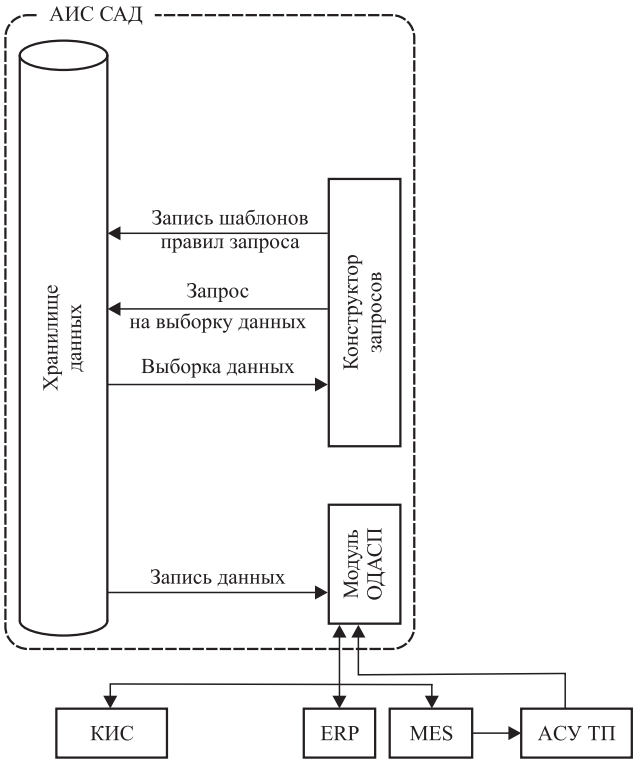


Рис. 4. Схема модулей АИС САД

щённая в базе данных (БД) различных ИС, используемых на МП. При этом, принимая во внимание разнородность структур информации, хранящейся в различных БД, и разную скорость её поступления, понятно, что извлечение ретроспективной информации, необходимой для решения управленческих и технологических задач, оказывается весьма трудоёмким процессом. Однако универсальных программных средств, обеспечивающих автоматизированный поиск и извлечение информации, относящейся к данной ЕП, одновременно из нескольких БД различных ИС, использующихся на МП, сегодня не существует. В результате эффективность от внедрения и эксплуатации на МП ИС оказывается существенно ниже ожидаемой.

Для решения данной проблемы, по мнению авторов, целесообразно разработать автономную ИС, обеспечивающую сбор в реальном режиме времени ИП, хранение их в едином хранилище данных (ХД) и доступ к информации о ЕП на каждом этапе МП. Структурная схема автоматизированной информационной системы сбора и анализа данных производства (АИС САД) представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что АИС САД состоит из хранилища данных (ХД), конструктора запросов (КЗ), модуля обмена данными с автоматизированными системами предприятия всех уровней (ОДАСП).

Модули, входящие в состав АИС САД, выполняют следующие функции:

обмен данными между ХД АИС САД и автоматизированными системами МП всех уровней (ОДАСП);

надёжное хранение и быстрый доступ к данным, поддержка их хронологии, целостности и непротиворечивости, что обеспечивает возможность создания единого информационного пространства данных МП, построение единого интерфейса пользователя, разработка общих алгоритмов обработки данных и осуществление высокопроизводительной аналитической обработки данных (ХД);

предоставление пользователю удобного интерфейса для создания требуемых выборок информационных параметров и формирование нерегламентированных отчётов (КЗ).

АИС САД обеспечивает сбор, хранение и предоставление информации пользователям, которая может быть использована, в том числе, для создания имитационных моделей технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов (СМП). При принятии управленческих решений для анализа и оптимизации бизнес-процессов МП целесообразно использовать автоматизированную информационную систему моделирования технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов предприятия АИС МОД (рис. 5).

На рис. 5 видно, что АИС МОД состоит из модуля создания моделей технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов (СМП), программного модуля оптимизации технологических, логистических и

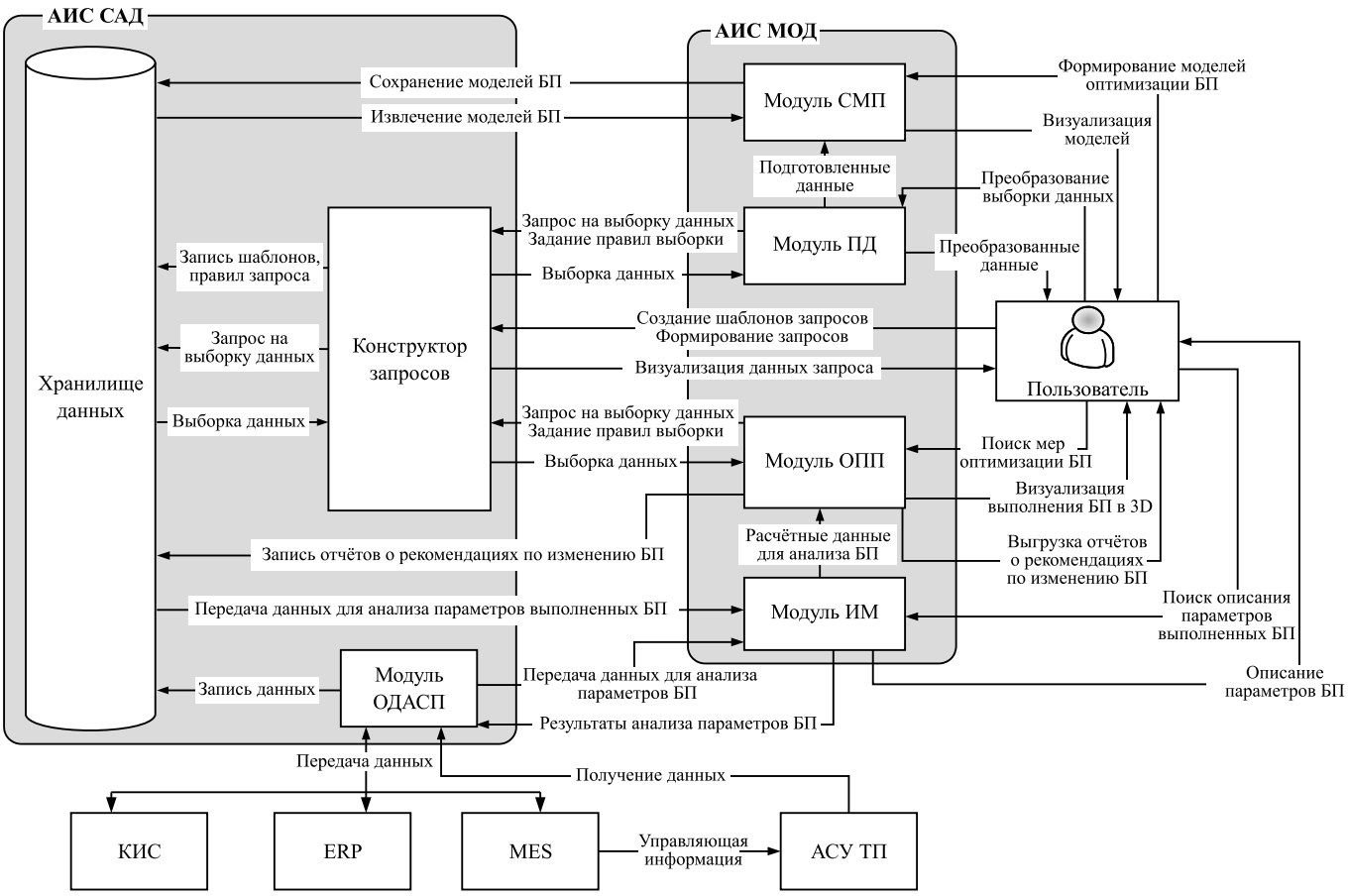


Рис. 5. Структура автоматизированной системы выпуска металлургической продукции

организационных (бизнес) процессов предприятия (ОПП), модуля подготовки данных (ПД), модуля имитационного моделирования (ИМ).

Модуль ПД реализует следующие функции:

получение выборки данных, сформированной по запросу из модуля КЗ;

задание набора правил на обработку выборки данных с помощью графического инструмента создания правил обработки данных;

совместное функционирование множества модулей ПД при интеграции в единый программный интерфейс модулей ПД (модулей-источников данных, модулей обработки данных, модулей анализа и модулей верификации);

персистентное (долговременное) хранение пользовательских настроек процесса подготовки данных для размещения в ХД;

анализ, верификация и преобразование выборки данных в соответствии с заданным набором правил;

восстановление пропущенных данных на основе анализа накопленной статистики;

анализ данных параметров технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов (ТЛОБП) на основе методов машинного обучения (анализ распределённых лагов, фильтры временных рядов, полосовой анализ, методы автоматической классификации данных, нейронные сети) для решения задач прогнозирования и интерпретации подготавливаемых данных.

Модуль СМП реализует следующие функции:

создание, модифицирование и запись в ХД моделей ТЛОБП с помощью визуального конструктора моделей мультиагентных имитационных процессов, деревьев анализа параметров процесса, вновь разработанных функциональных элементов для представления графических элементов создания моделей на основе web-интерфейса;

точность соответствия результатов контрольного прогона разработанного процесса заданным значениям (не менее 80 %);

независимое от пользователя исполнение модели процесса в виде отдельного вычислительного процесса;

запуск и одновременное исполнение нескольких экземпляров моделей процессов, создаваемых с помощью модуля СМП;

согласование входных и выходных параметров модели процессов, создаваемой с помощью модуля СМП, с параметрами реальных технологических процессов для выполнения модели в модуле ИМ;

создание протоколов совещаний, проводимых в рамках реализации типового, постоянно действующего бизнес-процесса предприятия по изменению производственных процессов;

создание средств обработки обращений пользователей для обработки инцидентов, связанных с эксплуатацией автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП).

Модуль ИМ реализует следующие функции:

получение данных из модуля ОДАСП;

получение данных из модуля КЗ;

получение данных из модуля ПД;

получение описания выполненных на производстве ТЛОБП из модуля ХД;

анализ параметров, выполненных ТЛОБП (продолжительность анализа — не более 30 мин);

выдача результатов анализа в модуль ОДАСП;

отображение результатов анализа процессов в зависимости от ролей пользователей;

функционирование в режиме разделения процессов выполнения модели и отображения результатов для обеспечения нескольких представлений каждой из выполняющихся моделей;

одновременный запуск нескольких модулей ИМ, в каждом из которых выполнение моделей производится независимо друг от друга без средств отображения функционирования модуля ИМ, без ожидания и временных остановок выполняющихся потоков вычислений (в асинхронном неблокирующем режиме выполнения);

загрузка имитационной модели в модуль ИМ, созданной в СМП;

управление выполняющимися моделями в модуле ИМ с помощью команд на старт, останов и отслеживание состояния.

Модуль ОПП реализует следующие функции:

получение расчётных данных из модуля ИМ;

получение выборки данных из модуля КЗ;

получение результатов выполнения настроек подготовки данных, созданных в модуле ПД;

получение значений параметров, выполненных ТЛОБП при взаимодействии с модулем ОДАСП;

оптимизация ТЛОБП на основе методов имитационного моделирования (мультиагентного, экспертного, ситуационного моделирования), метода анализа и устранения узких мест ТЛОБП:

выдача рекомендаций по изменению технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов предприятия;

создание отчётов о выполненных процессах предприятия и их запись в ХД (отчёты о выполненных процессах предприятия должны содержать информацию о времени начала и окончания выполнения процессов предприятия);

создание отчётов с рекомендациями по недопущению выявленных инцидентов и вывод отчётов в форматах .doc, .xlsx, .csv, .xml;

визуализация выполнения процессов предприятия в формате 3D-анимации;

визуальное отображение входных и выходных переменных.

Результат интеграции АИС МОД и АИС САД представляет собой АС ВМП, обеспечивающую слежение, контроль, моделирование, анализ и выдачу рекомендаций по оптимизации как отдельных этапов, так и полного цикла выпуска металлургической продукции на основе создания единого хранилища данных МП и обеспечения доступа к ним, интеграции методов анализа данных и математических моделей технологических, логистических и бизнес-процессов предприятия. Отметим, что предложенное решение не привязано к МП, но может быть также использовано на крупных промышленных предприятиях других отраслей промышленности с многоэтапными технологическими циклами.

В следующих публикациях планируется описать средства реализации и структуру, детализировать функции и алгоритмы по разработке АИС САД.

Библиографические ссылки

1. **Стефани Е.П**. Основы построения АСУ ТП. Режим доступа: http://www.ngpedia.ru/id335138p1.html (дата обращения: 10.02.2018).

2. **SAP** в российской металлургии. Режим доступа: http://it.metalinfo.ru/2003/sap.htm (дата обращения: 10.02.2018).

3. **Проекты** в металлургии компании ООО «УралСофт». Режим доступа: http://www.uralsoft.com/p_mt.html (дата обращения: 10.02.2018).

4. **Развитие** ИТ-технологий на металлургических предприятиях России, 2017 г. Режим доступа: http://metalexpert-group.com/ru (дата обращения: 10.02.2018).

5. **Пятилетка** Магнитки. Режим доступа: http://it.metalinfo.ru/2003/borlas.php (дата обращения: 10.02.2018).

Ссылка для цитирования

Поршнев С.В., Пономарева О.А., Бородин А.М., Мирвода С.Г. Автоматизированная система выпуска металлургической продукции: от разнородных баз данных к созданию единого хранилища данных // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 435—440.

УДК 681.5:666.3.046.4

В.Р. Сабанчин, В.В. Тугов, канд. техн. наук, доц.
(Оренбургский государственный университет, аэрокосмический институт)

sau@mail.osu.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНОГО ЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬЮ

Рассмотрен процесс обжига керамического кирпича в туннельной печи с применением многомерного чёткого логического регулятора. Разработана схема алгоритма регулирования температуры на стадии обжига при постоянном давлении газов. Построена система продукционных правил для семиконтурного чёткого регулятора и создана его структурная схема с интервальной неопределённостью температуры в зоне обжига туннельной печи.

Ключевые слова: туннельная печь; многомерный чёткий регулятор; модель; алгоритм; продукционные правила.

The process of the ceramic bricks firing in a tunnel furnace through the use of a multidimensional clear logic regulator is considered. The algorithm scheme for the temperature regulation on the firing stage at a constant gas pressure is developed. A system of production rules for a seven-loop accurate regulator is constructed and its structural scheme with an interval temperature uncertainty in the tunnel furnace firing zone is created.

Keywords: tunnel furnace; multidimensional clear regulator; model; algorithm; production rules.

Современное состояние автоматизации технологических процессов производства керамического кирпича характеризуется тем, что фактически вопросы автоматического управления решены частично и используются неэффективно [1]. Тепловую обработку керамического кирпича проводят по заранее заданному технологическому режиму. Режим процесса обжига керамического кирпича в туннельной печи разделён на три периода: подготовка, обжиг и охлаждение.

Наиболее энерго- и трудоёмким процессом в производстве кирпича является обжиг, так как здесь формируются свойства кирпича, определяющие качество получаемого продукта. На процесс обжига приходится наибольшее количество брака (не менее 3 % от общего количества выпускаемых изделий). Например, для предприятия при объёме выпуска кирпича 50...51 млн шт. в год потери составляют 1,5...1,75 млн шт. в год.

Туннельная печь обжига керамического кирпича является многомерным и нелинейным объектом со сложными процессами, протекающими в ней. В существующих системах управления используются пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы (ПИД-регуляторы) [2], обладающие большой погрешностью регулирования, и иногда нечёткие регуляторы.

Использование классических ПИД- и типовых нечётких регуляторов неэффективно по следующим причинам [3]:

туннельная печь является сложным объектом управления по регулированию температуры в зоне обжига с семью взаимосвязанными регулируемыми параметрами, однако при использовании типовых нечётких и ПИД-регуляторов эта взаимосвязь не учитывается, тем самым снижается качество регулирования;

недостаточное быстродействие и большая погрешность (например, в зоне обжига погрешность температуры составляет ±33 °С).

Поэтому для проведения исследования применяются чёткие регуляторы с интервальной неопределённостью (ЧРсИН), которые лишены указанных недостатков [3]. Для решения задачи по компенсации взаимного влияния контуров регулирования используются специальные системы продукционных правил. Разработана схема (рис. 1) алгоритма регулирования температуры в период обжига при постоянном давлении газов, применение которого позволяет стабилизировать температуру до ±3 °С [4].

Процесс компенсации взаимного влияния контуров регулирования определяется совокупностью чётких термов с прямоугольной формой функции принадлежности, построенных по краеугольному принципу [5]. На рис. 2 представлена интерпретация регулируемого

параметра T_1, состоящая из 20 чётких термов T_{10-}, T_{9-}, ..., T_{1-}, T_{1+}, T_{2+}, ..., T_{9+}, T_{10+}, у которых задний фронт описывается мягкими, а передний — жёсткими неравенствами (например, 717 °C < T_{1+} ⩽ 720 °C и т. д.).

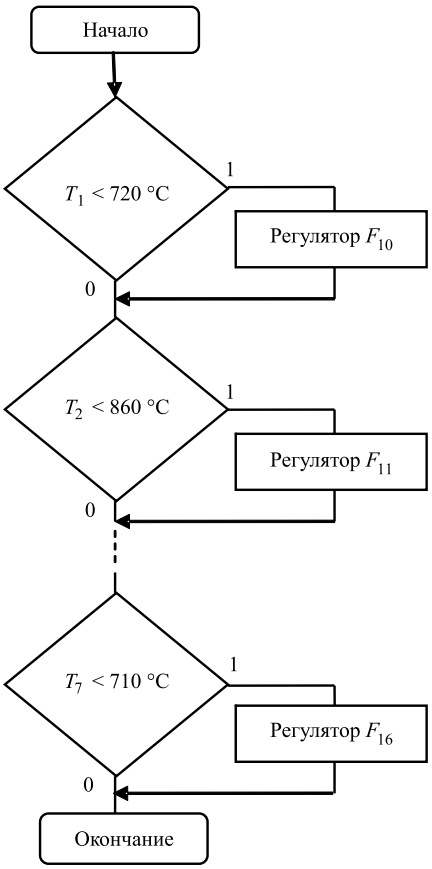


Рис. 1. Алгоритм регулирования температуры на стадии обжига при постоянном давлении газов

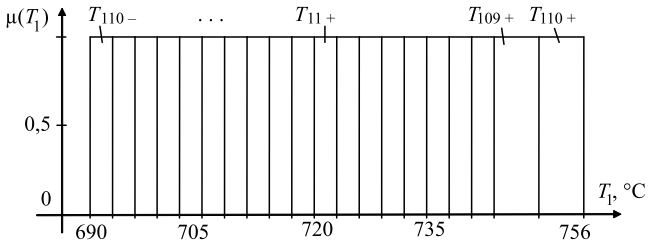


Рис. 2. Интерпретация регулируемого параметра T_1 из 20 чётких термов

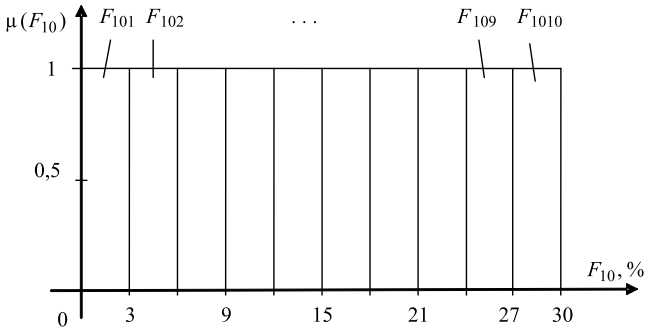


Рис. 3. Интерпретация регулирующего параметра F_{10} совокупностью чётких термов

Ширина термов T_{110-}, ..., T_{11+} равна 3 °C, а у термов T_{109+}, T_{110+} 6 °C. Интерпретация остальных регулируемых параметров T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 и T_7 аналогична.

На рис. 3 представлена интерпретация регулирующего параметра F_{10} совокупностью из десяти чётких термов $F_{101}...F_{1010}$, ширина которых составляет 3 % от полного открытия вентиля. Аналитическое выражение терм-множества имеет следующий вид:

$$T_1(F_{10}) = \sum_{i=1}^{10} F_{10i}[3(i-1) \leqslant F_{10} < 3i], \qquad (1)$$

где i — номер чёткого терма.

Интерпретация остальных регулирующих параметров аналогично описывается совокупностью чётких термов.

Замена регулирующих ($F_{10}...F_{16}$) и регулируемых ($T_1...T_7$) параметров в зоне обжига туннельной печи совокупностью чётких термов позволяет построить систему продукционных правил для семиконтурного чёткого регулятора. Рассмотрим структуру для контура T_1 с регулируемым параметром:

$$\begin{cases} \text{Если } T_1 = T_{11+} \vee T_{12+} \ldots \vee T_{109+} \vee T_{110+}, \\ \text{то } F_{10} = 0; \\ \text{Если } T_1 = T_{11-}, \text{то } F_{10} = F_{101} \vee T_{1k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_1 = T_{109-}, \text{то } F_{10} = F_{109} \vee T_{1k9}; \\ \text{Если } T_1 = T_{110-}, \text{то } F_{10} = F_{1010} \vee T_{1k10}. \end{cases} \qquad (2)$$

Из системы (2) следует, что значение параметра T_1 поддерживается на уровне 720 °C с погрешностью ±3 °C (см. рис. 2), а для компенсации взаимного влияния других контуров регулирования на параметр T_1 введены чёткие термы $T_{1k1}...T_{1k7}$.

Аналогичную структуру имеют системы продукционных правил, которые показаны в формулах (3)...(8) и относятся к регулируемым параметрам $T_2...T_7$:

$$\begin{cases} \text{Если } T_2 = T_{21+} \vee T_{22+} \ldots \vee T_{209+} \vee T_{210+}, \\ \text{то } F_{11} = 0; \\ \text{Если } T_2 = T_{21-}, \text{то } F_{11} = F_{111} \vee T_{2k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_2 = T_{29-}, \text{то } F_{11} = F_{119} \vee T_{2k9}; \\ \text{Если } T_2 = T_{210-}, \text{то } F_{11} = F_{1110} \vee T_{2k10}; \end{cases} \qquad (3)$$

$$\begin{cases} \text{Если } T_3 = T_{31+} \vee T_{32+} \ldots \vee T_{309+} \vee T_{310+}, \\ \text{то } F_{12} = 0; \\ \text{Если } T_3 = T_{31-}, \text{то } F_{12} = F_{121} \vee T_{3k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_3 = T_{39-}, \text{то } F_{12} = F_{129} \vee T_{3k9}; \\ \text{Если } T_3 = T_{310-}, \text{то } F_{12} = F_{1210} \vee T_{3k10}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{Если } T_4 = T_{41+} \vee T_{42+} \ldots \vee T_{409+} \vee T_{410+}, \\ \text{то } F_{13} = 0; \\ \text{Если } T_4 = T_{41-}, \text{то } F_{13} = F_{131} \vee T_{4k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_4 = T_{49-}, \text{то } F_{13} = F_{139} \vee T_{4k9}; \\ \text{Если } T_4 = T_{410-}, \text{то } F_{13} = F_{1310} \vee T_{4k10}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{Если } T_5 = T_{51+} \vee T_{52+} \ldots \vee T_{509+} \vee T_{510+}, \\ \text{то } F_{14} = 0; \\ \text{Если } T_5 = T_{51-}, \text{то } F_{14} = F_{141} \vee T_{5k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_5 = T_{59-}, \text{то } F_{14} = F_{149} \vee T_{5k9}; \\ \text{Если } T_5 = T_{510-}, \text{то } F_{14} = F_{1410} \vee T_{5k10}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \text{Если } T_6 = T_{61+} \vee T_{62+} \ldots \vee T_{609+} \vee T_{610+}, \\ \text{то } F_{15} = 0; \\ \text{Если } T_6 = T_{61-}, \text{то } F_{15} = F_{151} \vee T_{6k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_6 = T_{69-}, \text{то } F_{15} = F_{159} \vee T_{6k9}; \\ \text{Если } T_6 = T_{610-}, \text{то } F_{15} = F_{1510} \vee T_{6k10}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{Если } T_7 = T_{71+} \vee T_{72+} \ldots \vee T_{709+} \vee T_{710+}, \\ \text{то } F_{16} = 0; \\ \text{Если } T_7 = T_{71-}, \text{то } F_{16} = F_{161} \vee T_{7k1}; \\ \ldots \\ \text{Если } T_7 = T_{79-}, \text{то } F_{16} = F_{169} \vee T_{7k9}; \\ \text{Если } T_7 = T_{710-}, \text{то } F_{16} = F_{1610} \vee T_{7k10}. \end{cases} \quad (8)$$

На основе систем (2)...(8) продукционных правил чёткого регулятора разработана его структурная схема (рис. 4), состоящая из четырёх основных блоков [6]: Ф — фаззификатора; СДП ТП — сканирования дискретных входных ($X_1 ... X_4$) и выходных ($Y_1 ... Y_k$) переменных управления туннельной печи, где k — их количество соответственно; ОСПП — отработки ситуационных подпрограмм; ТП — туннельной печи (зона обжига), где управление температурой в зоне обжига происходит с учётом семи регулируемых параметров.

