Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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)

Издаётся с 1947 г.

Том 72 **7 / 2018**

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Шалумов А.С., Чабриков С.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-Т: анализ и обеспечение тепловых характеристик конструкций аппаратуры 291

Бобырь М.В. Интеллектуальная система управления оборудованием с ЧПУ 301

Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих технологий раскроя металлопроката в условиях холодноштамповочного производства . 307

Абдулов Р.Н., Аббасзаде Ф.Г., Меджидова С.А. Оптимальный контроль режима работы аэрозольного генератора для преграждения прохождения оптического излучения 314

Горбунов А.А., Микаева А.С., Микаева С.А. Исследования по повышению качества и экологичности люминесцентных ламп 317

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. Разработка проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования 320

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Поршнев С.В., Корелин И.А. Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем, обоснование выбора аппроксимации интенсивности поступления заявок 324

Мирзаханов В.Э. Краткий обзор современных средств DATA MINING 330

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

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 7/2018

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 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. Inst., 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

Shalumov A.C., Chabrikov S.V., Shalumov M.A. ASONIKA-T: Analysis and ensuring of the apparatus thermal characteristics . . 291

Bobyr M.V. Intelligent control system for CNC equipment 301

Fedorina E.V., Dyakov I.F. Automatic designing of resource-saving technologies for metal-roll cutting at cold-stamping production 307

Abdulov R.N., Abbaszade F.G., Medzhidova S.A. Optimal control of the aerosol generator operating mode for the passage interception of optical radiation 314

Gorbunov A.A., Mikaeva A.S., Mikaeva S.A. Research for improving the quality and environmental friendliness of fluorescent lamps 317

MODERN TECHNOLOGIES

Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Evsyukov A.A. Development of the problem-oriented infrastructure of simulation modeling 320

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES

Porshnev S.V., Korelin I.A. Mathematical modeling of information control-throughput systems, the approximation choice justification of the demand receipt intensity 324

Mirzakhanov V.E. A brief overview of modern DATA MINING facilities 330

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

УДК 621.396.6.019.3

А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф., **С.В. Чабриков, М.А. Шалумов,** канд. техн. наук
(Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)

als@asonika-online.ru

АСОНИКА-Т: АНАЛИЗ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрены вопросы автоматизированного моделирования тепловых процессов в произвольных конструкциях радиоэлектронных средств с использованием модели тепловых процессов, построенной пользователем: назначение, состав, описание подсистемы АСОНИКА-Т, методика построения тепловых моделей, форма задания исходных данных, примеры расчётов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; тепловые процессы.

The problems of automated modeling of thermal processes in arbitrary designs of radio electronic facilities through the use of the model of thermal processes constructed by the user are considered: the purpose, composition, description of the subsystem ASONIKA-T, the methodology of constructing thermal models, the form of setting the initial data, examples of calculations.

Keywords: radio engineering facilities; modeling; thermal processes.

Назначение и технические характеристики АСОНИКА-Т. Подсистема автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) АСОНИКА-Т предназначена для автоматизации моделирования тепловых процессов микросборок, радиаторов, теплоотводящих оснований, гибридно-интегральных модулей, блоков этажерочной и кассетной конструкции, шкафов, стоек и других нетиповых (произвольных) конструкций [1].

АСОНИКА-Т позволяет при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) решать следующие проектные задачи [2]:

определять средние температуры блоков, печатных узлов и материалов несущих конструкций, а также воздушных объёмов внутри РЭС;

вносить изменения в конструкцию РЭС в целях достижения приемлемых тепловых режимов;

выбирать лучший с точки зрения тепловых режимов работы конструкции вариант из нескольких имеющихся концептуальных вариантов;

обосновывать необходимость и оценивать эффективность дополнительной защиты РЭС от тепловых воздействий;

создавать при необходимости эффективную программу испытаний макетов и опытных образцов РЭС на тепловые воздействия (в задачах выбора наиболее информационных испытательных воздействий, датчиков и точек их установки в наиболее теплонагруженных местах и пр.).