Фаззификатор имеет входы задающих воздействий ($З_1$ — 720 °С, $З_7$ — 710 °С) и обратных связей ($T_1 ... T_7$). Его выход соединён с блоком

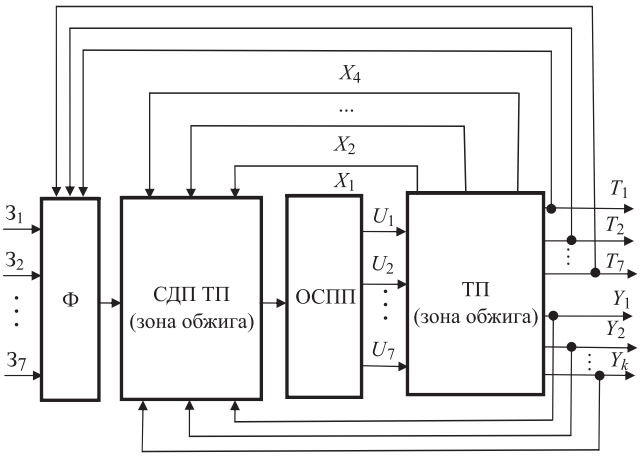


Рис. 4. Структурная схема семимерного чёткого регулятора с интервальной неопределённостью температуры в зоне обжига туннельной печи

СДП туннельной печи, на входы которого подаются дискретные входные ($X_1 ... X_4$) и выходные переменные ($Y_1 ... Y_k$) объекта управления. Выход блока СДП туннельной печи соединён со входом блока ОСПП, выходные сигналы ($U_1 ... U_7$) которого в аналоговом (чётком) формате подаются на исполнительный орган многосвязного объекта управления.

Из структурной схемы видно, что ЧРсИН повышает быстродействие, так как в каждом цикле сканирования отрабатывается не вся система продукционных правил регулятора, а только одно правило, антецедент которого в данный момент равен логической единице.

Таким образом, проведённый анализ существующих систем управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи показал, что они работают с достаточной погрешностью, и это ведёт к появлению брака. В результате разработана схема алгоритма регулирования температуры при постоянном давлении газов и система продукционных правил, которая позволяет решить задачу минимизации погрешности регулирования температуры в зоне обжига. Предложена структурная схема семимерного чёткого регулятора с интервальной неопределённостью температуры в зоне обжига туннельной печи, которая обеспечивает высокое быстродействие (в 5,71 раза быстрее по сравнению с типовым регулятором) и низкую погрешность регулирования температуры (±3 °С), что ведёт к уменьшению брака керамического кирпича на производстве с 3 до 1,5 %.

Библиографические ссылки

1. **Некрасов А.С., Синяк Ю.В.** Перспективы развития топливно-энергетического комплекса России

на период до 2030 года // Проблемы прогнозирования. 2007. № 4. С. 21—52.

2. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2004. С. 750.

3. **Гузаиров М.Б., Муравьёва Е.А.** Управление технологическими процессами, реализованное на чётких логических регуляторах. М.: Машиностроение, 2012. С. 305.

4. **Сабанчин В.Р., Сазонова Т.В., Суликова В.А., Каяшев А.И.** Исследование устойчивости многомерного чёткого регулятора температуры с интервальной неопределённостью в системах управления установками термообработки стройматериалов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 316—323.

5. **Сабанчин В.Р., Тугов В.В.** Разработка системы управления туннельной печи обжига керамического кирпича на основе чётких регуляторов // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 1. С. 87—90.

6. **Сабанчин В.Р., Тугов В.В.** Система управления туннельной печью обжига керамического кирпича на основе чётких регуляторов // Сб. материалов I междунар. науч.-техн. конф. «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве». Уфа: Нефтегазовое дело, 2016. С. 398—399.

Ссылка для цитирования

Сабанчин В.Р., Тугов В.В. Управление процессом обжига керамического кирпича с применением многомерного чёткого логического регулятора с интервальной неопределённостью // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 441—444.

УДК 621.643

А.Е. Шамаев, С.П. Сердобинцев, д-р техн. наук, проф., **Е.П. Шамаев,** доц.
(Калининградский государственный технический университет)

shamaev1992@gmail.com

РАСЧЁТНАЯ СХЕМА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

Построена и исследована расчётная схема аппарата для охлаждения газа, базирующаяся на дифференциальных уравнениях теплового баланса первого порядка, направленная на снижение гидравлических сопротивлений и уменьшение перепада температур. Определены энергозатраты, необходимые для получения требуемых значений выходных параметров охлаждаемого газа. Показана экономия, получаемая при использовании аппарата за счёт уменьшения числа вентиляторов в каждом модуле установки.

Ключевые слова: экономия; энергоэффективность; транспортировка природного газа; охлаждение; теплообмен; гидравлическое сопротивление.

The design scheme of the apparatus for gas cooling based on the differential equations of the heat balance of the first order and directed at reducing hydraulic resistances and reducing the temperature drop, is constructed and investigated. The power inputs necessary to obtain the required values of the cooled gas output parameters are determined. Savings when using the device due to the reduction in the number of fans in each unit of the installation is shown.

Keywords: saving; energy efficiency; transportation of natural gas; cooling; heat exchange; hydraulic resistance.

В настоящее время для охлаждения природного газа после сжатия на компрессорных станциях используются устройства с аппаратами воздушного охлаждения (АВО).

Входящие в состав АВО газовые трубы с оребрением (для увеличения поверхности) образуют пучок: 6 горизонтальных рядов по 80...90 труб в каждом.

АВО, содержащий до шести вентиляторов, потребляет до 100 кВт электроэнергии, что приводит к ощутимым затратам. Это обусловило необходимость разработки принципиально новой энергоэффективной системы охлаждения газа (ЭСОГ), применение которой взамен существующих АВО газа на компрессорных станциях позволило бы существенно (в несколько раз) снизить затраты электроэнергии.

Большое гидравлическое сопротивление в АВО и, следовательно, значительная мощность вентиляторов обусловлены прохождением воздуха через многочисленные узкие зазоры оребрения пучка газовых труб (рис. 1). В конструкции ЭСОГ охлаждающий воздух

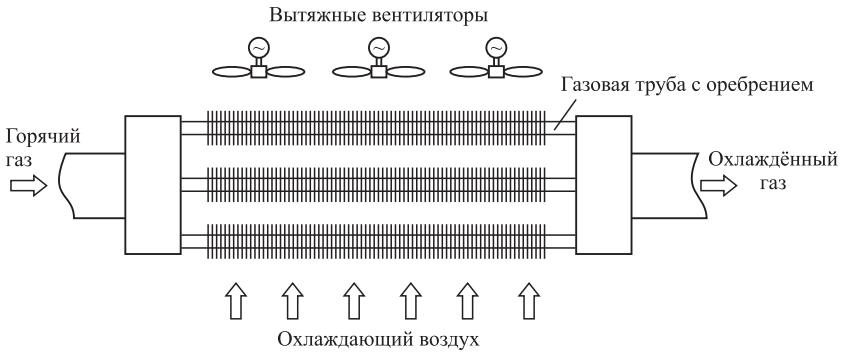


Рис. 1. Упрощённая схема АВО

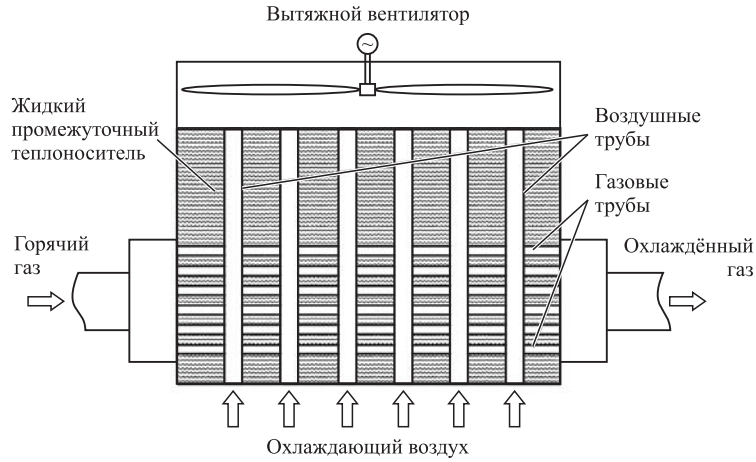


Рис. 2. Упрощённая схема модуля ЭСОГ

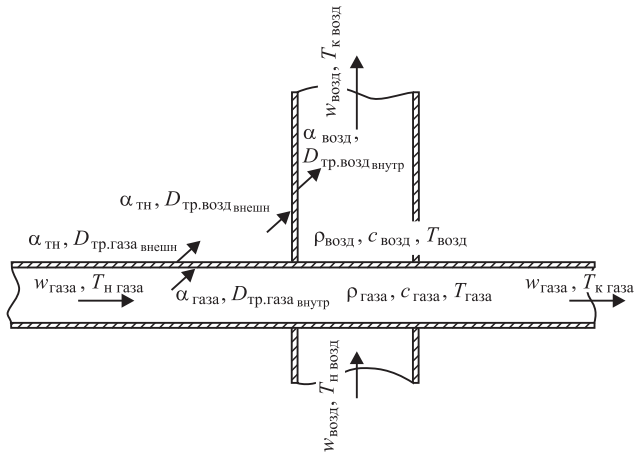


Рис. 3. Модель тепловых потоков ЭСОГ:
$\alpha_{газа}$ — коэффициент теплоотдачи газа, Вт/(м^2·К); $\alpha_{тн}$ — коэффициент теплоотдачи жидкого теплоносителя, Вт/(м^2·К); $\alpha_{возд}$ — коэффициент теплоотдачи воздуха, Вт/(м^2·К); $c_{газа}$ — удельная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К); $c_{возд}$ — удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); $\rho_{газа}$ — плотность газа, кг/м^3; $\rho_{возд}$ — плотность воздуха, кг/м^3; $w_{газа}$ — скорость потока газа в трубах, м/с; $w_{возд}$ — скорость потока воздуха в трубах, м/с; $T_{н\ газа}$, $T_{газа}$, $T_{к\ газа}$ — начальная, текущая и конечная температуры газа соответственно, К; $T_{н\ возд}$, $T_{возд}$, $T_{к\ возд}$ — начальная, текущая и конечная температуры воздуха соответственно, К; $D_{тр.газа_{внутр}}$, $D_{тр.газа_{внешн}}$ — внутренний и внешний диаметры газовой трубы соответственно, м; $D_{тр.возд_{внутр}}$, $D_{тр.возд_{внешн}}$ — внутренний и внешний диаметры воздушной трубы соответственно, м

проходит по многочисленным вертикальным гладкостенным трубам, сопротивление в которых на порядок меньше (рис. 2). Передача тепла от газа к воздуху в данном случае осуществляется через промежуточный жидкий теплоноситель. Пучок газовых труб расположен горизонтально, а воздушные трубы — вертикально. Газовый и воздушный теплообменники располагаются в корпусе, заполненном промежуточным жидким теплоносителем. Горячий газ проходит через пучок газовых труб, отдавая тепло промежуточному теплоносителю, который затем отдаёт тепло воздушным трубам, охлаждаемым воздухом. Поток воздуха через теплообменник обеспечивается вентилятором, установленным в верхней части кожуха.

Для научного обоснования создания ЭСОГ была построена и исследована расчётная схема ЭСОГ, содержащая элементарную расчётную область (рис. 3) и математическую модель, кратко отражённую формулами (1)...(13).

С учётом того что теплоёмкость, теплопроводность и давление природного газа в трубах выше, чем у воздуха, площадь общего сечения воздушных труб должна превышать площадь суммарного сечения газовых труб:

$$n\frac{\pi D^2_{тр.возд_{внутр}}}{4} > m\frac{\pi D^2_{тр.газа_{внутр}}}{4}, \qquad (1)$$

где n — число труб с воздухом; m — число труб с газом.

Чтобы не вносить изменения в гидравлическое сопротивление газотранспортной системы при внедрении ЭСОГ, число и диаметр газовых труб должны быть сохранены такими же, как в АВО. Число воздушных труб в одном модуле составляет несколько тысяч.

Представленная конструкция модуля ЭСОГ позволяет свести расчёт системы с распределёнными параметрами к более простому расчёту элементарной ячейки с сосредоточенными параметрами, ограниченной малыми отрезками воздушной dx и газовой dy труб. В такой ячейке изменение температур, скоростей и плотностей минимальны и могут быть описаны системой дифференциальных

уравнений теплового баланса. Температура охлаждаемого газа находится последующим итерационным интегрированием. Тепловые потоки в элементарной расчётной области можно представить следующим образом.

Запишем уравнение теплового баланса для системы газ—труба, описывающее элементарное приращение температуры $dT_{\text{газа}}$ на элементарном горизонтальном участке dx трубы с газом [1]:

$$\alpha_{\text{газа}}(T_{\text{тр}} - T_{\text{газа}})\pi D_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}} dx = \\ = c_{\text{газа}}\rho_{\text{газа}} w_{\text{газа}} \frac{\pi D^2_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}}}{4} dT_{\text{газа}}. \quad (2)$$

Из-за высокого коэффициента теплоотдачи жидкого теплоносителя принимаем температуру труб $T_{\text{тр}}$ равной температуре теплоносителя $T_{\text{тн}}$ [2]:

$$\alpha_{\text{газа}}(T_{\text{тн}} - T_{\text{н газа}})\pi D_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}} dx = \\ = c_{\text{газа}}\rho_{\text{газа}} w_{\text{газа}} \frac{\pi D^2_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}}}{4} dT_{\text{газа}}. \quad (3)$$

Запишем аналогичное уравнение для системы труба—воздух:

$$\alpha_{\text{возд}}(T_{\text{тр}} - T_{\text{н возд}})\pi D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}} dy = \\ = c_{\text{возд}}\rho_{\text{возд}} w_{\text{возд}} \frac{\pi D^2_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}}}{4} dT_{\text{возд}}, \quad (4)$$

где dy — элементарный вертикальный участок трубы с воздухом.

Как и для системы газ—труба, будем считать температуру труб $T_{\text{тр}}$ равной температуре теплоносителя:

$$\alpha_{\text{возд}}(T_{\text{тн}} - T_{\text{н возд}})\pi D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}} dy = \\ = c_{\text{возд}}\rho_{\text{возд}} w_{\text{возд}} \frac{\pi D^2_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}}}{4} dT_{\text{возд}}. \quad (5)$$

Уравнения (3) и (5) представляют собой дифференциальные уравнения первого порядка, решение которых имеет следующий вид:

$$T_{\text{газа}} = T_{\text{тн}} - (T_{\text{тн}} - T_{\text{н газа}}) \times \\ \times e^{\frac{-4\alpha_{\text{газа}} x}{D_{\text{тр.газа}_{\text{внутр}}} c_{\text{газа}} w_{\text{газа}} \rho_{\text{газа}}}}; \quad (6)$$

$$T_{\text{возд}} = T_{\text{тн}} - (T_{\text{тн}} - T_{\text{н возд}}) \times \\ \times e^{\frac{-4\alpha_{\text{возд}} y}{D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}} c_{\text{возд}} w_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}}}}. \quad (7)$$

Эти уравнения описывают изменения температур газа и воздуха в функции их скорости, начальных температур, температуры жидкого теплоносителя и координаты в элементарной расчётной области теплообменника. Температура охлаждённого газа на выходе модуля ЭСОГ вычисляется итерационным путём; начальная температура газа на входе очередной элементарной области равна конечной температуре газа на выходе предыдущей.

Для уточнённого расчёта теплового потока в установке ЭСОГ необходимо рассчитать температуру стенки трубы с воздухом. Для этого воспользуемся уравнением теплового баланса, описывающим передачу тепла от стенки трубы с газом к стенке воздушной трубы через жидкий теплоноситель [3],

$$\frac{P}{4n} = (T_{\text{тн}} - T_{\text{тр.возд}}) \frac{\pi D_{\text{тр.возд}_{\text{внешн}}} l_{\text{тр.возд}}}{4} k, \quad (8)$$

где P — мощность теплового потока, полученного по результатам расчётов без учёта температуры стенки трубы с воздухом, Дж; $l_{\text{тр.возд}}$ — длина воздушной трубы, м; k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К).

Коэффициент теплопередачи можно вычислить, используя значения коэффициентов теплоотдачи труб жидкому теплоносителю [3]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{тр.газа-тн}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{тн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{тн-тр.возд}}}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{тр.газа-тн}}$ — коэффициент теплоотдачи трубы с газом жидкому теплоносителю (принимается равным $\alpha_{\text{газа}}$), Вт/м^2; $\alpha_{\text{тн-тр.возд}}$ — коэффициент теплоотдачи жидкого теплоносителя трубе с воздухом (принимается равным $\alpha_{\text{возд}}$), Вт/м^2; δ — среднее расстояние между воздушной и газовой трубами, м; $\lambda_{\text{тн}}$ — коэффициент теплопроводности жидкого теплоносителя, Вт/(м·К).

Вычислив температуру стенки трубы с воздухом с помощью уравнения (8), подставим её в уравнение (7) для уточнённого итерационного расчёта модели тепловых потоков.

Воздух с температурой окружающей среды заходит в модуль установки снизу и движется вверх по вертикальным воздушным трубам. После прохождения вертикальных труб воздух движется по направляющему кожуху, цилиндрическая форма которого обеспечивает равное значение скорости воздуха во всех трубах, к вытяжному вентилятору, создающе-

му перепад давлений, необходимый для поддержания требуемой скорости [4].

Рассчитаем мощность вентилятора, которая требуется для создания скорости потока воздуха в трубах, равной 10 м/с [5]:

$$P_{\text{вент}} = \frac{\Delta P G_{\text{возд}}}{\eta}. \qquad (10)$$

В формуле (10) ΔP — перепад давлений воздуха на входе и выходе из ЭСОГ, Па. Его можно найти из уравнения скорости воздуха в каналах

$$w_{\text{возд}} = \sqrt{2\frac{\Delta P}{\chi \dfrac{H\rho_{\text{ср}}}{D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}}}}}, \qquad (11)$$

где H — высота воздушных труб, H = 2 м; $\chi = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}$ — формула Блаузиуса для коэффициента сопротивления; Re — число Рейнольдса для воздуха; $\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho^{0^\circ\text{C}}_{\text{возд}} + \rho^{20^\circ\text{C}}_{\text{возд}}}{2}$ — средняя плотность воздуха по каналу.

Таким образом,

$$\Delta P = w^2_{\text{возд}} \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}_{\text{возд}}} \frac{H 0,5\rho_{\text{ср}}}{D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}}} \cdot \frac{1}{2}; \qquad (12)$$

$G_{\text{возд}}$ — объёмный расход воздуха (при наличии 2858 воздушных труб в модуле ЭСОГ), м^3/с,

$$G_{\text{возд}} = \frac{2858\pi D_{\text{тр.возд}_{\text{внутр}}}}{4} w_{\text{возд}}; \qquad (13)$$

η — полный КПД ступени вентилятора. Берём КПД для максимального числа оборотов вентилятора, η = 0,65 [5].

В результате расчёта получим ΔP = 47,936 Па; $G_{\text{возд}}$ = 45,455 м^3/с; $P_{\text{вент}}$ = 3,352 Вт.

Числовые данные, используемые в приведённом примере, были получены авторами в результате ранее проведённых работ по математическому и имитационному динамическому моделированию подобных систем охлаждения.

Расчётная схема (порядок расчёта) позволяет получать выходную температуру охлаждённого газа при изменении любых конструкционных параметров установки (размеров газовых и воздушных труб, высоты установки), входных параметров горячего газа и температуры охлаждающего воздуха. Схема предусматривает расчёт параметров вентилятора, необходимых для эффективной теплоотдачи.

В результате проведённых расчётов установлено, что модуль ЭСОГ может отводить от проходящего газа тепловую мощность около 760 кВт, при этом отводимая воздухом мощность составляет примерно 735 кВт. Разница в 3 % вполне допустима для заданной модели.

Воздушная мощность, создаваемая вентилятором, составляет 2408 Вт. С учётом КПД вентилятора (0,65) потребляемая электрическая мощность составит 3352 Вт. Это примерно в четыре раза ниже, чем аналогичная мощность вентилятора АВО типа АВГБ-83, применяемого в настоящее время. Установка, состоящая из шести модулей, способна отводить такое же количество тепла, что и АВО. При этом суммарная мощность шести электродвигателей в шести секциях ЭСОГ в четыре раза меньше, чем в одном АВО с одинаковыми тепловыми параметрами.

Библиографические ссылки

1. **Шевяков А.А., Яковлева Р.В.** Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968. 320 с.

2. **Селин В.В.** Теплотехника: учебник для вузов. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2001. 381 с.

3. **Теплотехника** / В.Н. Луканин и др.: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2008. 571 с.

4. **Бак О.** Проектирование и расчет вентиляторов / Пер. с нем. И.О. Керстена; под ред. А.Р. Бушеля. М.: Госгортехиздат, 1961. 362 с.

5. **Брусиловский И.В.** Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1986. 288 с.

Ссылка для цитирования

Шамаев А.Е., Сердобинцев С.П., Шамаев Е.П. Расчётная схема энергоэффективной системы охлаждения газа// Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 444—447.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:

«Пресса России» — индекс **27838**.

УДК 621.9.047

В.П. Житников, д-р физ.-мат. наук, **Н.М. Шерыхалина,** д-р техн. наук, **А.А. Соколова**
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
alexandrakrasich@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕПОСТОЯНСТВА ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Приведено решение плоской задачи моделирования начального этапа электрохимической обработки электродом-инструментом круглой формы. Для моделирования использована немонотонная зависимость плотности тока от анодного потенциала, характерная для обработки в пассивирующих электролитах. При этом на обрабатываемой поверхности образовывались три участка: активного растворения, отсутствия растворения (на падающей части зависимости) и слабого растворения при малых плотностях тока. Разработан численно-аналитический метод решения задачи на основе теории функций комплексного переменного, позволивший использовать для моделирования экспериментальные данные.

Ключевые слова: электрохимическая обработка; анодный потенциал; немонотонная зависимость; комплексный потенциал.

A planar problem solution of the initial stage modeling at electrochemical machining initial stage by an electrode-tool with circular shape is adduced. For modeling a nonmonotonic dependence of the current density from the anodic potential is used, what is characteristic for processing in passivating electrolytes. Three sections were formed on the treated surface: active dissolution, no dissolution (on the falling part of the dependence), and weak dissolution at low current densities. A numerical-analytical method for solving the problem on the basis of the complex variable functions theory, which made it possible to use experimental data for modeling, is developed.

Keywords: electrochemical treatment; anodic potential; nonmonotonic dependence; complex potential.

Введение. Рассмотрим плоскую задачу о распределении электрического поля между круглым электродом-инструментом (ЭИ) радиусом R и плоским анодом. Центр ЭИ расположен на расстоянии h от анода. Сечение межэлектродного пространства (МЭП) показано на рис. 1, *а*.

Примем во внимание, что разность потенциалов на аноде и катоде равна $U - \Phi_a - \Phi_c$, где U — напряжение на электродах; Φ_a, Φ_c — электродные потенциалы анода и катода (падения напряжения в приэлектродных слоях), которые связаны с нормальной к поверхностям электродов составляющей плотности тока, т. е. $J_n = F_1(\Phi_a)$, $J_n = F_2(\Phi_c)$. При этом на плоскости комплексного потенциала $W = \Phi + i\Psi$ (Φ — электрический потенциал; Ψ — функция тока) областью, соответствующей МЭП, является криволинейный четырёхугольник высотой $2\Psi_0 = I/\kappa$, где I — сила тока, протекающего в ячейке единичной толщины; κ — электропроводность электролита (рис. 1, *б*).

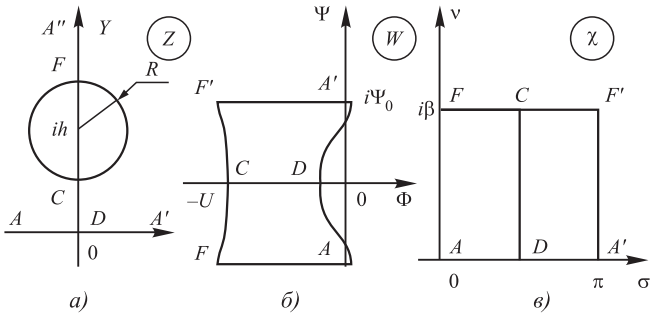


Рис. 1. Формы образов МЭП на физической плоскости (*а*), плоскости комплексного потенциала (*б*), параметрической плоскости (*в*)

Аналогичные задачи с монотонной зависимостью $\Phi_a(J_n)$ решались в работах [1—3] для двугранного и криволинейного бесконечных катодов, при этом требование монотонности $\Phi_a(J_n)$ было существенно для предложенных методов решения задач. В работах [4—6] при решении задач с немонотонной зависимостью $J_n = F_1(\Phi_a)$ использовались степенные ряды, условие сходимости которых существенно ограничивает вид краевого условия. Вследствие этого в работах [4—6] использовалась упрощённая зависимость $J_n = F_1(\Phi_a)$, далекая от зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные [7—9].

Постановка и метод решения задачи. Выберем в качестве области изменения параметрической переменной четырёхугольник шириной π и высотой β на плоскости χ (рис. 1, *в*). Его конформное отображение с плоскости χ на физическую плоскость $Z = X + iY$ осуществляется функцией

$$Z(\chi) = -\sqrt{h^2 - R^2}\,\mathrm{ctg}\chi = l_0 z(\chi), \quad l_0 = \sqrt{h^2 - R^2}. \quad (1)$$

При этом высота прямоугольника

$$\beta = \frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{h^2 - R^2} + h}{R}.$$

Производная

$$\frac{dz}{d\chi} = \frac{1}{l_0}\frac{dZ}{d\chi} = \frac{1}{\sin^2\chi}. \qquad (2)$$

Конформное отображение прямоугольника плоскости χ на W должно удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} &\operatorname{Im} W = \mp\frac{I}{2\kappa} \text{ на } FA \text{ и } F'A';\\ &J_n = F_1(\Phi_a) \text{ на } ADA';\\ &J_n = F_2(\Phi_c) \text{ на } FCF'. \end{aligned} \qquad (3)$$

Конформное отображение $w(\chi) = W/U$ будем искать в виде суммы $w(\chi) = i\frac{\gamma}{\beta}\chi + w_1(\chi)$, где первое слагаемое производит отображение прямоугольника плоскости χ на прямоугольник плоскости W, а второе слагаемое используется для учёта зависимости электродных потенциалов. Отметим, что $w_1(\chi)$ — периодическая (с периодом π), с точки зрения теории функций комплексного переменного, функция χ. Для эквипотенциальных электродов выполняется равенство $U = \frac{I}{\kappa}\beta$.

Аналитическая функция $f(\chi)$ может быть определена по краевым условиям, которые представляются равенствами

$$\operatorname{Im} f(\sigma) = \varphi_1(\sigma), \qquad (4)$$

$$\operatorname{Im} f(\sigma + i\beta) = \varphi_2(\sigma), \qquad (5)$$

где $\sigma \in [0, \pi]$, $\varphi_1(\sigma)$, $\varphi_2(\sigma)$— заданные функции.

При условиях (4), (5) аналитическая внутри прямоугольника и непрерывная в его замыкании периодическая (с периодом π) функция $f(\chi)$ определяется при решении задачи Шварца [10]. Это решение может быть получено по формуле [11]

$$f(\chi) = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi \varphi_1(\sigma)\left[\frac{\vartheta_1'(\sigma-\chi)}{\vartheta_1(\sigma-\chi)} - \frac{\vartheta_1'(\sigma)}{\vartheta_1(\sigma)}\right]d\sigma -$$
$$-\frac{1}{\pi}\int_0^\pi \varphi_2(\sigma)\left[\frac{\vartheta_4'(\sigma-\chi)}{\vartheta_4(\sigma-\chi)} - \frac{\vartheta_4'(\sigma)}{\vartheta_4(\sigma)}\right]d\sigma + c_1, \qquad (6)$$

где c_1 — произвольная действительная постоянная (для данной задачи $c_1 = 0$).

Логарифмические производные тэта-функций $\vartheta_k(\sigma)$ вычисляются через быстро сходящиеся ряды [12].

Для выполнения условия (5) необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\int_0^\pi \varphi_1(\sigma)d\sigma = \int_0^\pi \varphi_2(\sigma)d\sigma. \qquad (7)$$

Допустим, для анода задана зависимость

$$\operatorname{Re} w(\sigma + i0) = \varphi_a(\sigma) = -\mu(\sigma), \qquad (8)$$

для катода —

$$\operatorname{Re} w(\sigma + i\beta) = \varphi_c(\sigma) = -1 + \nu(\sigma), \qquad (9)$$

где $\mu(\sigma)$, $\nu(\sigma)$ — искомые функции.

Для учёта неравномерности поляризации представим комплексный потенциал в виде

$$r(\chi) = -iw(\chi) = -i\varphi + \psi = \frac{\gamma}{\beta}\chi + f(\chi),$$

где γ — параметр, определяемый ниже из условий задачи.

В этом выражении $f(\chi)$ — функция, определяемая с помощью интеграла Шварца (6), где функции $\varphi_1(\sigma)$ и $\varphi_2(\sigma)$ согласно (8), (9) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} &\varphi_1(\sigma) = \operatorname{Im} f(\sigma + i0) = \mu(\sigma);\\ &\varphi_2(\sigma) = \operatorname{Im} f(\sigma + i\beta) = \lambda - \nu(\sigma) \end{aligned} \qquad (10)$$

(параметр λ определён ниже).

Справедливы следующие условия:

$$\begin{aligned} &\operatorname{Im} r(\sigma + i0) = \mu(\sigma);\\ &\operatorname{Im} r(\sigma + i\beta) = -\operatorname{Re} w(\sigma + i\beta) =\\ &= \gamma + \operatorname{Im} f(\sigma + i\beta) = 1 - \nu(\sigma). \end{aligned} \qquad (11)$$

Из выражений (9) и (11) следует соотношение

$$\gamma + \operatorname{Im} f(\sigma + i\beta) = \gamma + \lambda - \nu(\sigma) = 1 - \nu(\sigma), \lambda = 1 - \gamma.$$

Из условия (7) следует уравнение

$$\int_0^\pi \mu(\sigma)d\sigma = (1-\gamma)\pi - \int_0^\pi \nu(\sigma)d\sigma,$$

т. е.

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\pi}\left[\int_0^\pi \mu(\sigma)d\sigma + \int_0^\pi \nu(\sigma)d\sigma\right]. \qquad (12)$$

Искомыми параметрами являются значения мнимой части функции $\operatorname{Im} f(\sigma_m + i0) = \varphi_m$ в узловых точках $\chi_m = \sigma_m + i0$, а также $\operatorname{Im} f(\sigma'_m + i\beta) = \varphi'_m$, $m = 0, ..., n$. При $\sigma = \sigma_0 = 0$ $\operatorname{Im} f(\sigma_0 + i0) = 0$. Значения $\operatorname{Im} f(\sigma)$ в промежуточных между узловыми точках найдем с помощью кубических сплайнов $S_1(\sigma)$и $S_2(\sigma)$, имеющих две непрерывные производные.

Полученные с помощью формулы (6) значения $\mathrm{Re}\, f(\sigma_m + i0)$ и $\mathrm{Re}\, f(\sigma'_m + i\beta)$ интерполируются кубическими сплайнами $P_1(\sigma)$ и $P_2(\sigma)$. При этом коэффициенты сплайна являются значениями первых производных $P'_j(\sigma_m)$.

Величина, комплексно сопряжённая с безразмерной напряжённостью (плотностью тока), определяется производной

$$\frac{dw}{dz} = \frac{dw}{d\chi}\left(\frac{dz}{d\chi}\right)^{-1} = \frac{\partial w/\partial\sigma}{\partial z/\partial\sigma} = \\ = i(\gamma + P'_j(\sigma) + iS'_j(\sigma))\sin^2\sigma. \qquad (13)$$

При переменных электродных потенциалах вектор плотности тока на границах электродов имеет как нормальную, так и тангенциальную составляющие. Предполагается, что электродные потенциалы зависят только от нормальной составляющей J_n: $\Phi_{a,\,c} = \Phi_{a,\,c}(J_n)$. Рассмотрим зависимость для анодного потенциала, аппроксимирующую экспериментальные результаты [8] (рис. 2),

$$J_n(\Phi_a) = 0,025 - 0,692\Phi_a + 1,298\Phi_a^2 - \\ - 0,965\Phi_a^3 + 0,223\Phi_a^4 + 0,17\mathrm{tg}(0,655\Phi_a) + \\ + \frac{0,0143\Phi_a}{\Phi_a^7 + (0,5712)^7}; \quad \Phi_a \geqslant 0. \qquad (14)$$

Такая немонотонная зависимость характерна для обработки в пассивирующих электролитах [7—9]. Поскольку согласно рис. 2 $J_n(0) > 0$, примем, что потенциал электрического поля $\Phi(\chi) = \mathrm{Re}W + \Delta\Phi_a$, где $\Delta\Phi_a \approx 0,7$ В — значение анодного потенциала при отсутствии тока в цепи.

Для катодного потенциала принята зависимость вида

$$J_n(\Phi_c) = \Delta\Phi_c + \frac{1}{2}\mathrm{tg}(\pi\Phi_c) \qquad (15)$$

при $\Delta\Phi_c = 0,5$ исходя из условия, чтобы на катоде максимальное падение потенциала составляло около 1 В, что характерно для катода из латуни [13]. Задача решается методом коллокаций. Равенство (14) выполняется в дискретных точках $\chi_m = \sigma_m + i0$; $m = 1, ..., n$, а (15) — в точках $\chi'_m = \sigma'_m + i\beta$; $m = 0, ..., n$. Полученная таким образом система $2n + 1$ нелинейных уравнений решается методом Ньютона с регулированием шага. Задача решается в условно-размерных единицах, чтобы привести полученные результаты к зависимости (14) и результатам эксперимента [8]. При этом

$$U = 4,1 + \Delta\Phi_a - \Delta\Phi_c,\ \text{В};\ R = 7,5\ \text{мм};\ h = 7,8\ \text{мм};$$
$$J = \Gamma U\frac{dw}{dz};\quad \Gamma = \frac{\kappa}{h}.$$

Результаты численного решения приведены на рис. 3...7.

На рис. 3 показана расчётная конфигурация границ областей на плоскостях Z и W для $\Gamma = 0,5$, где $Z = X + iY$, $W = \Phi + i\Psi$.

На рис. 4 приведено распределение потенциала по поверхности анода, на рис. 5 — распределение тангенциальной составляющей J_t и полной плотности тока J, на рис. 6, *а* — распределение нормальной составляющей плотности тока J_n. Кривые *1*, *2*, *3* на рис. 4...7 соответствуют значениям Г, равным 0,5; 0,75; 1 соответственно.

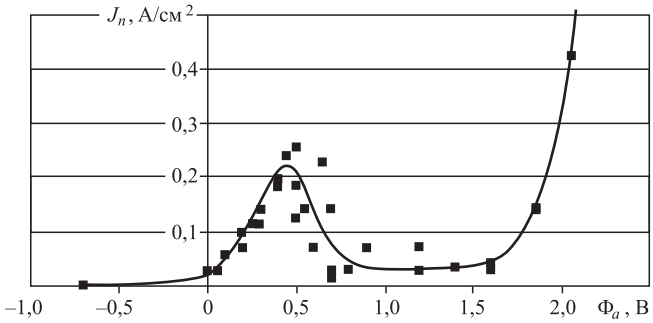


Рис. 2. График, аппроксимирующий зависимость (14):
■ — результаты эксперимента

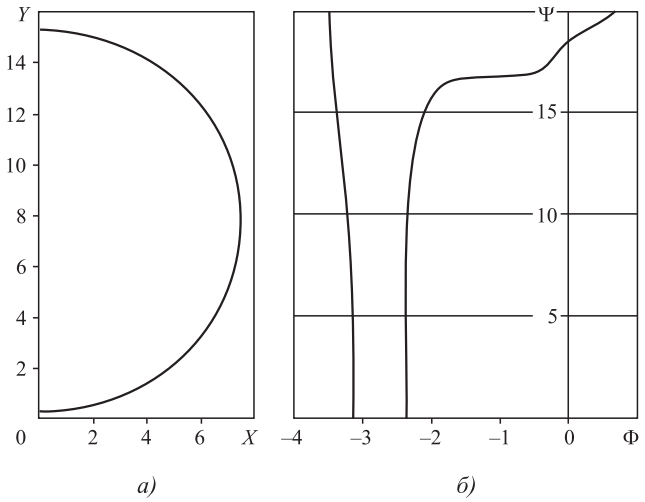


Рис. 3. Формы области МЭП на физической плоскости *Z* (*а*) и плоскости комплексного потенциала *W* (*б*)

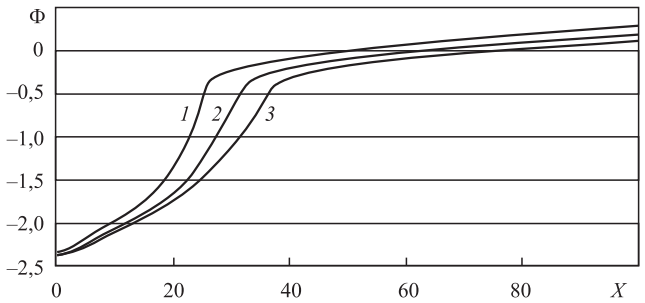


Рис. 4. Распределение потенциала по поверхности анода

На рис. 6, *б* для сравнения приведено распределение плотности тока для эквипотенциального анода. Видно, что уменьшение локальной разности потенциалов может приводить к существенному уменьшению плотности тока вблизи точки *D*, наиболее приближенной к поверхности катода (см. рис. 1).

Перераспределение тока, связанное с переменностью электродных потенциалов, проиллюстрировано на рис. 7, где показаны значения тока ψ, протекающего на участках анода от точки *D* ($X = 0$) до точки с абсциссой *X*, отнесённые к полному току, для переменного (*1*) при Г = 0,75 и постоянного (*2*) анодных потенциалов. Для Г = 0,5 и Г = 1 эти зависимости различаются незначительно. Легко заметить, что при постоянном потенциале анода на расстоянии $X = 20$ протекает более 93 % тока, при переменном — около 80 %.

Для анализа вычислительных погрешностей применяли численную фильтрацию [14, 15] зависимостей десятичного логарифма оценок погрешностей (с обратным знаком) от десятичного логарифма числа точек колллокаций *n* (рис. 8, *n* = 10, 20, ..., 320), основанную на многокомпонентном анализе этих зависимостей и поочерёдном исключении (отфильтровывании) компонент погрешности. Цифрой *0* обозначены оценки результатов вычислений, цифрами *1*, *2* — результаты фильтрации. В результате оценок выяснено, что относительная погрешность вычисленного значения потенциала при *n* = 320 не превышает 10^{-8}, а плотности тока — 10^{-6}.

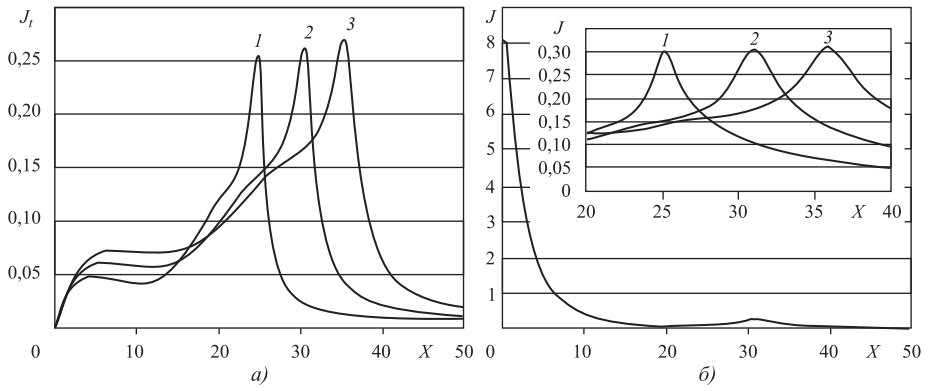


Рис. 5. Распределение плотности тока по поверхности анода:
а — тангенциальная составляющая; *б* — полная плотность тока

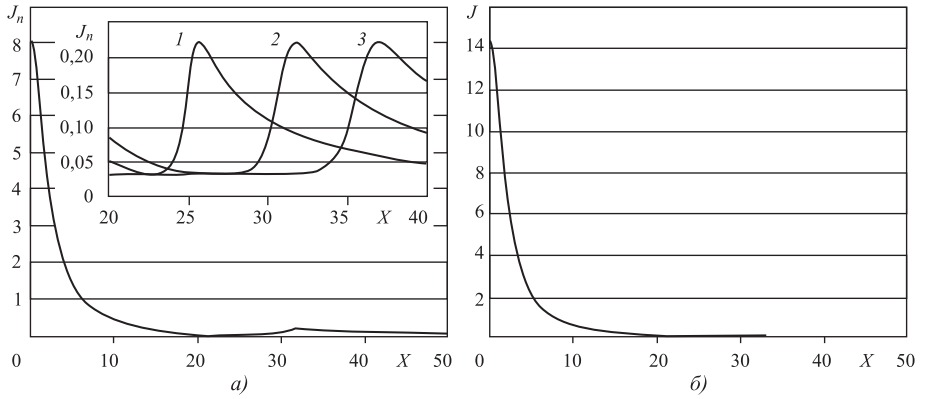


Рис. 6. Распределение нормальной составляющей плотности тока по поверхности анода:
а — для зависимости (14); *б* — для эквипотенциального анода

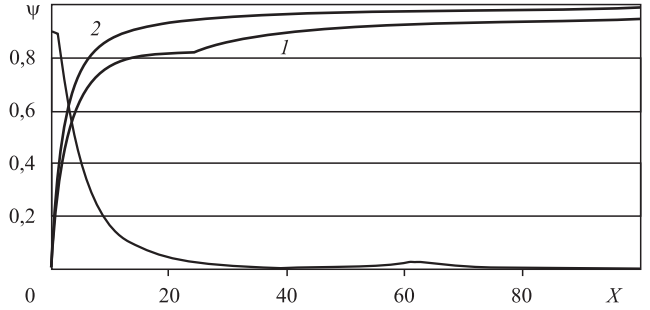


Рис. 7. Распределение функции тока по поверхности анода

В работе [8, с. 347] приведена фотография поверхности, полученная при обработке сферическим ЭИ углеродистой стали в водном растворе нитрата натрия. Оптический анализ образца показал, что на его поверхности образовались три характерные зоны, находящиеся в области различных значений анодного потенциала и плотностей тока. Зона 1 находится вблизи оси ЭИ, где поверхность катода расположена на минимальном расстоянии от анодной поверхности. Плотность тока для зоны 1 максимальна. Состояние этой зоны электрохимически соответствует условиям активного растворения. Зона 2 соответствует области пассивного состояния поверхности, о чем свидетельствует отсутствие на ней следов электрохимического воздействия. И, наконец, зона 3 соответствует области слабого анодного растворения.

Сопоставляя зависимость (14) (см. рис. 2), кривые распределения плотностей тока по координате *X* (рис. 4) и фотографию обработанной поверхности, можно предположить, что зона 2, где железо находилось в пассивном состоянии и отсутствовало раствере-

ние, соответствует падающей части зависимости (14). Зона 1, где протекали процессы активного электрохимического растворения, соответствует возрастающей части этой зависимости, находящейся за зоной уменьшения плотности тока. Зона 3, где протекали процессы слабого электрохимического растворения, соответствует возрастающей части зависимости (14) в области малых плотностей тока.

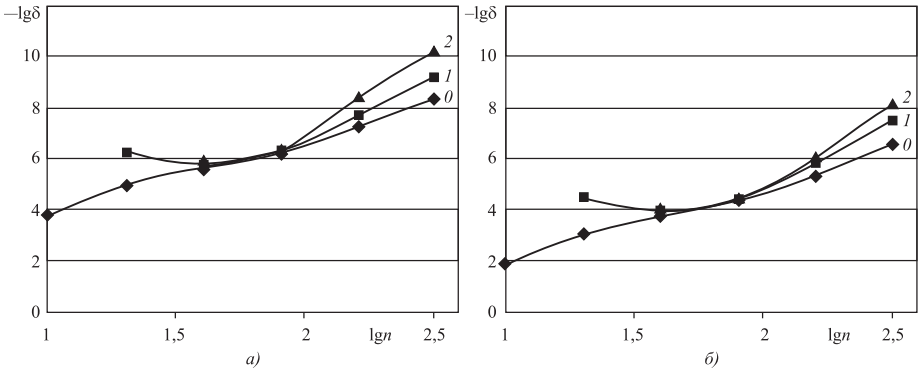


Рис. 8. Оценка относительной погрешности параметров в точке *D*:
а — потенциала; *б* — плотности тока

Выводы. Предложен численно-аналитический метод и решена задача о распределении электрического поля и поля токов между круглым электродом-инструментом и плоским анодом при условии переменности анодного потенциала с немонотонной зависимостью нормальной составляющей плотности тока от анодного потенциала.

Переменность анодного потенциала приводит к уменьшению плотности тока в зоне активного растворения и вытеснению линий тока на периферию.

Сравнение расчётных данных с результатами натурного эксперимента показало их качественное совпадение.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-07-00356.

Библиографические ссылки

1. **Клоков В.В., Шишкин С.Е.** Стационарное анодное формообразование двугранным катодом при неравномерной поляризации анода // Тр. семин. по краевым задачам. Казань, Казанск. ун-т. 1985. Вып. 22. С. 117—124.

2. **Газизов Е.Р., Маклаков Д.В.** Анодное формообразование двугранным катодом при неравномерной поляризации анода // Изв. вузов. Авиационная техника. 2002. № 4. С. 55—57.

3. **Газизов Е.Р.** Анодное формообразование криволинейным катодом при неравномерной поляризации анода // Изв. КГАСУ. Казань. 2006. № 1 (5). С. 132—135.

4. **Муксимова Р.Р., Житников В.П., Зарипов А.А.** Исследование влияния неравномерности потенциала при электрохимической обработке в пассивирующем электролите // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. «Теория и практика современных электрохимических производств». СПб., 2014. С. 37—38.