АСОНИКА-Т даёт возможность моделировать стационарные и нестационарные тепловые режимы РЭС, работающих в воздушной среде при нормальном и пониженном давлениях и охлаждаемых естественной или вынужденной конвекцией, а также в вакууме. В результате моделирования определяют средние температуры выделенных изотермичных воздушных объёмов, а также средние температуры несущих конструкций более низких уровней для дальнейшего более подробного теплового моделирования этих конструкций при реализации метода проектирования «сверху — вниз». Так, если при тепловом моделировании радиоэлектронных шкафов определяют средние температуры блоков или модулей, то на следующем шаге осуществляют моделирование этих блоков или модулей. В результате получают средние температуры печатных узлов. Далее для теплового моделирования печатных узлов уже применяют подсистемы АСОНИКА-Т (для моделирования нетиповых конструкций) и АСОНИКА-ТМ (для моделирования типовых конструкций), позволяющие получить температурные поля

каждого печатного узла и каждого радиоэлемента. Путём сравнения полученных значений температур радиоэлементов с предельно допустимыми значениями определяют выполнение требований по температурным запасам и таким образом выявляют перегруженные радиоэлементы. Если требования выполняются, то температуры радиоэлементов передаются в программы электрических расчётов для уточнения этих расчётов.

Определённые в АСОНИКА-Т температуры печатных плат передают в подсистему АСОНИКА-ТМ для механических расчётов печатных узлов.

Информация о температурах материалов несущих конструкций в дальнейшем будет использована в подсистеме АСОНИКА-М для комплексного механического моделирования с учётом этих температур.

Сервисное обеспечение АСОНИКА-Т включает в себя базу данных со справочными геометрическими и теплофизическими параметрами электрорадиоизделий (ЭРИ) и конструкционных материалов, графический ввод исходных данных для конструкций, графический вывод результатов расчёта [3].

Для проведения сеанса моделирования необходима следующая исходная информация:

эскиз или чертёж несущей конструкции РЭС;

Рис. 1. Структурная схема АСОНИКА-Т

теплофизические параметры материалов рассматриваемой конструкции РЭС;

мощности тепловыделений в конструкциях более низкого уровня иерархии, входящих в рассматриваемую конструкцию. Мощности тепловыделения в конструкциях складываются из мощностей тепловыделения смонтированных в них радиоэлементов РЭС;

условия охлаждения (граничные условия) конструкции РЭС.

Структурная схема АСОНИКА-Т представлена на рис. 1. В её основе лежит модуль TeRa, который выполняет две основные функции. Во-первых, данный модуль представляет собой управляющую оболочку АСОНИКА-Т и содержит в себе несколько модулей и диалогов для связи между различными функционалами АСОНИКА-Т и выполнения таких функций, как расчёт, обработка запросов к базам данных материалов и типовых элементов, вывод на экран необходимой пользователю информации. Во-вторых, модуль TeRa является графической оболочкой для построения графа топологической модели тепловых процессов (МТП).

Работа с АСОНИКА-Т начинается с создания МТП или макромодели исследуемой конструкции. Каждый из этапов автоматизации отражён в модуле TeRa соответствующим диалогом. Построение модели начинается с определения узлов топологического графа. Для этого предусмотрен диалог, который помогает пользователю при задании параметров узлов модели. Далее узлы соединяются ветвями для определения тепловых связей между элементами конструкции. Для ввода ветвей тоже существует диалог, который запрашивает у пользователя тип ветви и необходимые теплофизические параметры теплового взаимодействия. Таким образом строится модель любой сложности, но этот процесс неэффективен и требует больших внимания и трудозатрат, поэтому модуль TeRa дополнен алгоритмами и методами автоматизированного синтеза МТП типовых элементов. Был создан типовой ряд элементов для автоматизированного синтеза МТП.

Кроме того, часто при построении сложных моделей необходимо стыковать МТП типовых элементов между собой для создания единой модели. Для таких ситуаций созданы пользовательские диалоги, которые, запросив необходимую информацию у пользователя, автоматически связывают необходимые элементы конструкции.

Результатом работы модуля TeRa является файл с исходными данными для расчётного модуля Ac_t. Графическая информация о разрабатываемой модели хранится в файле графического модуля с расширением *.spt. Исходными данными для расчёта являются файлы с расширениями *.dat. По окончании расчёта создаётся файл с его результатами с расширением *.rez.