5. **Зарипов А.А.** Моделирование электрохимической обработки стержневым электрод-инструментом в пассивирующем электролите // Сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Теоретические и прикладные аспекты современной науки». Ч. 1. Белгород, 2015. С. 8—14.

6. **Житникова Н.И., Зарипов А.А., Федорова Г.И.** Моделирование электрохимической обработки круглым электрод-инструментом в условиях непостоянства электродных потенциалов // Тенденции развития науки и образования: сб. науч. тр. по материалам XXIX Междунар. науч.-практ. конф. 31 августа 2017 г. Ч. 3. Самара: НИЦ «Л-Журнал», 2017. С. 5—9.

7. **Седыкин Ф.В., Орлов Б.П., Матасов В.Ф.** Исследование анодного тока при электрохимической обработке при постоянном и импульсном напряжении // Технология машиностроения. 1975. № 39. С. 3—10.

8. **Житников В.П., Зайцев А.Н.** Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.

9. **Kosarev T.V., Idrisov T.R., Zaitsev A.N., Zhitnikov V.P.** Investigation and Simulation of Topology of Passivity and Active Dissolution Areas on Anode for Electrochemical Machining with Additional Cathode // Proc. of 15th Intern. symposium on electromachining ISEM-15. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, April 23—27 2007. P. 305—308.

10. **Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.** Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.

11. **Терентьев А.Г.** К линейной теории кавитационного обтекания препятствий // Вопросы прикладной матем. и мех. Чебоксары, Чуваш. ун-т. 1971. Вып. 1. С. 3—35.

12. **Гуревич М.И.** Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.

13. **Клоков В.В.** Электрохимическое формообразование. Казань, Казанский ун-т, 1984. 80 с.

14. **Житников В.П., Шерыхалина Н.М.** Применение многократной фильтрации при численном решении задач методами теории функций комплексного переменного // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 1. С. 15—24.

15. **Zhitnikov V.P., Sherykhalina N.M., Sokolova A.A.** Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates // Mediterranean Journ. of Soc. Sci. 2015. Vol. 6. No. 2. P. 65—78.

Ссылка для цитирования

Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А. Численное исследование влияния непостоянства электродных потенциалов на результаты электрохимической обработки // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 448—452.

УДК 621.391:519.216.1/2

А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., **В.В. Сюзев,** д-р техн. наук, проф.,
В.В. Гуренко, доц., **Б.И. Бычков**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
wgurenko@bmstu.ru

АЛГОРИТМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРОВ В БАЗИСАХ ХАРТЛИ И УОЛША

Для повышения эффективности спектральных алгоритмов цифровой обработки сигналов в информационно-управляющих системах реального времени поставлена и решена научно-прикладная задача преобразования спектров Хартли в спектры Уолша. Проведён анализ структур матриц ядра Фурье, составляющих математическую основу операторов преобразования спектров. Для различных способов организации базисных систем Уолша сформулированы оригинальные правила образования независимых групп спектральных коэффициентов Хартли и Уолша. При помощи независимых групп построены новые, более экономичные по затратам вычислительных ресурсов алгоритмы преобразования спектров. Проведена оценка вычислительной сложности полученных алгоритмов.

Ключевые слова: дискретные сигналы; спектры Хартли; спектры Уолша; преобразование спектров; ядро Фурье; вычислительная сложность.

The scientific and applied problem of converting the Hartley spectra to Walsh spectra for improving the efficiency of spectral algorithms for digital signal processing in real-time information and control systems is solved. The analysis of the Fourier core matrices structure, which make up the mathematical basis of the spectra transformation operators, is carried out. The original rules for the independent group formation of the Hartley and Walsh spectral coefficients for various ways of organizing basic Walsh systems are formulated. The new algorithms for spectra transforming, more efficient on aspects such as computing resources expenditure, are built with the help of independent groups. The computational complexity of the obtained algorithms is estimated.

Keywords: discrete signals; Hartley spectra; Walsh spectra; spectra transformation; the Fourier core; computational complexity.

Введение. Решение широкого круга задач цифровой обработки сигналов связано с взаимопреобразованием спектров одного и того же сигнала в различных базисных системах [1—7]. Известный алгоритм преобразования спектров опирается на аппарат обобщённого преобразования Фурье [8, 9], математическую основу которого составляют операторы преобразования спектров, записываемые в общем случае в виде следующих уравнений:

$$X_\varphi(k) = \sum_{m=0}^{N-1} X_\psi(m)\Phi(k,m),\ k \in [0, N), \quad (1)$$

$$\Phi(k,m) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} \psi(m,i)\,\varphi(k,i), \quad (2)$$

где $X_\varphi(k)$ и $X_\psi(m)$ — спектральные коэффициенты (спектры) в дискретных действительных ортонормированных базисах $\{\varphi(k, i)\}$ и $\{\psi(m, i)\}$ соответственно.

Интервалы изменения номеров k и m спектральных коэффициентов и базисных функций, а также дискретного времени i лежат в целочисленном диапазоне $[0, N)$. Двумерная функция $\Phi(k, m)$ в формулах (1) и (2) является ядром Фурье [8, 9] и физически определяет набор спектров базисных функций $\{\psi(m, i)\}$ по системе базисных функций $\{\varphi(k, i)\}$.

Алгоритм преобразования спектров (1) можно записать в матричном виде

$$\boldsymbol{X}_\varphi = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{X}_\psi, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{X}_\varphi$ и $\boldsymbol{X}_\psi$ — матрицы-столбцы спектральных коэффициентов в базисах $\{\varphi(k, i)\}$ и $\{\psi(m, i)\}$ соответственно; $\boldsymbol{\Phi}$ — матрица ядра Фурье, имеющая в общем случае вид

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi(0,0) & \Phi(0,1) & \dots & \Phi(0,N-1) \\ \Phi(0,0) & \Phi(1,1) & \dots & \Phi(1,N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi(N-1,0) & \Phi(N-1,1) & \dots & \Phi(N-1,N-1) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Обратное преобразование спектра $X_\varphi(k)$ в спектр $X_\psi(m)$ можно осуществить по уравнению

$$\boldsymbol{X}_\psi = \boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{X}_\varphi = \boldsymbol{\Phi}^T\boldsymbol{X}_\varphi, \qquad (5)$$

где матрица $\boldsymbol{\Phi}^{-1}$ является обратной матрице $\boldsymbol{\Phi}$ и совпадает для нормированных базисов с транспонированной матрицей $\boldsymbol{\Phi}^T$.

В этом случае уравнение преобразования спектров представляется в следующем скалярном виде:

$$X_\psi(m) = \sum_{k=0}^{N-1} X_\varphi(k)\Phi(m,k). \qquad (6)$$

Матричное представление ядра Фурье удобно потому, что позволяет наглядно отражать его структуру и процесс преобразования спектра. Для этого целесообразно в дополнительной горизонтальной строке сверху над матрицей $\boldsymbol{\Phi}$ указать все спектральные коэффициенты $X_\psi(m)$, а в дополнительном вертикальном столбце перед матрицей — коэффициенты $X_\varphi(k)$:

$$\Phi = \begin{array}{c} \\ X_\varphi(0) \\ X_\varphi(1) \\ \dots \\ X_\varphi(N-1) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} X_\psi(0) & X_\psi(1) & \dots & X_\psi(N-1) \end{array} \\ \begin{bmatrix} \Phi(0,0) & \Phi(0,1) & \dots & \Phi(0,N-1) \\ \Phi(0,0) & \Phi(1,1) & \dots & \Phi(1,N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi(N-1,0) & \Phi(N-1,1) & \dots & \Phi(N-1,N-1) \end{bmatrix} \end{array}. \qquad (7)$$

Тогда спектральные коэффициенты $X_\varphi(k)$ можно получить суммированием произведений всех спектральных коэффициентов $X_\psi(m)$ на элементы матрицы $\boldsymbol{\Phi}$, лежащие на пересечении её k-го столбца и m-й строки ($m = \overline{0, N-1}$). Спектральные же коэффициенты $X_\psi(m)$ будут равны сумме произведений каждого коэффициента $X_\varphi(k)$ ($k = \overline{0, N-1}$) на находящийся в его строке элемент k-го столбца матрицы ядра.

Если элементы ядра (2) вычислить заранее, то в общем случае для расчёта всего спектра $X_\varphi(k)$ или $X_\psi(m)$ потребуется затратить по N^2 операций умножения и сложения. Этот объём вычислительных операций и составит вычислительную сложность известных алгоритмов преобразования спектров.

Упростить алгоритмы преобразования и тем самым повысить их вычислительную эффективность можно только для конкретных базисных систем за счёт наличия в структуре их ядер Фурье нулевых элементов. Примерами таких ядер являются ядра в операторах преобразования спектров из базиса Уолша—Пэли в базис дискретных комплексных экспоненциальных функций (ДЭФ) Фурье [10], из базиса ДЭФ в базис функций Виленкина—Крестенсона [9, 11] и из базиса тригонометрических функций Фурье в базисы функций Уолша различного способа их упорядочения [12]. Из них особое практическое значение приобретают последние операторы преобразования спектров Фурье и Уолша, что объясняется рядом присущих им важных свойств. Во-первых, ядра Фурье этих операторов содержат сугубо вещественные элементы, и при их реализации выполняются только вещественные вычислительные операции. Во-вторых, спектры в базисе Фурье несут сведения о гармонической структуре сигналов, являющиеся исходной информацией при решении задач их обработки в частотной области [2—5]. В-третьих, функции Уолша, используемые в этих операторах, принимают простейшие значения ±1, и их применение приводит к экономичным алгоритмам обработки, не содержащим операций умножения [5—7, 13, 14].

Следует, однако, учесть, что существует ещё одна базисная система функций Хартли, тесно связанная с частотным представлением сигналов [15]. Эта система может рассматриваться в качестве альтернативы системам Фурье, поскольку, по мнению Р. Брейсуэлла, «нет таких задач, для которых справедливо использование преобразований Фурье и одновременно не может быть применено преобразование Хартли» [15]. В соответствии с этим, целями данной статьи поставлены разработка и исследование алгоритмов преобразования спектров Хартли и Уолша по методике, предложенной авторами в статье [12]. При этом, как и в статье [12], в настоящей работе из всех возможных модификаций систем Уолша, отличающихся порядком следования базисных функций, рассматриваются только наиболее используемые системы Адамара, Пэли и Хармута [9, 13, 14].

Базисная система функций Хартли. Дискретная система Хартли {cas(m, i)} относится к классу формальных систем [8, 9] и образуется из тригонометрических чётных $\cos\left(\frac{2\pi}{N}mi\right)$ и нечётных $\sin\left(\frac{2\pi}{N}mi\right)$ функций по следующему простому алгоритму:

$$\mathrm{cas}(m,i) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}mi\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{N}mi\right). \qquad (8)$$

Здесь номер m функции Хартли и её аргумент i изменяются в пределах целочисленного интервала [0, N) из N точек. На этом интервале система является ортонормированной и полной.

Обратное и прямое ДПФ в базисе Хартли имеют следующий вид:

$$x(i) = \sum_{m=0}^{N-1} X_{\text{Х}}(m)\text{cas}(m,i); \quad (9)$$

$$X_{\text{Х}}(m) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x(i)\text{cas}(m,i), \quad (10)$$

а соответствующее им равенство Парсеваля записывается так:

$$\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x^2(i) = \sum_{m=0}^{N-1} X_{\text{Х}}^2(m). \quad (11)$$

Его справедливость отражает равенство мощности сигнала при его представлении во временной и спектральной областях, а также подтверждает полноту базисной системы Хартли.

Базисные системы функций Уолша. Дискретные функции Уолша [9, 10, 13, 14] принимают значения ±1, определены и ортонормированы на интервале [0, N), где N представляется в двоично-рациональном виде 2^n, n = 1, 2, ... При этом величина n совпадает с количеством разрядов в двоичных представлениях номера k и аргумента i функций Уолша:

$$k = \sum_{\nu=1}^{n} k_\nu 2^{\nu-1},\ k_\nu = 0; 1;$$

$$i = \sum_{\nu=1}^{n} i_\nu 2^{\nu-1},\ \ i_\nu = 0; 1.$$

На основе таких функций могут быть образованы различные базисные системы, отличающиеся порядком следования функций и видом их аналитического описания. Для систем Адамара {had(k, i)}, Пэли {pal(k, i)} и Хармута {har(k, i)}, широко используемых на практике, в данной работе применяется тригонометрическое представление функций Уолша:

$$\text{had}(k,i) = \cos\left(\pi\sum_{\nu=1}^{n} k_\nu i_\nu\right); \quad (12)$$

$$\text{pal}(k,i) = \cos\left(\pi\sum_{\nu=1}^{n} k_{n+1-\nu} i_\nu\right); \quad (13)$$

$$\text{har}(k,i) = \cos\left(\pi\sum_{\nu=1}^{n} \langle k_{n+1-\nu}\rangle i_\nu\right), \quad (14)$$

где $\langle k_{n+1-\nu}\rangle$ — (n + 1 − ν)-й разряд кода Грея двоичного кода номера функции n + 1 − ν, вычисляемого по правилу $\langle k_\nu\rangle = k_\nu + k_{\nu+1}(\text{mod}2)$, ν = 1, 2, ..., n; $k_{n+1} = 0$.

Из сравнения формул (12)—(14) следует, что систему Пэли можно получить из системы Адамара путём двоичной инверсии кодов номеров её функций, т. е. записью двоичного кода номеров функций Адамара в обратном порядке, а систему Хармута можно получить из системы Пэли заменой двоичных кодов номеров её функций на соответствующие им коды Грея. Следует также учесть, что система Хармута является составной системой, так как в ней чётные относительно середины интервала определения функции cal(p, i) = har(2p, i), $p = 0,1,\ldots,\frac{N}{2}-1$ чередуются с нечётными $\text{sal}(p,i) = \text{har}(2p-1,i),\ p = 1,2,\ \ldots,\frac{N}{2}$ [9, 14]. В этом смысле она подобна тригонометрической системе, и её спектры также целесообразно представлять в виде совокупности чётных $X_{\text{Хч}}(k)$ и нечётных $X_{\text{Хн}}(k)$ составляющих. Для систем Адамара и Пэли спектры не разделяются и соответственно равны $X_{\text{А}}(k)$ и $X_{\Pi}(k)$.

Для систем Уолша ДПФ и равенства Парсеваля представляются следующим образом:

$$x(i) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{\text{А}}(k)\text{had}(k,i) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{\Pi}(k)\text{pal}(k,i); \quad (15)$$

$$x(i) = X_{\text{Хч}}(0) + \sum_{p=1}^{\frac{N}{2}-1}[X_{\text{Хч}}(p)\text{cal}(p,i) + X_{\text{Хн}}(p)\text{sal}(p,i)] + X_{\text{Хч}}\left(\frac{N}{2}\right)\text{cal}\left(\frac{N}{2},i\right); \quad (16)$$

$$X_{\text{А}}(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x(i)\text{had}(k,i);$$
$$X_{\Pi}(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x(i)\text{pal}(k,i); \quad (17)$$

$$X_{\text{Хч}}(p) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x(i)\text{cal}(p,i);\ p = 0,1,\ \ldots,\frac{N}{2}-1; \quad (18)$$

$$X_{\text{Хн}}(p) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x(i)\text{sal}(p,i);\ p = 1,2,\ldots,\frac{N}{2}; \quad (19)$$

$$\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x^2(i) = \sum_{k=0}^{N-1} X_A^2(k) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{\Pi}^2(k) = X_{\text{Хч}}^2(0) + \sum_{p=1}^{\frac{N}{2}-1}\left[X_{\text{Хч}}^2(p) + X_{\text{Хн}}^2(p)\right] + X_{\text{Хн}}^2\left(\frac{N}{2}\right). \quad (20)$$

Справедливость равенств Парсеваля (20) в системах Уолша подтверждает их полноту.

Алгоритм преобразования спектров Хартли и Адамара. В этом случае базис {ψ(m, i)} становится базисом Хартли, а базис {φ(k, i)} — базисом Адамара. Ядро Фурье будет представлено в виде

$$\Phi(k,m) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{cas}(m,i)\mathrm{had}(k,i), \quad (21)$$
$$k = 0,1,\ldots,N-1, m = 0,1,\ldots,N-1,$$

где $N = 2^n$, $n = 1, 2, \ldots$

Расчёт по формуле (21) позволяет получить ядро для любых двоично-рациональных значений N. Для $N = 8$ оно имеет следующий матричный вид:

$$\begin{array}{c} \\ X_A(0) \\ X_A(1) \\ X_A(2) \\ X_A(3) \\ X_A(4) \\ X_A(5) \\ X_A(6) \\ X_A(7) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} X_X(0) & X_X(1) & X_X(2) & X_X(3) & X_X(4) & X_X(5) & X_X(6) & X_X(7) \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \Phi(4,1) & 0 & \Phi(4,3) & 0 & \Phi(4,5) & 0 & \Phi(4,7) \\ 0 & \Phi(5,1) & 0 & \Phi(5,3) & 0 & \Phi(5,5) & 0 & \Phi(5,7) \\ 0 & \Phi(6,1) & 0 & \Phi(6,3) & 0 & \Phi(6,5) & 0 & \Phi(6,7) \\ 0 & \Phi(7,1) & 0 & \Phi(7,3) & 0 & \Phi(7,5) & 0 & \Phi(7,7) \end{bmatrix} \end{array}.$$

Эта матрица включает 44 нулевых элемента, 4 единичных элемента и 16 элементов, отличных от нуля и единицы. Значения последних элементов составят:

$$\Phi(4,1) = (2+\sqrt{2})/4, \quad \Phi(4,3) = \sqrt{2}/4,$$
$$\Phi(4,5) = (2-\sqrt{2})/4, \quad \Phi(4,7) = -\sqrt{2}/4,$$
$$\Phi(5,1) = (2-\sqrt{2})/4, \quad \Phi(5,3) = -\sqrt{2}/4,$$
$$\Phi(5,5) = (2+\sqrt{2})/4, \quad \Phi(5,7) = \sqrt{2}/4,$$
$$\Phi(6,1) = \sqrt{2}/4, \quad \Phi(6,3) = (2-\sqrt{2})/4,$$
$$\Phi(6,5) = -\sqrt{2}/4, \quad \Phi(6,7) = (2+\sqrt{2})/4,$$
$$\Phi(7,1) = -\sqrt{2}/4, \quad \Phi(7,3) = (2+\sqrt{2})/4,$$
$$\Phi(7,5) = \sqrt{2}/4, \quad \Phi(7,7) = (2-\sqrt{2})/4.$$

Нулевые элементы в матрице ядра располагаются таким образом, что из ненулевых элементов, включая и единичные, можно образовать 5 независимых групп, каждая из которых не содержит элементов других групп. Для приведённого примера первая группа включает один элемент $\Phi(0,0) = 1$, вторая группа — один элемент $\Phi(1,4) = 1$, третья группа — один элемент $\Phi(2,2) = 1$, четвёртая группа — один элемент $\Phi(3,6) = 1$, а последняя, пятая группа — все оставшиеся ненулевые элементы.

Поскольку при преобразовании спектров спектральные коэффициенты базисов Хартли и Адамара связаны между собой и с элементами ядра, то правило формирования независимых групп переносится и на спектры Хартли и Адамара. Из них также можно образовать 5 групп, в первую из которых будут входить коэффициенты $X_X(0)$ и $X_A(0)$, во вторую — $X_X(4)$ и $X_A(1)$, в третью — $X_X(2)$ и $X_A(2)$, в четвёртую — $X_X(6)$ и $X_A(3)$, а в последнюю — все остальные коэффициенты. При этом спектр Адамара можно вычислить по спектру Хартли с помощью следующих уравнений:

$$X_A(0) = X_X(0); X_A(1) = X_X(4);$$
$$X_A(2) = X_X(2); X_A(3) = X_X(6);$$
$$X_A(4) = X_X(1)\Phi(4,1) + X_X(3)\Phi(4,3) +$$
$$+ X_X(5)\Phi(4,5) + X_X(7)\Phi(4,7);$$
$$X_A(5) = X_X(1)\Phi(5,1) + X_X(3)\Phi(5,3) +$$
$$+ X_X(5)\Phi(5,5) + X_X(7)\Phi(5,7);$$
$$X_A(6) = X_X(1)\Phi(6,1) + X_X(3)\Phi(6,3) +$$
$$+ X_X(5)\Phi(6,5) + X_X(7)\Phi(6,7);$$
$$X_A(7) = X_X(1)\Phi(7,1) + X_X(3)\Phi(7,3) +$$
$$+ X_X(5)\Phi(7,5) + X_X(7)\Phi(7,7).$$

Правило образования групп целесообразно иллюстрировать с помощью специальной таблицы (для $N = 8$ — табл. 1).

Вычисляя и анализируя ядра для других значений N и обобщая результаты, получаем, что для произвольного $N = 2^n$ ($n = 1, 2, \ldots$) матрица ядра содержит $2(N^2 + 2)/3$ нулевых и $(N^2 - 4)/3$ ненулевых элементов. Среди ненулевых 4 элемента принимают значение единицы. Из ненулевых элементов и спектральных коэффициентов Адамара и Хартли можно организовать $(n + 2)$ независимые группы, в которые не входят одинаковые элементы и коэффициенты. Правило формирования групп спектральных коэффициентов для произвольного N приведено в табл. 2.

В силу независимости групп мощности сигнала в базисах Хартли и Адамара в пределах

Таблица 1

Правило образования групп в базисе Адамара для $N = 8$

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Адамара	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_A(0)$	$X_X(0)$
2	1	$X_A(1)$	$X_X(4)$
3	1	$X_A(2)$	$X_X(2)$
4	1	$X_A(3)$	$X_X(6)$
5	4	$X_A(4)$, $X_A(5)$, $X_A(6)$, $X_A(7)$	$X_X(1)$, $X_X(3)$, $X_X(5)$, $X_X(7)$

Таблица 2

Правило образования групп в базисе Адамара в общем случае

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Адамара	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_{\text{A}}(0)$	$X_{\text{X}}(0)$
2	1	$X_{\text{A}}(1)$	$X_{\text{X}}\left(\frac{N}{2}\right)$
3	1	$X_{\text{A}}(2)$	$X_{\text{X}}\left(\frac{N}{4}\right)$
4	1	$X_{\text{A}}(3)$	$X_{\text{X}}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right)$
γ, $\gamma = 5, 6, \ldots, n+2$	$2^{\gamma-3}$	$X_{\text{A}}(2^{\gamma-3}+j)$, $j = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1$	$X_{\text{X}}[2^{n-\gamma+2}(1+2m)]$, $m = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1$

каждой группы будут равны. Поэтому равенства Парсеваля можно записать по группам:

$$X_{\text{A}}^2(0) = X_{\text{X}}^2(0);\ X_{\text{A}}^2(1) = X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{2}\right);$$

$$X_{\text{A}}^2(2) = X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{4}\right);\ X_{\text{A}}^2(3) = X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right);$$

$$\sum_{j=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{A}}^2(2^{\gamma-3}+j) = \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{X}}^2(2^{n-\gamma+2}+2^{n-\gamma+3}m),$$

$$\gamma = 5, 6, \ldots, n+2$$

и в объединённом виде:

$$X_{\text{A}}^2(0) + X_{\text{A}}^2(1) + X_{\text{A}}^2(2) + X_{\text{A}}^2(3) + \\ + \sum_{\gamma=5}^{n+2} \sum_{j=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{A}}^2(2^{\gamma-3}+j) = \\ = X_{\text{X}}^2(0) + X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{2}\right) + X_{\text{X}}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) + \\ + \sum_{\gamma=5}^{n+2} \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{X}}^2(2^{n-\gamma+2}+2^{n-\gamma+3}m),$$

а спектр Адамара вычислить по заданному спектру Хартли с помощью следующих уравнений:

$$\left.\begin{aligned} & X_{\text{A}}(0) = X_{\text{X}}(0);\ X_{\text{A}}(1) = X_{\text{X}}\left(\frac{N}{2}\right); \\ & X_{\text{A}}(2) = X_{\text{X}}\left(\frac{N}{4}\right);\ X_{\text{A}}(3) = X_{\text{X}}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right); \\ & X_{A}(2^{\gamma-3}+j) = \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{X}}(2^{n-\gamma+2}+2^{n-\gamma+3}m)\times \\ & \times\Phi[(2^{\gamma-3}+j),(2^{n-\gamma+2}+2^{n-\gamma+3}m)], \\ & \gamma = 5, 6, \ldots, n+2;\ j = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1. \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

Уравнения (22) определяют аналитическое описание алгоритма преобразования спектра Хартли в спектр Адамара.

Алгоритм преобразования спектров Хартли и Пэли. Для этого случая базис $\{\psi(m, i)\}$ по-прежнему совпадает с базисом Хартли $\{\text{cas}(m,i)\}$, а базис $\{\varphi(k, i)\}$ становится базисом Пэли $\{\text{pal}(k, i)\}$. Ядро Фурье можно вычислить по формуле (21) с заменой функций Адамара на функции Пэли. Возможен и другой способ вычисления ядра Фурье—Пэли по известному ядру Фурье—Адамара путём изменения в последнем порядка следования строк по закону двоичной инверсии. В обоих случаях результат будет одним и тем же. При $N = 8$ он представляется в виде матрицы:

$$\begin{array}{c} \\ X_{\Pi}(0) \\ X_{\Pi}(1) \\ X_{\Pi}(2) \\ X_{\Pi}(3) \\ X_{\Pi}(4) \\ X_{\Pi}(5) \\ X_{\Pi}(6) \\ X_{\Pi}(7) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} X_{\text{X}}(0) & X_{\text{X}}(1) & X_{\text{X}}(2) & X_{\text{X}}(3) & X_{\text{X}}(4) & X_{\text{X}}(5) & X_{\text{X}}(6) & X_{\text{X}}(7) \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi(1,1) & 0 & \Phi(1,3) & 0 & \Phi(1,5) & 0 & \Phi(1,7) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi(3,1) & 0 & \Phi(3,3) & 0 & \Phi(3,5) & 0 & \Phi(3,7) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi(5,1) & 0 & \Phi(5,3) & 0 & \Phi(5,5) & 0 & \Phi(5,7) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \Phi(7,1) & 0 & \Phi(7,3) & 0 & \Phi(7,5) & 0 & \Phi(7,7) \end{bmatrix} \end{array}.$$

Данная матрица содержит такое же число нулевых и ненулевых элементов, как и матрица Фурье в базисе Адамара. Её ненулевые элементы, отличные от единицы, составят:

$$\Phi(1,1) = (2+\sqrt{2})/4;\ \ \Phi(1,3) = \sqrt{2}/4;$$
$$\Phi(1,5) = (2-\sqrt{2})/4;\ \ \Phi(1,7) = -\sqrt{2}/4;$$
$$\Phi(3,1) = \sqrt{2}/4;\ \ \Phi(3,3) = (2-\sqrt{2})/4;$$
$$\Phi(3,5) = -\sqrt{2}/4;\ \ \Phi(3,7) = (2+\sqrt{2})/4;$$
$$\Phi(5,1) = (2-\sqrt{2})/4;\ \ \Phi(5,3) = -\sqrt{2}/4;$$
$$\Phi(5,5) = (2+\sqrt{2})/4;\ \ \Phi(5,7) = \sqrt{2}/4;$$
$$\Phi(7,1) = -\sqrt{2}/4;\ \ \Phi(7,3) = (2+\sqrt{2})/4;$$
$$\Phi(7,5) = \sqrt{2}/4;\ \ \Phi(7,7) = (2-\sqrt{2})/4.$$

Из ненулевых элементов здесь также можно образовать 5 независимых групп, что позволяет сформировать 5 групп спектральных коэффициентов. Правило образования таких групп приведено в табл. 3.

В общем случае при произвольном $N = 2^n$ число групп будет равно $n + 2$, а правило образования независимых групп коэффициентов примет вид, показанный в табл. 4.

Таблица 3

Правило образования групп в базисе Пэли для $N = 8$

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Пэли	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_{\Pi}(0)$	$X_{X}(0)$
2	1	$X_{\Pi}(2)$	$X_{X}(2)$
3	1	$X_{\Pi}(4)$	$X_{X}(4)$
4	1	$X_{\Pi}(6)$	$X_{X}(6)$
5	4	$X_{\Pi}(1)$, $X_{\Pi}(3)$, $X_{\Pi}(5)$, $X_{\Pi}(7)$	$X_{X}(1)$, $X_{X}(3)$, $X_{X}(5)$, $X_{X}(7)$

Таблица 4

Правило образования групп в базисе Пэли в общем случае

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Пэли	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_{\Pi}(0)$	$X_{X}(0)$
2	1	$X_{\Pi}\left(\frac{N}{4}\right)$	$X_{X}\left(\frac{N}{4}\right)$
3	1	$X_{\Pi}\left(\frac{N}{2}\right)$	$X_{X}\left(\frac{N}{2}\right)$
4	1	$X_{\Pi}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right)$	$X_{X}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right)$
γ, $\gamma = 5, 6, \ldots, n+2$	$2^{\gamma-3}$	$X_{\Pi}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)]$, $j = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1$	$X_{X}[2^{n+2-\gamma}(1+2m)]$, $m = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1$

Погрупповые равенства Парсеваля записываются так:

$$X_{\Pi}^2(0) = X_{X}^2(0); X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{4}\right) = X_{X}^2\left(\frac{N}{4}\right);$$

$$X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{2}\right) = X_{X}^2\left(\frac{N}{2}\right); X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) = X_{X}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right);$$

$$\sum_{j=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\Pi}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] = \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{X}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2m)],$$

$$\gamma = 5, 6, \ldots, n+2,$$

а общее равенство Парсеваля имеет следующий вид:

$$X_{\Pi}^2(0) + X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{2}\right) + X_{\Pi}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) +$$

$$+ \sum_{\gamma=5}^{n+2} \sum_{j=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\Pi}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] =$$

$$= X_{X}^2(0) + X_{X}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{X}^2\left(\frac{N}{2}\right) + X_{X}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) +$$

$$+ \sum_{\gamma=5}^{n+2} \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{X}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2m)].$$

Выполнение равенств Парсеваля подтверждает справедливость выполненных преобразований спектров Пэли и Хартли, а сами преобразования представляются уравнениями

$$\left.\begin{aligned} & X_{\Pi}(0) = X_{X}(0); X_{\Pi}\left(\frac{N}{4}\right) = X_{X}\left(\frac{N}{4}\right); \\ & X_{\Pi}\left(\frac{N}{2}\right) = X_{X}\left(\frac{N}{2}\right); \\ & X_{\Pi}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) = X_{X}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right); \\ & X_{\Pi}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] = \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{X}[2^{n+2-\gamma}(1+2m)] \times \\ & \times \Phi\left[2^{n+2-\gamma}(1+2j), 2^{n+2-\gamma}(1+2m)\right], \\ & \gamma = 5, 6, \ldots, n+2; j = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1 \end{aligned}\right\}. \quad (23)$$

Эти уравнения и составляют основу алгоритма преобразования спектра Хартли в спектр Пэли.

Алгоритм преобразования спектров Хартли и Хармута. В этом случае $\{\psi(m, i)\} = \{\mathrm{cas}(m, i)\}$, а $\{\varphi(k, i)\} = \{\mathrm{cal}(p, i), \mathrm{sal}(p, i)\}$. Так как базис Хармута является составным базисом, то и ядро Фурье также будет состоять из двух чередующихся составляющих:

$$\Phi_{\text{ч}}(p, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathrm{cas}(m, i)\mathrm{cal}(p, i),$$

$$p = 0, 1, \ldots, \frac{N}{2} - 1;$$

$$\Phi_{\text{н}}(p, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathrm{cas}(m, i)\mathrm{sal}(p, i),$$

$$p = 1, 2, \ldots, \frac{N}{2}.$$

По этим формулам можно вычислить ядро Фурье для любых значений $N = 2^n$. Возможен и другой способ вычисления ядра Фурье—Хармута по известному ядру Фурье—Пэли путём перестановки строк в последнем по закону двоичного кода Грея. Оба способа приводят к одинаковому результату.

Для $N = 8$ матрица ядра Фурье—Хармута имеет следующий вид:

$$
\begin{array}{c}
 \\ X_{\text{Хч}}(0) \\ X_{\text{Хн}}(1) \\ X_{\text{Хч}}(1) \\ X_{\text{Хн}}(2) \\ X_{\text{Хч}}(2) \\ X_{\text{Хн}}(3) \\ X_{\text{Хч}}(3) \\ X_{\text{Хн}}(4)
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccc} X_{\text{Х}}(0) & X_{\text{Х}}(1) & X_{\text{Х}}(2) & X_{\text{Х}}(3) & X_{\text{Х}}(4) & X_{\text{Х}}(5) & X_{\text{Х}}(6) & X_{\text{Х}}(7) \end{array} \\
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \Phi(1,1) & 0 & \Phi(1,3) & 0 & \Phi(1,5) & 0 & \Phi(1,7) \\
0 & \Phi(2,1) & 0 & \Phi(2,3) & 0 & \Phi(2,5) & 0 & \Phi(2,7) \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & \Phi(5,1) & 0 & \Phi(5,3) & 0 & \Phi(5,5) & 0 & \Phi(5,7) \\
0 & \Phi(6,1) & 0 & \Phi(6,3) & 0 & \Phi(6,5) & 0 & \Phi(6,7) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\end{array},
$$

где

$$\Phi(1,1) = (2+\sqrt{2})/4; \quad \Phi(1,3) = \sqrt{2}/4;$$

$$\Phi(1,5) = (2-\sqrt{2})/4; \quad \Phi(1,7) = -\sqrt{2}/4;$$

$$\Phi(2,1) = \sqrt{2}/4; \quad \Phi(2,3) = (2-\sqrt{2})/4;$$

$$\Phi(2,5) = -\sqrt{2}/4; \quad \Phi(2,7) = (2+\sqrt{2})/4;$$

$$\Phi(5,1) = -\sqrt{2}/4; \quad \Phi(5,3) = (2+\sqrt{2})/4;$$

$$\Phi(5,5) = \sqrt{2}/4; \quad \Phi(5,7) = (2-\sqrt{2})/4;$$

$$\Phi(6,1) = (2-\sqrt{2})/4; \quad \Phi(6,3) = -\sqrt{2}/4;$$

$$\Phi(6,5) = (2+\sqrt{2})/4; \quad \Phi(6,7) = \sqrt{2}/4.$$

Таблица 5

Правило образования групп в базисе Хармута для $N = 8$

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Хармута	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_{\text{Хч}}(0)$	$X_{\text{Х}}(0)$
2	1	$X_{\text{Хн}}(2)$	$X_{\text{Х}}(2)$
3	1	$X_{\text{Хч}}(2)$	$X_{\text{Х}}(6)$
4	1	$X_{\text{Хн}}(4)$	$X_{\text{Х}}(4)$
5	4	$X_{\text{Хн}}(1)$, $X_{\text{Хч}}(1)$, $X_{\text{Хн}}(3)$, $X_{\text{Хч}}(3)$	$X_{\text{Х}}(1)$, $X_{\text{Х}}(3)$, $X_{\text{Х}}(5)$, $X_{\text{Х}}(7)$

Таблица 6

Правило образования групп в базисе Хармута в общем случае

Номер группы	Число коэффициентов в группе	Коэффициенты Хармута	Коэффициенты Хартли
1	1	$X_{\text{Хч}}(0)$	$X_{\text{Х}}(0)$
2	1	$X_{\text{Хн}}\left(\frac{N}{4}\right)$	$X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{4}\right)$
3	1	$X_{\text{Хч}}\left(\frac{N}{4}\right)$	$X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right)$
4	1	$X_{\text{Хн}}\left(\frac{N}{2}\right)$	$X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{2}\right)$
γ, $\gamma = 5, 6, \ldots, n+2$	$2^{\gamma-3}$	$X_{\text{Хн}}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)]$, $X_{\text{Хч}}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)]$, $j = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-4}-1$	$X_{\text{Х}}[2^{n+2-\gamma}(1+2m)]$, $m = 0, 1, \ldots, 2^{\gamma-3}-1$

Эта матрица имеет структуру, подобную структурам предыдущих матриц ядра, а наличие и расположение её нулевых элементов позволяет сформировать 5 независимых групп спектральных коэффициентов Хартли и Хармута по правилу, приведённому в табл. 5.

Обобщая полученные результаты, при $N = 2^n$ ($n = 1, 2, \ldots$) из спектральных коэффициентов Хартли и Хармута можно образовать $n + 2$ независимые группы по правилу, представленному в табл. 6.

Групповые и общие равенства Парсеваля имеют следующий вид:

$$X_{\text{Хч}}^2(0) = X_{\text{Х}}^2(0); X_{\text{Хн}}^2\left(\frac{N}{4}\right) = X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{4}\right);$$

$$X_{\text{Хч}}^2\left(\frac{N}{4}\right) = X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right); X_{\text{Хн}}^2\left(\frac{N}{2}\right) = X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{2}\right);$$

$$\sum_{j=0}^{2^{\gamma-4}-1}\{X_{\text{Хн}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] + X_{\text{Хч}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)]\} =$$

$$= \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{Х}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2m)],$$

$$\gamma = 5, 6, \ldots, n+2;$$

$$X_{\text{Хч}}^2(0) + X_{\text{Хн}}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{\text{Хч}}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{\text{Хн}}^2\left(\frac{N}{2}\right) +$$

$$+\sum_{\gamma=5}^{n+2}\sum_{j=0}^{2^{\gamma-4}-1}\{X_{\text{Хн}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] +$$

$$+X_{\text{Хч}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2j)]\} =$$

$$= X_{\text{Х}}^2(0) + X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{4}\right) + X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right) + X_{\text{Х}}^2\left(\frac{N}{2}\right) +$$

$$+\sum_{\gamma=5}^{n+2}\sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{Х}}^2[2^{n+2-\gamma}(1+2m)].$$

Их справедливость подтверждает правильность выполненных преобразований спектров Хартли и Хармута. Сами преобразования записываются следующими уравнениями, которые определяют алгоритм преобразования спектров Хартли в спектры Хармута:

$$\left.\begin{aligned}
&X_{\text{Хч}}(0) = X_{\text{Х}}(0); X_{\text{Хн}}\left(\frac{N}{4}\right) = X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{4}\right);\\
&X_{\text{Хч}}\left(\frac{N}{4}\right) = X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{2}+\frac{N}{4}\right);\\
&X_{\text{Хн}}\left(\frac{N}{2}\right) = X_{\text{Х}}\left(\frac{N}{2}\right);\\
&X_{\text{Хн}}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] =\\
&= \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{Х}}(2^{n+2-\gamma}(1+2m))\times\\
&\times \Phi[2^{n+2-\gamma}(1+2j), 2^{n+2-\gamma}(1+2m)];\\
&X_{\text{Хч}}[2^{n+2-\gamma}(1+2j)] =\\
&= \sum_{m=0}^{2^{\gamma-3}-1} X_{\text{Х}}(2^{n+2-\gamma}(1+2m))\times\\
&\times \Phi[2^{n+2-\gamma}(1+2j), 2^{n+2-\gamma}(1+2m)],\\
&\gamma = 5,6,\ldots,n+2; j = 0,1,\ldots,2^{\gamma-4}-1.
\end{aligned}\right\} \quad (24)$$

Структура ядер Фурье в алгоритмах преобразования спектров Хартли и Уолша может быть наглядно отражена с помощью геометрического представления сигналов в функциональном дискретном пространстве l_N^2 [8, 9]. В таком пространстве каждой системе ортогональных базисных функций соответствует своя декартова система координат. Системы координат Уолша развернуты в пространстве относительно системы Хартли так, что многие оси одной системы становятся ортогональными осям другой системы. Им соответствуют нулевые значения элементов матриц ядра. Неортогональными будут только те оси, номера которых принадлежат к одной из независимых групп. Им соответствуют ненулевые значения элементов матриц ядра. Кроме того, у этих систем есть по четыре совпадающие оси: им соответствуют одинаковые базисные функции и, как следствие, единичные значения элементов матриц ядра Фурье.

Вычислительная сложность алгоритмов преобразования спектров. Алгоритмы преобразования спектров в базисах Адамара, Пэли и Хармута по форме аналитической записи несколько отличаются друг от друга, но по числу вычислительных операций они равноценны. Поэтому оценку вычислительной сложности достаточно выполнить для одного из них. Сделаем это для базиса Адамара — см. уравнения (22).

В соответствии с этими уравнениями при вычислении коэффициентов Адамара первой, второй, третьей и четвёртой групп операции не выполняются. При вычислении коэффициентов остальных $n - 2$ групп будут выполняться операции умножения и сложения. Считая, что элементы ядра Фурье—Адамара вычислены заранее, расчёт коэффициентов Адамара для группы с номером γ, число которых равно $2^{\gamma-3}$, потребует выполнения $2^{\gamma-3}2^{\gamma-3} = 2^{2\gamma-6}$ умножений и $2^{\gamma-3}(2^{\gamma-3}-1)$ сложений. Так как номера групп лежат в пределах от 5 до $n + 2$, то общее число операций при реализации алгоритмов преобразования спектров будет содержать

$$\sum_{\gamma=5}^{n+2} 2^{2\gamma-6} = \frac{N^2-16}{3}$$

умножений и

$$\sum_{\gamma=5}^{n+2} 2^{\gamma-3}(2^{\gamma-3}-1) = \frac{N^2-3N-4}{3}$$

сложений. По сравнению с прямым методом вычисления спектров Уолша по спектру Хартли организация вычислительного процесса с использованием полученных алгоритмов позволяет сократить число операций умножения и сложения более чем в 3 раза. Вычислительная экономичность предложенных алгоритмов делает целесообразным их использование на практике при обработке сигналов, особенно в режиме реального времени.

Заключение. Таким образом, решена научно-прикладная задача преобразования спектра дискретного сигнала в базисе Хартли в его спектры базисов Уолша с различным порядком следования базисных функций. В основу её решения положены новые операторы преобразования спектров, использующие особенности структуры их ядер Фурье, содержащих нулевые и ненулевые элементы. Анализ расположения нулевых элементов позволил сформулировать оригинальные правила распределения спектров Хартли и Уолша по независимым группам, которые в итоге привели к эффективным алгоритмам преобразования спектров.

Дальнейшее развитие представленного подхода авторы видят в его использовании в задачах преобразования спектров обобщённых базисов Хартли в одноосновных системах счисления, поскольку классические системы Хартли и системы Уолша являются частным случаем обобщённых базисов [16]. Разработку эффективных алгоритмов преобразования обобщённых спектров Хартли авторы ставят задачей своих последующих исследований.

Работа выполнена в рамках проекта 2.7782.2017/БЧ «Методы имитации детерминированных и случайных одномерных и много-

мерных сигналов в научных задачах моделирования информационно-управляющих систем реального времени», осуществляемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические ссылки

1. **Цифровая** обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2007. 544 с.

2. **Ifeachor E.C., Jervis B.W.** Digital Signal Processing. A Practical Approach. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2002. 992 p.

3. **Романовский А.С.** и др. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 1—13.

4. **Romanovsky A.S.** and all. Spaceborne Infra-red Fourier-Transform Spectrometers for Temperature and Humidity Sounding of the Earth's Atmosphere // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50. № 9.

5. **Залманзон Л.А.** Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.

6. **Oppenheim A.V., Schafer R.W.** Discrete-Time Signal Processing. Third Edition. Person: Prentice Hall, 2010. 1137 p.

7. **Обработка** изображений в авиационных системах технического зрения / Под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. М.: Физматлит, 2016. 240 с.

8. **Трахтман А.М.** Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Сов. радио, 1972. 352 с.

9. **Сюзев В.В.** Основы теории цифровой обработки сигналов. М.: Изд-во «РТ Софт», 2014. 752 с.

10. **Трахтман А.М., Трахтман В.А.** Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. М.: Сов. радио, 1975. 208 с.

11. **Садыхов Р.Х., Чеголин П.М., Шмерко В.П.** Методы и средства обработки сигналов в дискретных базисах. Минск: Наука и техника, 1987. 296 с.

12. **Сюзев В.В., Гуренко В.В., Кучеров К.В., Парфенюк Е.В.** Операторы преобразования спектров в базисах Фурье и Уолша // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 2. С. 138—156. DOI: 10.7463/0217.0000939.

13. **Ахмед Н., Рао К.Р.** Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: пер. с англ. М.: Связь, 1980, 248 с.

14. **Хармут Х.** Теория секвентного анализа. Основы и применения: пер. с англ. М.: Мир, 1980. 574 с.

15. **Bracewell R.** The Hartley Transform. New York: Clarendon Press, 1986. 175 p.

16. **Сюзев В.В.** Обобщенные функции и преобразования Хартли в системах счисления с постоянным основанием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2014. № 2. С. 60—79.

Ссылка для цитирования

Пролетарский А.В., Сюзев В.В., Гуренко В.В., Бычков Б.И. Алгоритмы преобразования спектров в базисах Хартли и Уолша // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 453—461.

УДК 519.711.2

Г.С. Иванова, д-р техн. наук, проф., **А.А. Головков, Д.С. Олейник**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

gsivanova@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕЗКОСТИ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрена задача увеличения резкости изображения с помощью свёрточных нейронных сетей: выполнен анализ существующих методов увеличения резкости, выявлены их преимущества и недостатки, сформированы требования к набору данных для обучения модели нейронной сети, проведён анализ характеристик резкости изображений, выбраны методы программного формирования размытия и шума. В результате разработана методика формирования данных для обучения модели, на основе которой подготовлен тренировочный набор данных для обучения свёрточной нейронной сети.

Ключевые слова: обработка изображения; размытие изображения; оценка размытия изображения; повышение резкости изображений; машинное обучение; обучающая выборка.

The problem of picture sharpness with the help of convolutional neural networks is considered. The analysis of the sharpening existing methods is performed. The methods advantages and disadvantages are revealed. The requirements to the data set for learning the neural network model are formed. The image sharpness characteristics are analyzed. The software forming methods of the blurring and noise are selected. As a result, a methodology for generating data for the training of the model is developed, on the basis of which a training data set for training the convolutional neural network is prepared.

Keywords: image processing; blur the image; blur image estimation; sharpening images; machine learning; training sample.

Введение. В настоящее время распознавание, классификация и детектирование объектов по их фотографическим изображениям вызывает большой практический интерес в различных областях. Решение перечисленных задач интересует исследователей в сферах биологии, медицины, космоса и др. Программные и аппаратные системы анализа изображений также успешно применяются в полиции, охранных учреждениях и военной промышленности. Используемые в таких системах фотографии зачастую имеют различные дефекты, полученные в процессе фотосъёмки вследствие движения объекта и фотоаппарата относительно друг друга или неточной фокусировки, что существенно снижает качество решения указанных задач. Использование профессионального программного обеспечения (Adobe Photoshop, Corel Paint Shop Pro, GIMP) для улучшения качества изображений требует существенного времени, определённых навыков и опыта, что сокращает область их возможного применения, особенно при распознавании, классификации и детектировании в режиме реального времени.

В последнее время задача улучшения качества фотографий решается исследователями с помощью специально обученных нейронных сетей. Преимущество методов машинного обучения состоит в том, что они ориентированы на автоматическую обработку изображений, что исключает ручное редактирование и позволяет использовать их в том числе и в системах реального времени.