По результатам расчёта пользователь имеет возможность получить разнообразную текстовую и графическую информацию. Для этого разработан модуль отображения результатов ShowGR, который выводит полученные данные как для стационарного расчёта (таблицу температур в узлах модели), так и для нестационарного расчёта (в данном случае выводят зависимости температуры в узлах модели от времени, представленные в виде графиков и таблиц).

Кроме того, в АСОНИКА-Т предусмотрена обширная и понятная справочная система.

Для удобства работы с диалогами в структуре АСОНИКА-Т предусмотрена функциональная связь с интегрированным банком данных. Банк данных содержит набор баз данных, которые включают в себя справочную информацию о материалах несущих конструкций РЭС со всеми теплофизическими параметрами, необходимыми для расчёта. Кроме того, имеется база типовых элементов, которую пользователь может пополнять новыми элементами. Следует отметить, что базы данных являются централизованными и едиными для АСОНИКА-Т и АСОНИКА-ТМ, что очень эффективно при проведении комплексного моделирования: от несущей конструкции к печатным узлам, где результаты одного анализа являются граничными условиями в другом.

Методы и методики построения МТП. ***Общие сведения.*** При исследовании температурных полей РЭС наиболее распространён метод электротепловой аналогии (ЭТА). Сущность метода ЭТА состоит в составлении эквивалентной электрической схемы, моделирующей явления теплопередачи (теплообмена) или аэродинамики в рассматриваемом объекте, и расчёте этой схемы методами, разработанными для сложных электрических цепей.

При реализации метода изделие разбивают на условно изотермичные объёмы. В виде таких изотермичных объёмов можно представить, например, ЭРИ, элемент конструкции изделия, в котором необходимо определить температуру, воздушный объём внутри блока, окружающую среду, совокупность элементов изделия, весь блок РЭС, часть элемента и т. д. Разбиение зависит от конструкции рассчитываемого объекта, требуемой точности расчёта температур, принятых допущений при рассмотрении процессов теплопередачи в изделии и т. д. На рис. 2 показаны формы представления изотермичных объёмов в прямоугольной, цилиндрической и сферической системах координат.

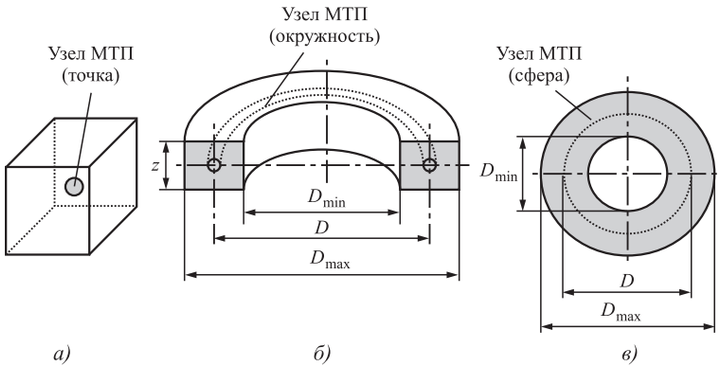


Рис. 2. Формы представления изотермичных объёмов в прямоугольной (*а*), цилиндрической (*б*) и сферической (*в*) системах координат

Выделенным условно изотермичным объёмам ставят в соответствие узлы электрической схемы. Чем больше число таких изотермичных объёмов, тем точнее моделируются значения температур в изделии, но, с другой стороны, увеличивается размерность получаемой электрической схемы.

Среди этих условно изотермичных объёмов можно выделить объёмы, находящиеся в тепловом взаимодействии. К ним можно отнести:

граничащие объёмы единого твёрдого тела (теплопроводность);

объёмы, взаимодействующие через воздушные прослойки (свободная конвекция в ограниченном пространстве);

объёмы, взаимодействующие посредством лучистого теплообмена (излучение);

объёмы твёрдого тела и окружающего его воздуха (конвекция);

контактирующие объёмы двух твёрдых тел (контактная теплопроводность) и т. п.

Узлы электрической схемы, соответствующие взаимодействующим объёмам, соединяют электрическими сопротивлениями, которые моделируют тепловые сопротивления.

Если в выделенном объёме рассеивается тепловая энергия, то в соответствующий узел электрической схемы включают источник тока. Например, при выделении в качестве изотермичного объёма печатного узла с рассеиваемой тепловой мощностью 15 Вт в этот

узел электрической схемы включается источник тока со значением силы тока 15 А.