Цифровое изображение обычно представляется в виде функции $F(x, y)$ в дискретном двумерном пространстве точек (пикселей), где x — номер строки, а y — номер столбца, определяющие местоположение точки. Интенсивность или яркость изображения задаётся функцией $I(x, y)$, где I — интенсивность (яркость) пикселя с координатами (x, y). Интенсивность может описываться вещественным (от 0 до 1) или целым (от 0 до 255) числом. Количество цветов или глубина цвета — это количество бит, необходимое для хранения цвета, кратное степени 2. Изображение, для хранения информации о цветах которого необходим 1 бит, называется бинарным. Для хранения полутоновых (gray scale, gray level) изображений обычно используется 8 бит. Цветные изображения хранятся с использованием 24 бит, по 8 на каждый из трёх цветовых каналов.

Математическое выражение, описывающее преобразование неискажённого изображения $F(x, y)$ из-за дефокусировки или движения во время съёмки, можно записать в виде свёртки [1, 13]:

$$G(x, y) = F(x, y)*H(x, y),$$

где x, y — координаты изображения; $G(x, y)$ — искажённое изображение; $F(x, y)$ — неискажённое изображение; $H(x, y)$ — искажающее ядро; $F(x, y)*H(x, y)$ — операция свёртки.

В размытом изображении контраст между пикселями, как правило, меньше, чем в резком. В этом случае границы между фрагментами изображения сильно смягчаются. Если считать, что границы объектов на неискажённом изображении $F(x, y)$ представляют собой области, в пределах которых функция яркости $I(x, y)$ изменяется скачком, то выполнение операции свёртки этой функции с искажающим ядром приводит к размытию границ объектов и появлению так называемых «транзитных зон», в пределах которых яркость изменяется плавно. При этом контраст мелких деталей уменьшается, а некоторые из них могут вообще отсутствовать. Зрительное восприятие размытых изображений в целом затрудняется, а их информационная наполненность существенно снижается [1].

Существует несколько видов размытия:

gaussian blur (размытие по Гауссу) — часто применяется к уже отснятым фотографиям при их первичной обработке для уменьшения шума, но при этом падает уровень резкости, что может в дальнейшем оказаться нежелательным;

out-of-focus blur (фокусное размытие) — размытость из-за неточной наводки фокусного расстояния;

motion blur (размытие движения) — смазанность, возникающая из-за движения объекта во время съёмки;

комбинация перечисленных выше видов размытия.

Методы машинного обучения позволяют устранить размытие и существенно увеличить резкость изображения. В данной работе для решения этой задачи предлагается использование свёрточных нейронных сетей, которые показали довольно хороший результат при обработке изображений [8...12].

Анализ существующих методов увеличения резкости изображений. Существуют два основных подхода к решению задачи повышения резкости цифровых изображений, подвергшихся воздействию ядра размытия $H(x, y)$ [1].

Первый подход заключается в модификации яркости пикселей изображения в пределах транзитной зоны при сохранении её ширины. Применение данного подхода улучшает зрительное восприятие подвергшегося обработке изображения, однако создаётся только иллюзия повышения резкости за счёт появления инвертированных областей яркости на противоположных сторонах границ перепадов яркости на изображении.

Среди наиболее часто используемых можно выделить метод нерезкого маскирования [4...6], который состоит из следующих шагов: создание нерезкого изображения, вычитание нерезкого изображения из исходного изображения (результирующая разность называется маской), прибавление маски к исходному изображению. Этот простой способ является наиболее распространённым, однако ряд его существенных недостатков, например, отсутствие требований к параметрам преобразования, приводит к нежелательным результатам в виде модификации локальных контрастов и появлению артефактов (изменение цвета, усиление зерна и шума, проявление нежелательных деталей).

Второй подход для восстановления размытых изображений состоит в поиске функции профиля распределения яркости, наиболее близкой к профилю яркости неискажённого изображения. Реализация данного подхода позволяет добиться уменьшения ширины транзитной зоны [1]. Математически это означает выполнение операции обратной свёртки (деконволюции), для осуществления которой необходимо определить ядро размытия $H(x, y)$. В некоторых случаях априорная информация о характеристиках ядра, даже приблизительная, существенно упрощает процедуру восстановления изображения благодаря хорошо разработанному математическому аппарату, который позволяет выполнить процедуру деконволюции достаточно эффективно. В случаях когда априорная информация об ядре размытия $H(x, y)$ полностью отсутствует, задача качественного восстановления изображения («слепая» деконволюция) существенно усложняется, так как в этом случае результат сильно зависит от начальных условий длительного итерационного процесса предсказания-коррекции при поиске неизвестного ядра. Также стремительно возрастает общая трудоёмкость вычислений. При этом нет никаких гарантий того, что итерационный процесс восстановления изображения сойдётся к истинному значению распределения яркости неискажённого изображения.

Таким образом, поиск новых способов эффективного восстановления качества искажённых изображений продолжает оставаться весьма актуальной задачей. Она может быть решена с использованием глубоких нейронных сетей, демонстрирующих качество получаемых результатов, существенно превосходящее остальные алгоритмы машинного обучения. Однако для его достижения необходимо использовать обучающее множество очень большого размера — до нескольких миллионов изображений, а также специальные методы расширения и имитации расширения обучающего множества [3], при этом этап обучения требует большого объёма вычислительных ресурсов и может занимать недели и месяцы на многопроцессорном кластере.

Эффективное решение задачи увеличения резкости размытых цифровых изображений с помощью свёрточных нейронных сетей должно обеспечивать высокую производительность и точное восстановление смазанных изображений без появления различных артефактов. Формирование обучающих данных здесь имеет принципиально важное значение. Ошибки создания набора данных могут оказываться критичными и способны свести на нет эффективность самих алгоритмов обучения. Среди специалистов по машинному обучению общепризнанным считается, что наличие хорошего датасета гораздо важнее качества алгоритма обучения [3].

Подготовка набора обучающих данных. Для качественного обучения свёрточной нейронной сети необходим набор данных, содержащий разнообразные размытые и соответствующие им резкие изображения. Однако вручную получить требуемое количество пар резких и размытых изображений не представляется возможным, поэтому в работе предложено получать размытые фотографии из резких программным способом. При этом для улучшения качества обучения необходимо, чтобы искусственное размытие было максимально приближено к реальному, и в наборе в равных долях встречались изображения с размытием движения, фокусным размытием и их комбинацией.

Подготовка обучающего набора изображений включает:

выбор подхода, метода и разработку методики оценки реального размытия;

выбор методов и подбор параметров программных размытий для получения требуемых характеристик размытых изображений;

поиск базы данных резких изображений для программного размытия;

генерацию обучающего набора размытых изображений.

Выбор метода программного размытия и оценки резкости изображения. Для разработки алгоритма программного размытия необходимо оценить реальное размытие фотографий для каждого типа. Существуют два подхода к оценке резкости изображений [2]:

количественная оценка путём использования математических методов: среднеквадратическая ошибка, Lp-норма, меры, учитывающие особенности восприятия изображения зрительной системой человека [2];

субъективная экспертная оценка.

Результаты оценки в первом и втором случае могут существенно отличаться.

Рассмотрим первый подход. Для оценки размытия целесообразно конвертировать цветные изображения в ахроматические и исследовать прямоугольную матрицу значений яркости пикселей изображения. Размер такой матрицы может совпадать с размерами изображения в пикселях либо соответствовать размерам выделенной области изображения [18]. Различают следующие методы оценки размытия изображения [19]:

GRA — на основе оценки градиента, где градиент изображения (первая производная) сигнализирует о наличии границ объектов, присутствующих на изображении;

LAP — на основе оценки лапласиана, где лапласиан (вторая производная) служит для определения количества резких границ на изображении;

WAV — на базе вейвлет-преобразований, где изменение коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования используется для описания частотной и пространственной областей изображения;

STA — на основе статистических характеристик изображения, оценивающих размытость как отклонение от нормального распределения;

DCT — на основе дискретных косинусных преобразований, где коэффициенты дискретного косинусного преобразования служат оценкой фокуса изображения в частотной области;

MIS — на основе комплексной оценки.

Перечисленные методы отличаются сложностью и временем обработки изображений. В данной работе был выбран наиболее производительный метод, в основе которого лежит поиск границ (контуров) объектов изображения с помощью оператора Лапласа [14...16].

Для количественной оценки размытия изображения воспользуемся мерой в виде среднего арифметического σ_{mean} и среднеквадратичного отклонения σ_{std} значений интенсивности пикселей изображения:

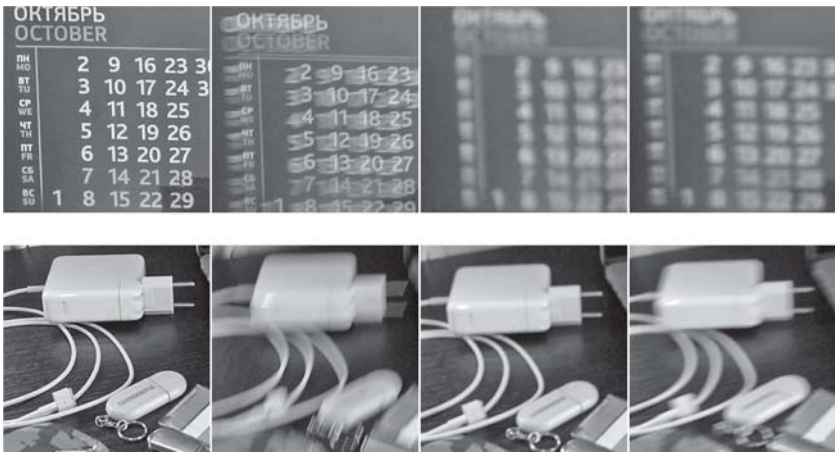
$$\sigma_{mean} = \frac{\sum_M \sum_N f(x,y)}{MN};$$

$$\sigma_{std} = \sqrt{\frac{\sum_M \sum_N [f(x,y) - \overline{f}(x,y)]^2}{MN}},$$

где N, M — размеры изображений по вертикали и горизонтали, пикс.

Для оценки реального размытия и его дальнейшего воспроизведения на большей выборке изображений вручную сделаны 50 контрольных фотографий в виде наборов, представленных на рис. 1, которые содержат: резкое изображение без искажений; изображение, содержащее имитацию размытия при движении; изображение, содержащее имитацию размытия при неточной фокусировке; изображение, содержащее размытие как при движении, так и при неточной фокусировке.

В процессе реализации описанного подхода оценки резкости изображения было выявлено активное влияние шумов при поиске (выделении) контуров. Наличие шума приводило к обнаружению ложных контуров, что



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 1. Примеры размытых фотоизображений, полученных вручную: *а* — резкое изображение; *б* — размытие движения; *в* — фокусное размытие; *г* — комбинированное размытие

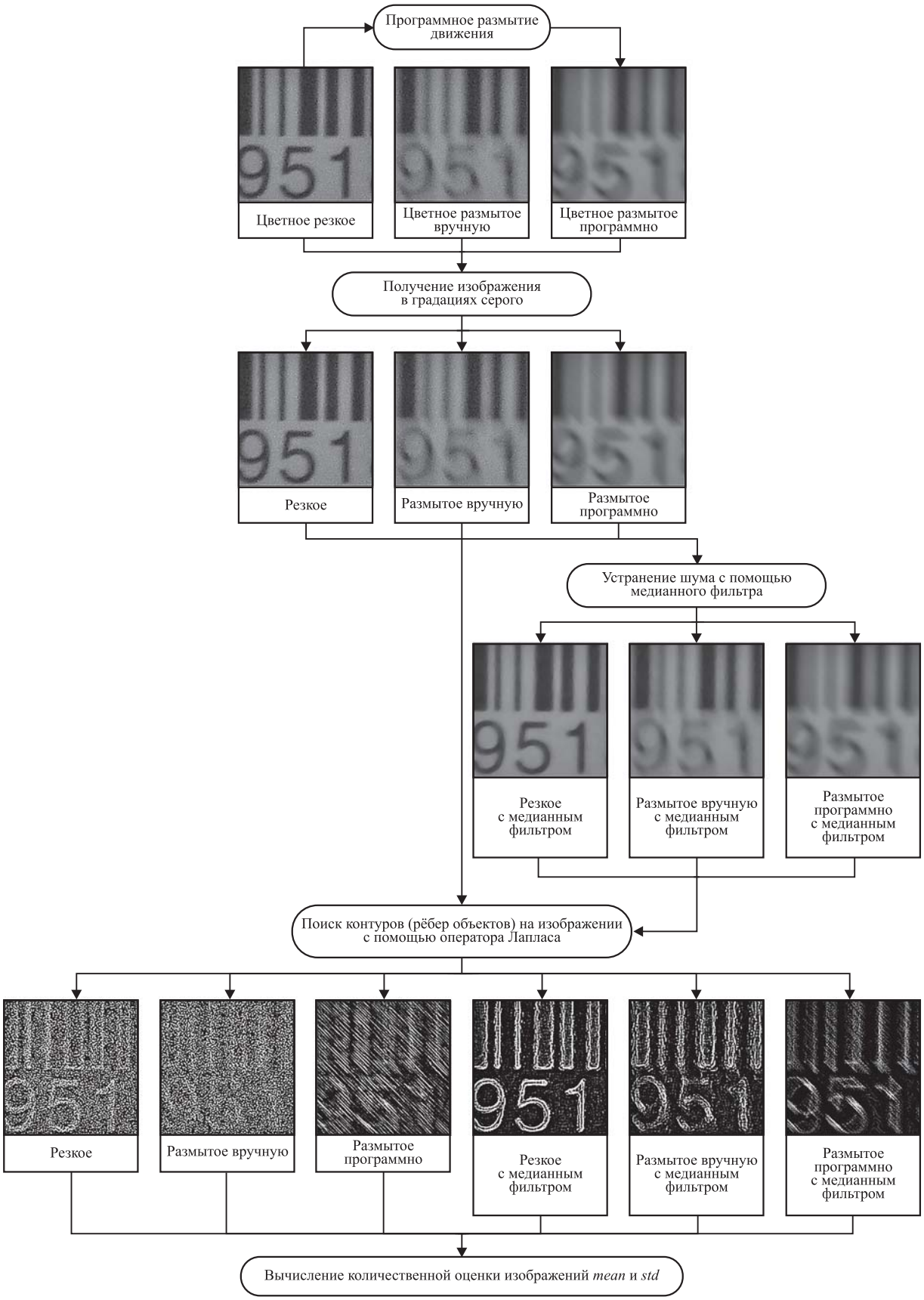


Рис. 2. Метод оценки резкости с использованием медианного фильтра

значительно сказывалось на количественной оценке резкости: значение для резкого изображения было очень близко к значению оценки для изображения, размытого вручную, при этом оценка программно размытой фотографии существенно отличалась от двух предыдущих. Поскольку главным критерием для подбора параметров метода программного размытия является равенство оценок резкости результирующих программно размытых изображений и вручную размытых изображений, было принято решение предварительно обрабатывать все изображения медианным фильтром [14...16], который заменяет значение каждого пикселя на значение медианы распределения яркостей всех пикселей в окрестности, включая исходный. Такой подход существенно увеличил точность оценки. Медианные фильтры весьма популярны: для определённых типов случайных шумов они демонстрируют отличные возможности подавления шума при значительно меньшем эффекте расфокусировки, чем у линейных сглаживающих фильтров с аналогичными размерами [4].

Таблица 1

Результат количественной оценки резкости изображения

Изображение	Среднеквадратичное отклонение яркости	Среднее значение яркости
Резкое	93,7	69,7
Размытое вручную	91,4	67,1
Размытое программно	29,8	19,4
Резкое с медианным фильтром	36,0	16,0
Размытое вручную с медианным фильтром	20,3	10,8
Размытое программно с медианным фильтром	10,3	5,8

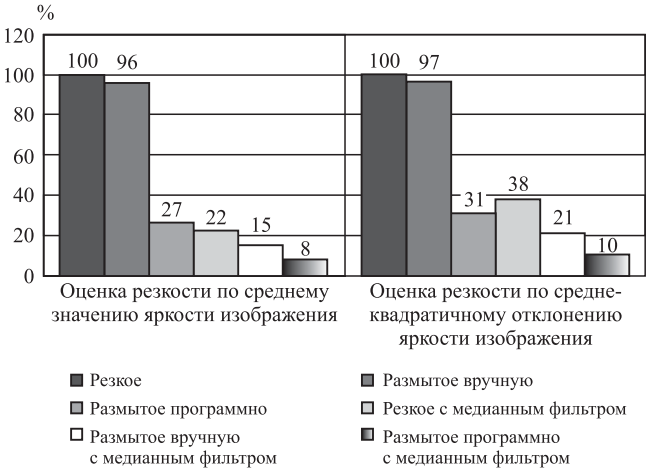


Рис. 3. Сравнение оценок резкости при использовании медианного фильтра

Общий метод оценки резкости и визуальная разница при применении медианного фильтра на примере размытия движения представлены на рис. 2.

Результаты количественной оценки при применении медианного фильтра представлены в табл. 1. Сравнение результатов в процентном соотношении изображено на рис. 3.

Оценки резкости программно и вручную размытых изображений с использованием медианного фильтра отличаются примерно в 2 раза, без его использования — в 3 раза. Полученные результаты позволяют утверждать, что применение медианного фильтра даёт более правдоподобную оценку резкости.

Подбор параметров программного размытия. Определим вид ядер свёртки для соответствующего типа размытия. Для фокусного размытия будем использовать размытие по Гауссу. Ядро свёртки в данном случае имеет два измерения и рассчитывается по формуле $G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$. Пример аппроксимированного ядра фокусного размытия размером 3×3:

$$\frac{1}{16}\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ядро размытия движения усредняет значения пикселей в определённом направлении и представляет собой единичную матрицу, разделённую на количество единичных элементов. Горизонтальное и вертикальное ядра размытия движения 3×3 будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Диагональные ядра размытия движения размером $n \times n$ (n — ранг матрицы):

$$\frac{1}{n}\begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \cdots & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}; \quad \frac{1}{n}\begin{bmatrix} 0 & & 1 \\ & \cdots & \\ 1 & & 0 \end{bmatrix}.$$

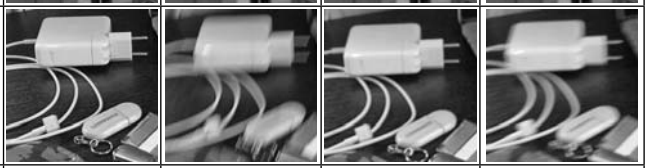
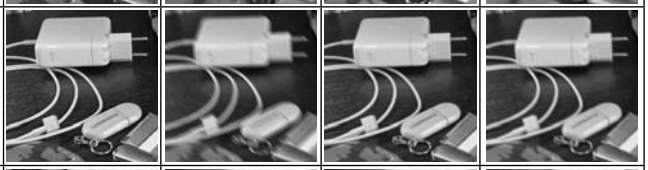
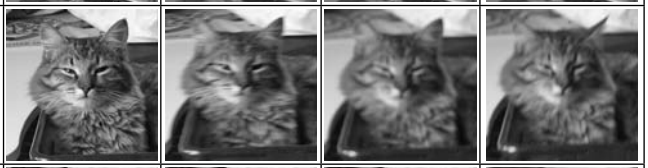
Таблица 2

Размеры ядер свёртки для размытия изображений

Тип размытия	Размер ядра свёртки, пикс.	
	Минимальный	Максимальный
Размытие движения	13	63
Фокусное размытие	19	67
Комбинированное	11	35

Таблица 3

Сравнение ручного и программного методов

№ п/п	Метод формирования размытия	Изображение			
		Резкое	Размытие движения	Фокусное размытие	Комбинированное размытие
1	Ручное размытие				
	Программное размытие				
2	Ручное размытие				
	Программное размытие				
3	Ручное размытие				
	Программное размытие				

а) *б)*

Рис. 4. Пример нерезких изображений ImageNet:
а — изображения с низким разрешением; *б* — увеличенное размытое изображение

Определим размеры ядер свёртки [4, 20] для каждого типа размытия изображений. Размеры ядер рассчитываются отдельно по каждому изображению путём итерационного применения ядер, сравнения оценок резкости, увеличения размера ядер. Подбор размеров ядер свёртки происходит до тех пор, пока оценки резкости вручную размытой фотографии и размытой программно не будут совпадать.

В качестве количественной оценки в процессе подбора была выбрана оценка σ_{std}, поскольку в отличие от σ_{mean} характеристика учитывает расположение границ на изображении. Минимальные и максимальные значения подобранных размеров ядер свёртки представлены в табл. 2 (анализировались 50 контрольных фотографий с разрешением 4320×3240 пикс.).

Сравнение фотографий, полученных ручным и программным размытием, представлено в табл. 3.

Методика отбора фотографий. В качестве исходного набора резких изображений была использована база изображений ImageNet [7], на основе которой создан набор размытых изображений для обучения нейронной сети. Поскольку ImageNet преимущественно ориентирована на решение задач детектирования и классификации, в ней встречаются сильно размытые фотографии, а также изображения довольно низкого разрешения (рис. 4).

Для создания репрезентативного датасета необходимо отфильтровать такие фотографии. Однако существует проблема оценки резкости изображений разного разрешения: результаты оценки одного изображения в разном разрешении могут быть различны. Стоит отметить, что низкая оценка свидетельствует также об однотонности изображения и отсутствии контрастных объектов. Такие изображения также следует исключить, поскольку они содержат мало информации о резкости изображения.

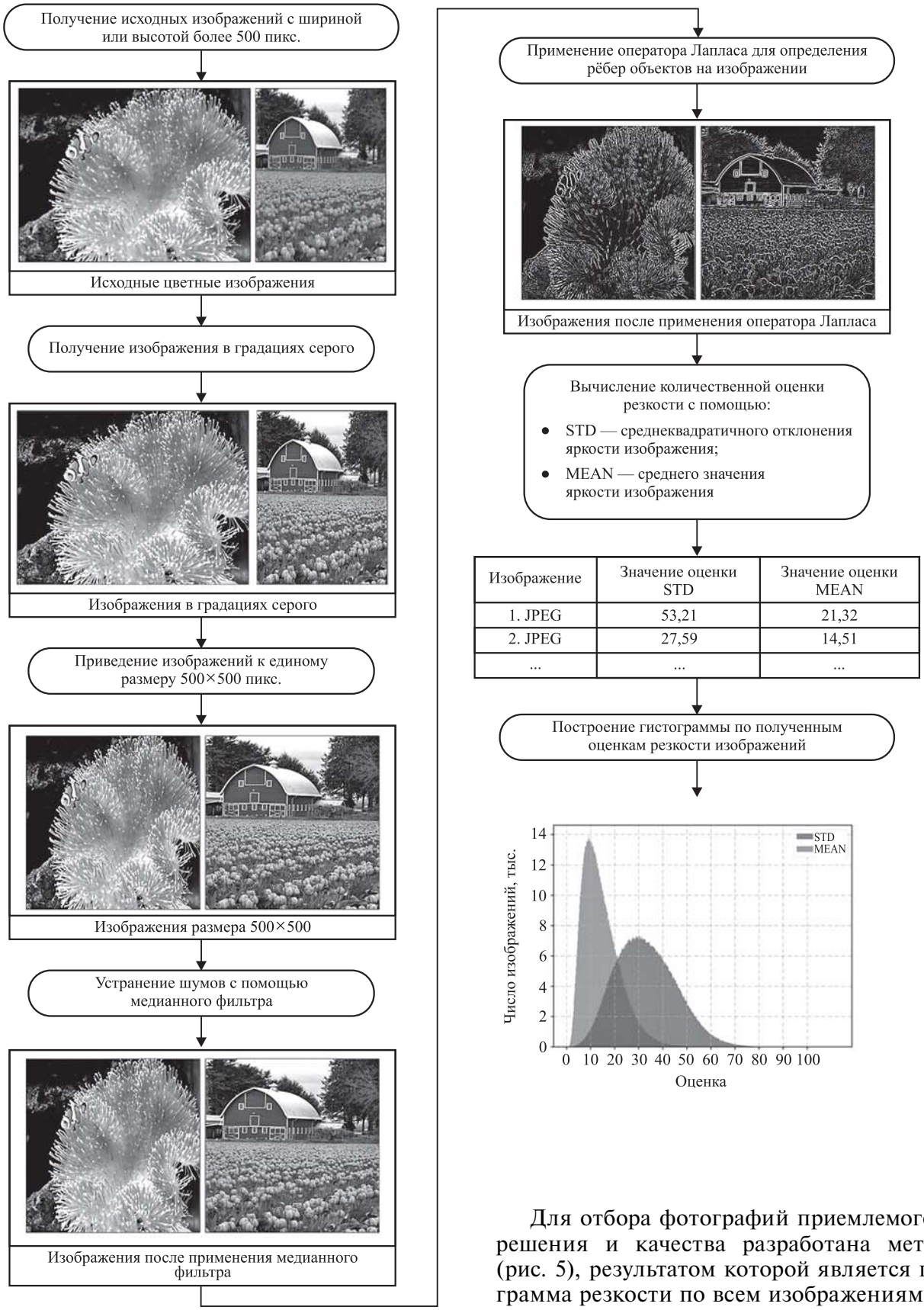


Рис. 5. Методика отбора изображений ImageNet

Для отбора фотографий приемлемого разрешения и качества разработана методика (рис. 5), результатом которой является гистограмма резкости по всем изображениям.

Гистограммы изображений для обучения, валидации и проверки представлены на рис. 6—8 соответственно. Гистограммы полу-

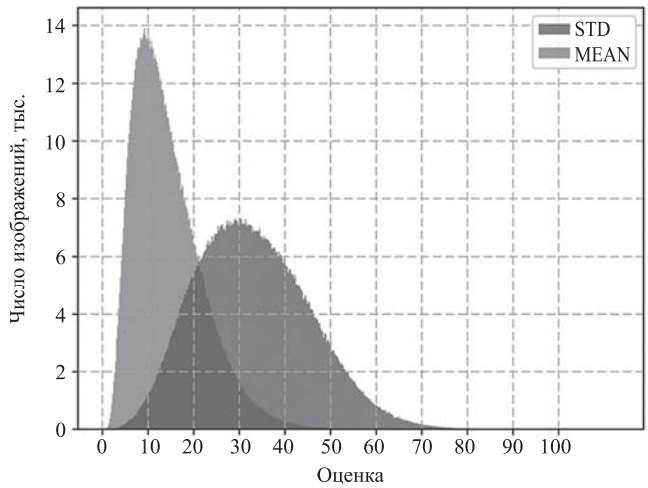


Рис. 6. Гистограмма резкости обучающего набора изображений

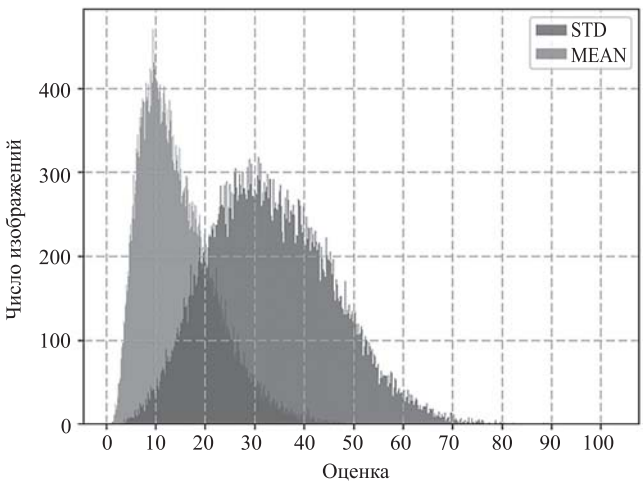


Рис. 7. Гистограмма резкости валидационного набора изображений

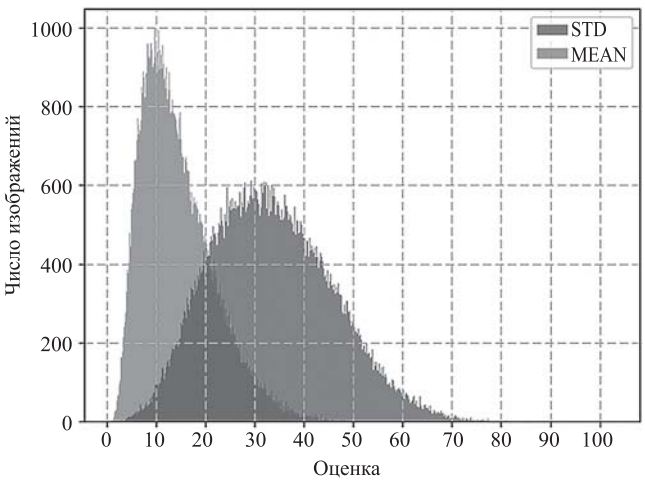


Рис. 8. Гистограмма резкости тестового набора изображений

Таблица 4

Пороговые значения оценок для отбора резких изображений по гистограмме

Оценка		Набор изображений		
		Обучающий	Валидационный	Тестовый
μ	по STD	33,07	33,46	33,51
	по MEAN	14,35	14,48	14,50
σ	по STD	12,51	12,55	12,47
	по MEAN	7,65	7,66	7,61
(μ + σ)	по STD	45,58	46,01	45,98
	по MEAN	22	22,14	22,11

Таблица 5

Количество изображений до и после отбора

Количество изображений	Набор изображений		
	Обучающий	Валидационный	Тестовый
Общее количество изображений	1 281 167	50 000	100 000
Изображения с шириной или высотой более 500 пикс.	1 058 245	46 769	93 578
Результирующее количество резких изображений	133 527	5 936	11 853

чены путём анализа соответствующих наборов данных ImageNet.

Итоговые датасеты для обучения модели должны содержать резкие изображения со значениями оценок больше (μ + σ) по каждому из распределений оценок (STD и MEAN) одновременно, где μ — математическое ожидание (среднее значение), σ — среднеквадратичное отклонение распределения. Полученные значения для расчёта значений оценок и отбора итоговых изображений представлены в табл. 4.

Результаты отбора резких изображений представлены в табл. 5.

Формирование шума. При программном размытии происходит частичное удаление шумов, содержащихся в резком изображении. Желательно, чтобы шумность резкой фотографии была меньше шумности размытой фотографии. Для очистки шумов обыч-

но используются различные методы сглаживания — медианная фильтрация, скользящее среднее, свёртка с функцией Гаусса, Фурье-фильтрация и др. [4]. Однако их использование приводит к размытию границ, устранению мелких деталей изображения и потере детализации. В случае применения медианного фильтра наименьшего размера происходит видимое размытие. Методы обработки, основанные на использовании нелокального усреднения (non-local means) [21], показывают неплохой результат при устранении шума, но его уменьшение происходит не всегда в корректных местах, что требует ручной корректировки параметров.

Исходя из недостатков существующих методов было предложено:

оригинальное фото принять за резкое без устранения шумов;

к размытому изображению добавлять случайный шум.

Рассмотрим основные параметры шума и предложим методику его формирования для дальнейшего добавления на изображения, размытые программным способом.

Шум на изображении может варьироваться по двум основным параметрам:

частоте — низкочастотный/высокочастотный шум;

амплитуде — низкоамплитудный/высокоамплитудный шум.

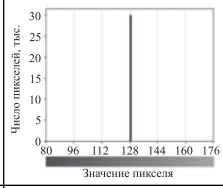
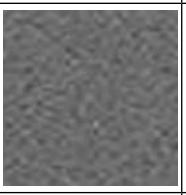
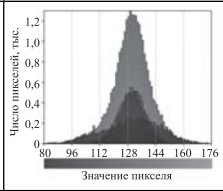
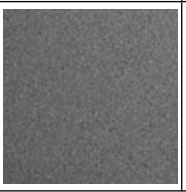
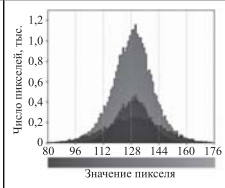
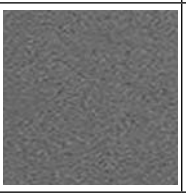
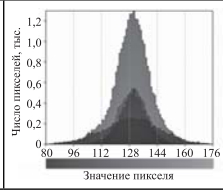
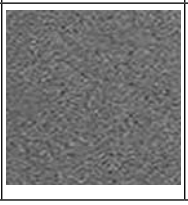
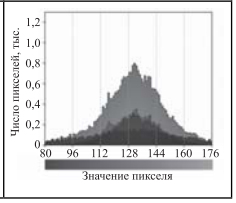
Амплитуда шума обычно описывается статистическим термином — среднеквадратичным отклонением (СКО), которое отражает отклонение значения пикселя от «истинного». Вид и основные характеристики нейтрально серого образца показаны на образце 1 табл. 6. При отсутствии шума все пиксели изображения отображаются на гистограмме одной линией (медианой) и имеют значение RGB (128, 128, 128).

Образцы 2 и 3 (см. табл. 6) демонстрируют, как пространственная частота меняет вид шума на исходно нейтральном сером образце с приблизительно одинаковым СКО. Если сравнивать образцы только по амплитуде шума, можно сказать, что на образце 2 больше шума. Однако визуально образец 2 выглядит значительно менее шумным, чем образец 3. Причиной этого является исключительно пространственная частота шума [22].

Образцы 4 и 5 (см. табл. 6) показывают два примера с различным СКО шума при одинаковой пространственной частоте. Можно заметить, что образец 4 кажется намного более гладким, чем образец 5. При высоком значении СКО амплитуды шум может перекрыть такие мягкие текстуры, как ткань или листва, поэтому его удаление зачастую производится после предварительного размытия изображения.

Таблица 6

Сравнение характеристик шума

№ п/п	Описание	Изображение	Гистограмма
1	Нейтральное серое изображение без шума, СКО = 0		
2	Низкочастотный шум (грубая текстура), СКО = 11,7		
3	Высокочастотный шум (тонкая текстура), СКО = 12,5		
4	Низкоамплитудный шум (мягкая текстура), СКО = 11,7		
5	Высокоамплитудный шум (жёсткая текстура), СКО = 20,8		

Исходя из анализа гистограмм RGB можно сделать вывод, что по мере увеличения шума увеличивается ширина гистограммы. Также видно, что часть пикселей после наложения шума была осветлена, а часть — затемнена, что достигается увеличением и уменьшением значений яркости RGB-каналов. Таким образом необходимо составить 2 матрицы шума. Первая будет попискельно складываться с матрицей исходного изображения, в результате чего получится изображение с осветлёнными пикселями. Вторая матрица будет вычитаться из матрицы исходного изображения, что в результате даст изображение с затемнёнными пикселями.

а) *б)* *в)*

Рис. 9. Пример программного добавления шума:
а — программно размытое фото без добавления шума; *б* — программно размытое фото после добавления шума; *в* — фотография с размытием, полученным вручную

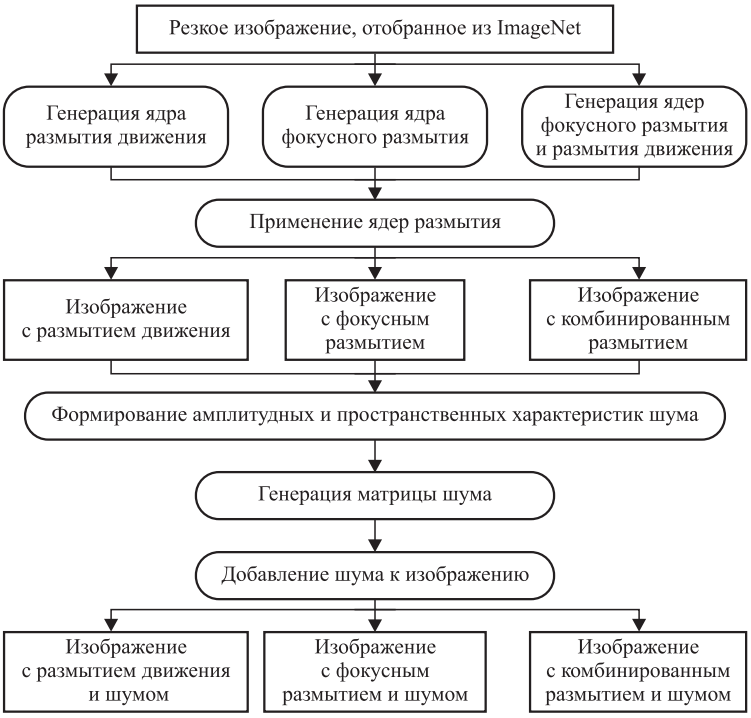


Рис. 10. Методика генерации обучающего набора изображений

Итоговый метод формирования шума заключается:

а) в формировании матрицы шума путём изменения амплитудной характеристики:

генерация случайного начального значения СКО: $\sigma_0 \in [1, 6]$;

корректировка полученного значения σ_0 путём добавления случайного значения сдвига для каждого канала RGB: $\sigma_r, \sigma_g, \sigma_b \in [0, 6]$;

заполнение матрицы шума нормально распределёнными случайными числами по каждому каналу RGB в соответствии со значением $\sigma = \{\sigma_0 + \sigma_r, \sigma_0 + \sigma_g, \sigma_0 + \sigma_b\}$;

б) изменении пространственной частоты полученной матрицы шума:

изменение разрешения шума в соответствии со случайным коэффициентом масштабирования $k \in [0, 75, 1)$;

восстановление исходного разрешения для сжатого ранее изображения [17].

Параметры начального значения СКО и сдвига для каждого канала были выбраны на основе экспертной оценки шума на наборе размытых контрольных фотографий, сделанных вручную. Примеры применения шума к изображению и сравнения с изображением, содержащим шум при фотосъёмке, представлены на рис. 9.

Генерация обучающего набора размытых изображений. Общая методика генерации обучающего набора изображений представлена на рис. 10. Итоговые датасеты содержат следующее количество фотографий: 133 527 — для обучения; 5936 — для валидации; 11 853 — для тестирования.

Каждый набор включает в себя 4 типа изображения: резкие и размытые фотографии, содержащие размытие движения, фокусное и комбинированное размытие. На каждую размытую фотографию наложен шум, полученный по предложенной методике. Пример изображений показан на рис. 11.

Заключение. Проведён анализ существующих методов увеличения резкости изображений, выявлены их преимущества и недостатки. Определён перспективный подход к решению задачи увеличения резкости — применение методов машинного обучения, в частности свёрточных нейронных сетей. Такой подход может дать существенное увеличение качества решения задачи, однако для

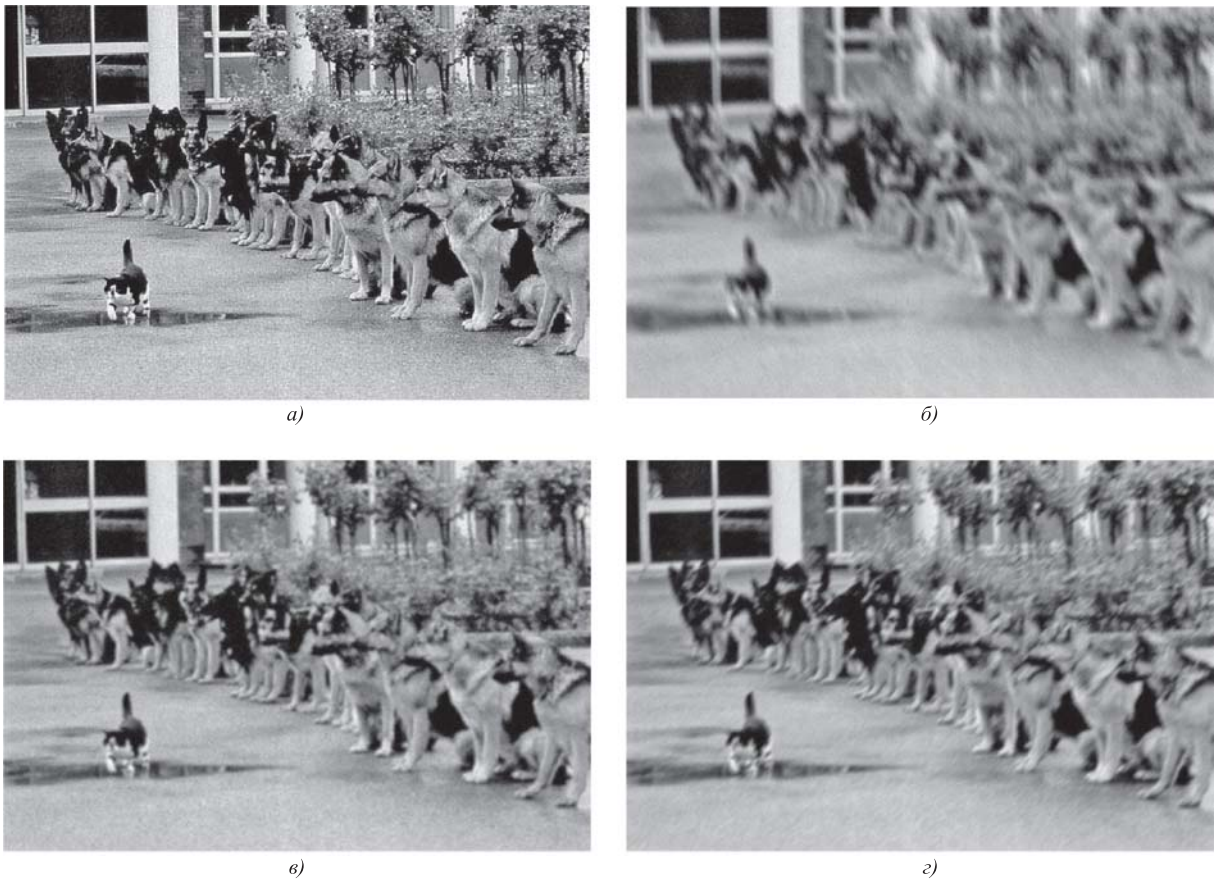


Рис. 11. Размытые изображения:
а — резкое; *б* — с размытием движения; *в* — с фокусным размытием; *г* — с комбинированным размытием

его реализации необходимо сформировать наборы обучающих данных.

В рамках создания наиболее полного и репрезентативного датасета проанализированы существующие методы программного размытия и оценки резкости изображений. Выбран метод размытия и предложен модифицированный метод оценки резкости изображений с устранением шума с помощью медианного фильтра и применением оператора Лапласа. Метод позволил в 1,5 раза улучшить качество оценки резкости в сравнении с другими методами.

На основе предложенного метода путём сравнения оценок резкости контрольных фотографий, сделанных вручную, и программно размытых фотографий были получены параметры ядер свёртки для реализации программного размытия по трём основным типам размытия: фокусное, размытие движения и комбинированное.

На основе анализа предложенного метода оценки и выбранного метода программного размытия была разработана методика отбора и генерации размытых изображений. В процессе её проверки обнаружено существенное уменьшение шума в результирующих изображениях за счёт применения медианного фильтра. Для искусственного добавления шума проанализированы существующие методы генерации шума на фотографиях. Предложен расширенный метод формирования случайного шума, основанный на добавлении и вычитании матрицы шума из исходной матрицы изображения. Параметры генерации матриц шумов подобраны на основе экспертной оценки шума на контрольных размытых фотографиях, сделанных вручную.

Разработанная методика генерации и отбора фотографий дополнена предложенным методом добавления случайного шума, что позволило программно сформировать репрезентативный датасет из базы фотографий ImageNet для обучения модели свёрточной нейронной сети.

Библиографические ссылки

1. **Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Вдовин Г.В., Кармановский Н.С., Соловьёв О.А.** Метод повыше-

ния резкости цифровых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 82—90. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-rezkosti-tsifrovyh-izobrazheniy (дата обращения: 14.10.2017).

2. **Воронин В.В.** Оценка качества восстановления изображений на основе машинного обучения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16294 (дата обращения: 14.10.2017).

3. **Кафтанников И.Л., Парасич А.В.** Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. № 3. С. 15—24. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-formirovaniya-obuchayuschey-vyborki-v-zadachah-mashinnogo-obucheniya (дата обращения: 14.10.2017).

4. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

5. **Unsharp** masking. Электронный ресурс. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Unsharp_masking (дата обращения: 14.10.2017).

6. **Masking** (art). Электронный ресурс. Режим доступа https://en.wikipedia.org/wiki/Masking_(art) (дата обращения 14.10.2017).

7. **База** фотографий ImageNet. Электронный ресурс. Режим доступа: http://image-net.org/about-overview (дата обращения: 14.10.2017).

8. **Детектирования** объектов. Электронный ресурс. Режим доступа: https://handong1587.github.io/deep_learning/2015/10/09/object-detection.html (дата обращения: 14.10.2017).

9. **Классификация**, распознавание объектов. Электронный ресурс. Режим доступа: https://handong1587.github.io/deep_learning/2015/10/09/recognition.html (дата обращения: 14.10.2017).

10. **Поиск** изображений. Электронный ресурс. Режим доступа: https://handong1587.github.io/deep_learning/2015/10/09/retrieval.html (дата обращения: 14.10.2017).

11. **Генерация** изображения. Электронный ресурс. Режим доступа: https://handong1587.github.io/deep_learning/2015/10/09/image-generation.html (дата обращения: 14.10.2017).

12. **Сегментация.** Электронный ресурс. Режим доступа: https://handong1587.github.io/deep_learning/2015/10/09/segmentation.html (дата обращения: 14.10.2017).

13. **Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2000. 168 с.

14. **Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.** Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.

15. **Базовые** операции обработки изображений. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.intuit.ru/studies/courses/10622/1106/lecture/18030 (дата обращения: 14.10.2017).

16. **Computer** Vision: Algorithms and Applications. Электронный ресурс. Режим доступа: http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf (дата обращения: 14.10.2017).

17. **Нгуен В.Ч., Тропченко А.А.** Анализ методов интерполяции в задачах реконструкции изображений // Наука и образование. 2017. № 3. С. 170—181. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1113 (дата обращения: 14.10.2017).

18. **Ватаманюк И.В., Ронжина А.Л.** Применение методов оценивания размытости цифровых изображений в задаче аудиовизуального мониторинга // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 16—23. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=21956644 (дата обращения: 14.10.2017).

19. **Pertuz S., Puig D., Garcia M.A.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus // Pattern Recognition. 2013. № 46 (5). P. 1415—1432. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320312004736 (accessed: 14.10.2017).

20. **Матричные** фильтры обработки изображений. Электронный ресурс. Режим доступа: https://habrahabr.ru/post/142818/ (дата обращения: 14.10.2017).

21. **Тарасов Е.А., Волков Ю.П., Байбурин В.Б., Ляшенко А.В.** Фильтрация изображений растровой электронной микроскопии методом нелокального среднего // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. № 11. С. 21—24. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=17421730 (дата обращения: 14.10.2017).

22. **Визуальный** шум: примеры и характеристики: учебник цифровой фотографии. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials-ru/image-noise-2.htm (дата обращения: 14.10.2017).

Ссылка для цитирования

Иванова Г.С., Головков А.А., Олейник Д.С. Формирование набора данных для обучения системы увеличения резкости фотоизображений // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 461—473.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 681.5

Н.А. Мешков, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского — Первый казачий университет),
Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц., **В.Д. Шашурин,** д-р техн. наук, проф., **А.Д. Суркова**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

nmeshkov@gmaik.com

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДХОДА САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обосновываются целесообразность и возможность применения подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием социально-экономических систем (СЭС) в условиях информационного общества. Разработана методика моделирования инновационного развития СЭС, предполагающая использование системных экономико-математических моделей. Построена самоорганизующаяся модель для прогнозирования в системе управления инновационным развитием СЭС.

Ключевые слова: инновационное развитие социально-экономических систем; специализированные информационно-коммуникационные пространства; интеллектуальные системы управления; самоорганизующиеся прогнозирующие модели; гипотеза селекции; функциональные системы П.К. Анохина; информационно-аналитический интернет-портал социально-экономической системы.

The expediency and the possibility of the self-organization approach application at the prediction problem decision in the intellectual system for managing the innovative development of socio-economic systems (SES) under the conditions of the information society are substantiated. A methodology for modeling the innovative development of SES is developed, which involves the use of system economic and mathematical models. A self-organizing model for forecasting in the management system of SES innovative development is built.

Keywords: innovative development of socio-economic systems; specialized information and communication spaces; intelligent control systems; self-organizing predictive models; selection hypothesis; Anokhins functional systems; information-analytical Internet portal of social and economic system.

Введение. Ключом к существенному повышению эффективности функционирования социально-экономических систем (СЭС) в современных условиях являются использование возможностей, предоставляемых субъектам СЭС информационным обществом, и формирование на базе Интернета единого общероссийского специализированного информационно-коммуникационного пространства (ИКП). Реализуя возможности, предоставляемые информационным обществом, можно создать интеллектуальную систему управления (ИСУ) инновационным развитием СЭС. Построение ИСУ инновационным развитием СЭС предполагает реализацию механизма синтеза цели управления, динамической экспертной системы, методов самоорганизации, принятия решений и прогнозирования, объединённых в рамках функциональной структуры П.К. Анохина.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является обоснование целесообразности и возможности применения подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием социально-экономических систем в условиях информационного общества.

Достижение цели исследования связано с решением следующих основных задач:

разработка методики моделирования инновационного развития СЭС;

оценка возможности и целесообразности применения подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновации-

онным развитием СЭС в условиях информационного общества;

создание самоорганизующейся модели для прогнозирования в системе управления инновационным развитием СЭС.

Метод научного исследования. Для выявления и изучения тенденций, оказывающих доминирующее воздействие на инновационное развитие СЭС, предлагается использовать системные экономико-математические модели гермейеровского типа, модели теории активных систем и модели теории самоорганизации — синергетики.

В связи с переходом России к рыночным отношениям особо актуальными представляются сегодня системные модели гермейеровского типа [1]. В гермейеровских системах нет отношений подчинённости: в условиях рынка экономические отношения между всеми хозяйствующими субъектами, независимо от их организационно-правовой формы и формы собственности на их имущество, строятся на принципах равенства, автономии воли и имущественной самостоятельности их участников.

Разные системообразующие факторы формируют разные системные модели. В сфере образования, в частности, в классе систем гермейеровского типа в первую очередь можно выделить модели, предназначенные для решения следующих задач [2]:

оптимизация соотношения объёмов средств, поступающих в сферу образования из трёх источников: государство (главная цель государства — эффективные инвестиции), хозяйствующие субъекты (главные цели всех хозяйствующих субъектов — потребление и эффективные инвестиции), население (главная цель — потребление). Главная (глобальная) цель системы «государство — хозяйствующие субъекты — население — российский образовательный комплекс» заключается в обеспечении социальной и духовной консолидации, конкурентоспособности и безопасности нации, личности, общества и государства путём воспитания, социально-педагогической поддержки становления и развития высоконравственного, ответственного, творческого, инициативного, компетентного гражданина России;

оптимизация распределения бюджетных средств между федеральным центром и регионами (глобальная цель системы — повышение качества образования в регионах);

финансирование укрепления и развития материально-технической базы образовательных организаций (независимо от их организационно-правовой формы и формы собственности на их имущество) из бюджетов всех уровней и средств, выделяемых хозяйствующими субъектами, осуществляющими предпринимательскую деятельность на рынке образовательных услуг и товаров образовательного назначения (глобальная цель системы — повышение качества образования в стране в целом);

усиление роли объединений образовательных организаций, ассоциаций и общественных организаций в управлении инновационным развитием образования (глобальная цель системы — улучшение ситуации в сфере образования).

Там, где есть отношения подчиненности, СЭС и её подсистемы можно рассматривать как активные системы [3]. В активных системах один или несколько управляемых субъектов — активных элементов (АЭ) могут целенаправленно выбирать своё состояние, руководствуясь личными интересами и предпочтениями. Предполагается, что активные элементы выбирают такие состояния, которые являются для них наилучшими при заданных управляющих воздействиях. Управляющие воздействия органа управления в свою очередь зависят от состояний АЭ.

Различия в целевых функциях АЭ порождают деление задач управления активными системами на задачи планирования (когда все АЭ действуют в соответствии с планами, разрабатываемыми органом управления на основании информации, предоставленной самими АЭ) и стимулирования (когда АЭ стимулируются органом управления для выполнения нужных ему действий).

В сфере образования, например, в терминах теории активных систем могут быть сформулированы, в частности, следующие задачи [2]:

повышение эффективности управления по схеме «территориальный орган управления образованием → подотчётные ему организации»;

повышение эффективности управления по схеме «хозяйствующие субъекты → связанные с ними договорными отношениями субъекты СЭС»;

повышение эффективности управления по схеме «руководитель образовательной организации → персонал образовательной организации»;

повышение эффективности функционирования системы мониторинга удовлетворённости населения России качеством, объёмами и условиями получения образовательных услуг;

повышение эффективности функционирования системы мониторинга удовлетворённости работников образования условиями их труда.

Для качественного анализа процесса инновационного развития СЭС в условиях информационного общества целесообразно использовать методы и средства теории самоорганизации — синергетики [4]. Теория самоорганизации исходит из того, что все происходящие в социально-экономических системах функционально сложные явления могут быть описаны достаточно простыми системами уравнений. При проведении качественного анализа основной акцент делается на определении характерных черт всего изучаемого процесса в целом и на прогнозировании его дальнейшего развития.

Специализированное информационно-коммуникационное пространство представляет собой виртуальную площадку, на которой происходит обмен одних ценностных факторов, имеющих отношение к проблемной ориентации данного ИКП, на другие. С возникновением и развитием обменных процессов в специализированных ИКП возникает и развивается социальная общность акторов общественных отношений, действующих в одном проблемном пространстве, определяется их ценностная ориентация, совершенствуются способы их общения через Интернет [5].

Авторами построены и исследованы системные синергетические модели важнейших составляющих процесса инновационного развития различных видов СЭС (российского образовательного комплекса [6—9], российского медико-производственного комплекса [10—13], системы местного самоуправления в Российской Федерации [14] и др.) в соответствующих специализированных ИКП:

информационного развития ИКП;

экономического развития ИКП;

предпринимательской активности субъектов СЭС в ИКП;

развития науки в ИКП;

профессиональной подготовки работников СЭС;

выработки коллективных решений, направленных на повышение социально-экономической эффективности функционирования субъектов СЭС.

Возможность и целесообразность применения подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием СЭС в условиях информационного общества. Рассмотренные модели инновационных процессов, характерных для СЭС, представляющие собой уравнения с жёстко заданной структурой, в условиях постоянно меняющихся условий среды функционирования и собственного состояния СЭС нередко становятся неадекватными. В связи с этим построение прогнозирующих моделей, включающих доминирующие (определяющие) параметры СЭС, предлагается осуществлять методом самоорганизации [15—17]. Самоорганизация позволяет исключить лишние и случайные отношения и связи между элементами системы. Также весьма важно, что самоорганизующиеся прогнозирующие модели можно строить непосредственно в процессе функционирования СЭС.

Адекватность самоорганизующихся моделей определяется по минимуму ансамбля критериев селекции (выбора) моделей — совокупности взаимодополняющих критериев. При удачном выборе критериев селекции можно исключить лишние переменные состояния, определить их взаимосвязи наилучшим образом.

Интеллектуальная система управления инновационным развитием СЭС функционирует следующим образом. На первом этапе проводится выделение (отбраковка) всех заведомо неприемлемых по критериям селекции сценариев. Из оставшихся выбирают и ранжируют несколько лучших, и самый лучший принимают к исполнению. На каждом последующем этапе, используя обновлённую (актуализированную) информацию об условиях функционирования и собственном состоянии СЭС, процедуру отбора сценариев, повторяют, сохраняя при этом несколько старых сценариев.

В интеллектуальных системах управления инновационным развитием СЭС может быть реализован метод построения прогнозирующих моделей, основанный на объединении статистической и экспертной информации. При формировании акцепторов действия интеллектуальных систем управления [18—22], основанных на теории функциональных систем П.К. Анохина, метод построения прогнозирующих моделей, предполагающий объединение статистической и экспертной информации, предлагается сочетать с подходом самоорганизации.

Подход самоорганизации наиболее эффективен в условиях минимального объёма априорной информации, а также в случаях, когда в силу различных причин не учитываются некоторые существенные факторы или помехи в несколько раз превышают полезный сигнал. Принципиальная возможность про-

гнозирования при недостатке информации о части определяющих факторов обусловливается тем, что в сложных системах все факторы коррелированы между собой, и следовательно, в измерении одного фактора будет содержаться информация о других, связанных с ним, факторах.

Методологической предпосылкой использования подхода самоорганизации при построении прогнозных моделей является предположение о том, что все необходимые данные, характеризующие динамику объекта исследования, содержатся в информации об условиях его функционирования и о его собственном состоянии, а также в ансамбле критериев селекции. Применяя подход самоорганизации, можно построить математическую модель объекта исследования без априорного указания его закономерностей. Разработчику нужно лишь задать ансамбль критериев селекции — и выбор модели оптимальной сложности произойдёт автоматически.

В рамках подхода самоорганизации реализуется метод самоорганизации, который основывается на следующих принципах:

1. *Самоорганизация модели.* За основу принимается тот факт, что в процессе селекции прогнозных моделей по ансамблю критериев сложность структуры моделей растёт, а значения критериев падают. Достижение значениями критериев своего минимума свидетельствует о нахождении модели оптимальной сложности (далее значения критериев либо остаются постоянными, либо увеличиваются).

2. *Внешнее дополнение (С. Бир).* Необходимым условием выбора модели оптимальной сложности является введение внешнего критерия селекции — критерия, вычисляемого на основе информации, не используемой в процессе оценивания параметров модели, производимого с помощью обучающей последовательности.

3. *Гипотеза селекции.* Согласно гипотезе селекции в детерминированной постановке, все воздействия, не преодолевшие порога самоотбора в предшествующем ряду, не будут участвовать в образовании наилучшего результата в следующем ряду.

4. *Свобода выбора* — неокончательность промежуточного решения (Д. Габор). В целях обеспечения свободы выбора в процессе селекции на каждый следующий этап с предыдущего передаётся сразу несколько моделей.

Адекватность выбранной модели подтверждается достижением минимума критериев селекции. Правильный выбор критериев селекции позволяет исключить из рассмотрения лишние, случайные и неинформативные состояния.

К числу наиболее известных критериев селекции моделей относятся критерии регулярности (среднеквадратическая ошибка прогноза проверочной последовательности), минимума смещения модели (нормированная сумма квадратов разностей выходных величин двух моделей, полученных на двух различных подмножествах множества исходных данных), баланса (прогнозное значение в какой-либо отдалённой опорной точке). Реже используются критерии разнообразия аргументов, простоты модели, информационный критерий и др.

В первой фазе системогенеза в ансамбль критериев селекции включаются в основном общие критерии — регулярности, минимума смещения, баланса и т. п. Во второй фазе ансамбль критериев будет состоять из одного общего критерия (например, регулярности) и нескольких специальных.

Использование ансамбля критериев селекции позволяет сделать выбор прогнозной модели однозначным. Критерии, по каждому из которых в принципе осуществляется многозначный выбор, в совокупности применяются к моделям, уже отобранным с помощью вспомогательных критериев, которые в каждой конкретной постановке задачи выбираются, как правило, из физических соображений.

Предсказанное состояние исследуемой системы будет использоваться в функционале качества, который минимизируется при поиске оптимального управления. Синтез управления с оптимизацией прогноза проводится периодически с учётом вновь поступивших данных.

Процесс построения модели на основе самоорганизации реализуется в три этапа:

1) построение генератора моделей-претендентов;

2) оценка сгенерированных моделей-претендентов по критериям селекции и выбор лучшей из них;

3) использование выбранной прогнозной модели для экстраполяции.

Метод самоорганизации применим в тех случаях, когда измерения содержат достаточно информации о динамике процессов, протекающих при функционировании исследуемой системы, т. е. когда эффект старения измерений ещё не слишком сильно влияет на точность построения прогнозирующей модели. Когда же старение измерений критически сказывается на точности прогнозирующей мо-

дели, применяют алгоритм, основанный на временных рядах. При этом точность прогнозирующей модели можно повысить с помощью экспертной информации, используемой при её построении. В качестве индикатора перехода от самоорганизующихся прогнозирующих моделей к прогнозирующим временным рядам можно принять величину рассогласования в акцепторе действия системы управления.

Метод самоорганизации реализуется в системах эвристической самоорганизации. Центральным элементом системы эвристической самоорганизации является генератор гипотез, представляющий собой программу, вырабатывающую случайные комбинации входных сигналов — аргументов и функций от них. Помимо генератора гипотез, система включает в себя блок порогового самоотбора полезной информации по эвристическим критериям и блок оптимизации порогов. Хотя в целом число возможных комбинаций входных и промежуточных сигналов может оказаться весьма большим, пороговые самоотборы полезной информации позволяют уменьшить объём задачи, а благодаря процедурам оптимизации порогов становится возможным достигнуть максимальной точности её решения. Самыми известными примерами систем эвристической самоорганизации являются персептрон, система Стэнфордского университета и система, реализующая метод группового учёта аргументов.

Конструирование интеллектуальной системы управления инновационным развитием российского СЭС связано с рядом существенных проблем. Серьёзные затруднения вызывает прежде всего реализация механизмов синтеза цели управления, формирования и функционирования акцептора действия. Синтез цели и формирование акцептора действия в системе управления инновационным развитием СЭС осуществляют топ-менеджеры отрасли в условиях законодательных, экономических и других ограничений. В такой ситуации неизбежны разного рода субъективные ошибки, чреватые тяжёлыми последствиями как для самой СЭС, так и для отдельных конкретных социальных групп, права и интересы которых окажутся при этом нарушенными, и российского общества в целом.

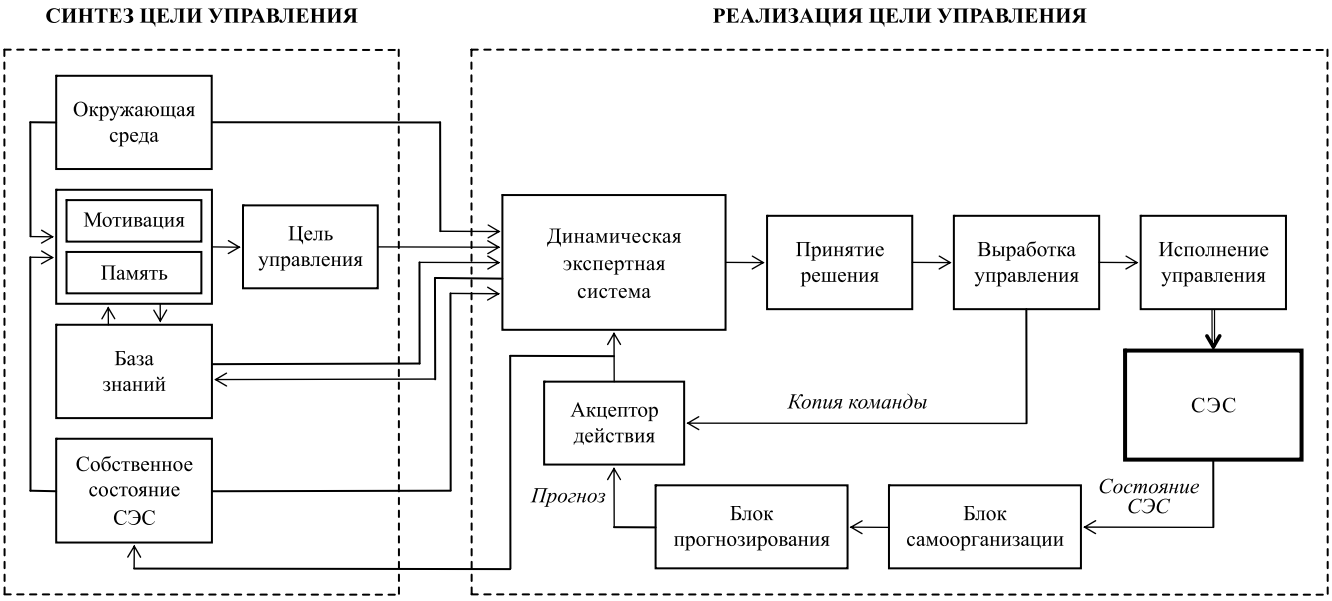
Интеллектуальная система управления инновационным развитием СЭС (рисунок) может быть построена на основе информационно-аналитического интернет-портала СЭС. В ней портал СЭС будет выполнять следующие функции:

сбор, накопление и хранение информации о состоянии внешней среды и собственном состоянии СЭС;

синтез цели управления на основе активного оценивания информации о состоянии внешней среды и собственном состоянии СЭС, а также прогноза этих состояний при наличии мотивации и специальных знаний;

формирование и развитие базы знаний, касающихся самых разных аспектов профессиональной деятельности СЭС;

выработка оценки, необходимой для принятия решения, а также прогноза для акцептора действия;



Принципиальная схема интеллектуальной системы управления инновационным развитием СЭС

принятие решения;

проверка акцептором действия соответствия результата действия (при реализации выбранного управления) прогнозу.

Акцептор действия функционирует на основе самоорганизующихся прогнозирующих моделей инновационных процессов, происходящих в сфере профессиональной деятельности СЭС. Отчёт о соответствии результатов действия прогнозу передаётся в экспертную систему и в систему синтеза цели. Если результат действия соответствует прогнозу, цель управления признаётся достигнутой и выбранное управление — правильным. В случае несоответствия результата действия и прогноза проводится новая экспертная оценка, принимается новое решение и реализуется новое управляющее воздействие. Если достигнуть соответствия в принципе невозможно, происходит изменение цели управления — синтезируется новая цель.

В качестве экспертов в системе управления инновационным развитием СЭС будут выступать члены формирующегося на базе портала СЭС профильного интернет-сообщества — объединения людей, имеющих общие интересы и общую цель.

Самоорганизующаяся модель для прогнозирования в системе управления инновационным развитием СЭС. Для прогнозирования в системе управления инновационными процессами, происходящими в СЭС, можно использовать следующую самоорганизующуюся модель:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \, \mu_i \, (f_i x),$$

где n — число базисных функций в модели; a_i — амплитуда; μ_i — базисные функции из параметризованного множества $F_p = \{a_j \mu_j (f_j x) | \, j = \overline{1, m}\}$, каждой базисной функции ставится в соответствие двумерный вектор параметров $(a_i, f_i)^{\mathrm{T}}$; f — частота.

В алгоритме самоорганизации целесообразно использовать ансамбль критериев селекции с критериями степени управляемости и наблюдаемости [23, 24]. Дополнение классического ансамбля селекции указанными критериями позволяет строить модели с улучшенными характеристиками управляемости и наблюдаемости [25, 26]. Повышение качественных характеристик моделей позволяет повысить точность интеллектуальной системы и даёт возможность сократить требуемые вычислительные мощности при реализации алгоритмов за счёт уменьшения времени построения моделей заданной точности.

Выводы. Рассмотрены возможность и целесообразность применения подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием СЭС в условиях информационного общества, построена самоорганизующаяся модель для прогнозирования в системе управления инновационным развитием СЭС.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие обобщающие выводы:

для выявления и изучения тенденций, оказывающих доминирующее воздействие на инновационное развитие СЭС, предлагается использовать системные экономико-математические модели;

в связи с тем, что модели инновационных процессов, характерных для СЭС, представляющие собой уравнения с жёстко заданной структурой, в условиях постоянно меняющихся условий среды функционирования и собственного состояния СЭС нередко становятся неадекватными, построение прогнозирующих моделей, включающих доминирующие (определяющие) параметры СЭС, следует осуществлять методом самоорганизации.

Библиографические ссылки

1. **Гермейер Ю.Б.** Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. 327 с.

2. **Мешков Н.А., Неусыпин К.А., Абрамешин А.Е., Александров А.А., Пролетарский А.В.** Разработка и исследование системы управления инновационным развитием российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество. Инновации. Образование. 2012. № 10. С. 2—15.

3. **Бурков В.Н., Новиков Д.А.** Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999. 128 с.

4. **Милованов В.П.** Неравновесные социально-экономические системы: синергетика и самоорганизация. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 264 с.

5. **Мешков Н.А.** Сущность и генезис проблемно-ориентированных информационно-коммуникационных социальных пространств // Качество. Инновации. Образование. 2011. № 3. С. 72—76.

6. **Мешков Н.А.** Методология управления инновационным развитием образования в условиях информационного общества // Дистанционное и виртуальное обучение. 2013. № 11. С. 16—26.

7. **Мешков Н.А.** Постановка и решение задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество. Инновации. Образование. 2013. № 12 (103). С. 3—8.

8. **Мешков Н.А.** Применение подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 1 (104). С. 18—23.

9. **Мешков Н.А.** Методологические основы построения интеллектуальной системы управления инновационным развитием российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Инновации в образовании. 2014. № 4. С. 163—173.

10. **Мешков Н.А.** Методика качественного анализа инновационных процессов, происходящих в информационно-коммуникационном медико-производственном пространстве // Качество. Инновации. Образование. 2011. № 6. С. 44—48.

11. **Мешков Н.А.** Конструирование интеллектуальной системы управления инновационным развитием российского медико-производственного комплекса // Качество. Инновации. Образование. 2011. № 9. С. 55—59.

12. **Meshkov N.A.** Application of self-organization approach for solving the problem of forecasting in an intelligent management system of innovative development of the russian medical-industrial complex in the information society // Инновационные информационные технологии. 2014. № 3. С. 346—350.

13. **Мешков Н.А.** Методологические основы построения интеллектуальной системы управления инновационным развитием российского медико-производственного комплекса // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 10. С. 16—20.

14. **Мешков Н.А., Ульрих И.В.** Формирование и развитие информационно-коммуникационного пространства местного самоуправления // В сб.: Современные аспекты фундаментальных наук: тр. второго междунар. симпозиума. М.: ИИУ МГОУ, 2015. С. 84—90.

15. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техніка, 1985. 223 с.

16. **Неусыпин К.А., Забелинский А.И.** Некоторые аспекты теории организации и прогнозирования. М.: МПУ, 2000. 87 с.

17. **Лукьянова Н.В., Мешков Н.А., Колупаев Р.В.** Исследование систем управления: идентификация, моделирование, прогнозирование: учеб. пособ. / Под общ. ред. К.А. Неусыпина. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 110 с.

18. **Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.

19. **Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarsky A.V.** Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles // Metrology and Measurement Systems. 2017. T. 24. № 2. C. 347—356.

20. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Применение интеллектуальных технологий для разработки систем управления летательных аппаратов // В сб. статей EurasiaScience X междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 35—37.

21. **Неусыпин К.А.** Направления развития интеллектуальных систем // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 12. С. 12—15.

22. **Фам С.Ф., Селезнева М.С.** Система управления летательными аппаратами с использованием концепции системного синтеза // В сб.: Теоретические и практические исследования XXI века: тр. II междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 104—106.

23. **Фам С.Ф., Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Разработка компактного алгоритма самоорганизации // В сб.: Наука сегодня: проблемы и пути решения. Матер. междунар. научн.-практ. конф. в 2 ч. 2016. С. 64—65.

24. **Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Shen K., Liu R., Guo R.** Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Nanjing Li Gong Daxue Xuebao. 2014. T. 38. № 5. C. 602—607, 614.

25. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С.** Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18—24.

26. **Клычников В.В., Ли Юе., Селезнева М.С.** Методы совершенствования алгоритмического обеспечения навигационных систем и комплексов ЛА // В сб. Достижения вузовской науки: тр. Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 35—38.

Ссылка для цитирования

Мешков Н.А., Лукьянова Н.В., Шашурин В.Д., Суркова А.Д. Применение подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием социально-экономических систем // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 10. С. 474—480.

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

Сдано в набор 01.08.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 20.09.2018.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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