Если для выделенного объёма известна его температура, то в соответствующий узел электрической схемы включают источник э.д.с., задающий эту температуру. Например, при выделении в качестве изотермичного объёма блока с температурой 30 °С в этот узел электрической схемы включается источник э.д.с. 30 В.

Теплоёмкость выделенного объёма моделируют с помощью электрической ёмкости.

Так получают электрические схемы, моделирующие тепловые процессы в конструкциях изделий.

При моделировании аэродинамических процессов также можно пользоваться аналогией аэродинамических и электрических процессов. Так, аэродинамическое сопротивление аналогично электрическому сопротивлению, квадрат расхода воздуха — источнику тока, напор — источнику напряжения. Таким образом, модель конструкции РЭС может быть построена в виде электрической или аэродинамической цепи.

Для удобства получаемые электрические схемы (модели тепловых и аэродинамических процессов (МТП и МАП)) представляют в топологическом виде (в виде графа). При этом электрические сопротивления, моделирующие процессы теплообмена, называют тепловыми сопротивлениями, источники тока — источниками тепловых мощностей, источники э.д.с. — источниками заданных температур, электрические сопротивления, моделирующие аэродинамические процессы, — аэродинамическими сопротивлениями.

Таким образом, модель тепловых (аэродинамических) процессов представляет собой топологический ненаправленный граф, узлы которого соответствуют выделенным изотермичным объёмам в конструкции РЭС, а ветви графа отражают тепловые (воздушные) потоки между этими объёмами.

Переменными узлов графа являются температуры объёмов для тепловых моделей и напоры в точках для аэродинамических моделей. Переменными ветвей графа являются тепловые потоки в конструкции для тепловых моделей и расходы воздуха в каналах РЭС для аэродинамических моделей.

Параметры ветвей — тепловые и аэродинамические сопротивления. Иными словами, МТП или МАП есть идеализированная схема путей распространения в конструкции тепловых и воздушных потоков. В зависимости от степени идеализации процессов теплообмена структура модели может изменяться.

«Нагретая зона» и принцип местного влияния. При построении МТП изделий основная трудность заключается в том, чтобы обеспечить необходимую точность моделирования и при этом сложность МТП (число узлов) оставалась в разумных пределах. Для решения этой проблемы предварительно идеализируют (упрощают) процессы теплопередачи в изделии:

не учитывают второстепенные виды теплообмена в конструкции изделия (т. е. отбрасывают несущественные тепловые связи между узлами МТП);

обосновывают и принимают условно изотермичными те или иные группы тел (деталей, элементов).

В теории теплообмена такой условно изотермичный объём, включающий несколько тел, называют «нагретой зоной». Введение «нагретых зон» позволяет упростить построение МТП и сократить подготовку исходных данных для расчёта.

Рассмотрим, в каких случаях возможно и целесообразно применять объединение элементов в «нагретую зону» — условно однородное тело с определённой среднеобъёмной температурой.

Прежде всего, это имеет смысл в приближённых расчётах, когда не требуется знание подробной картины температурного поля на элементах изделия, а достаточно средних значений температур элементов. По такому принципу построено большинство существующих методик и нормалей по расчёту тепловых режимов РЭС.

Если же при построении МТП часть элементов объединяют в «нагретую зону», а часть — моделируют методом ЭТА, то правомерность использования комбинации этих двух методов определяется принципом местного влияния, или свойством стабильности теплового потока.

Согласно данному принципу любое местное перераспределение картины температурного поля является локальным и не распространяется на отдельные участки поля.

Пусть, например, на печатной плате расположена группа деталей различной конфигурации, рассеивающих определённую мощность. Эта группа деталей вызовет такое же повышение температуры в отдельных частях блока, как и равномерно распределённый по этой плате источник энергии такой же мощ-

ности. При этом вблизи от деталей температурное поле может сильно зависеть от размеров и конфигурации деталей печатной платы.

Специально проведённые исследования показывают, что конфигурация области, занятой источником энергии, практически не влияет на характер температурного поля в блоке на расстоянии от центра области того же порядка, что и наибольший размер этой области.

Такую область, где параметры температурного поля зависят от конфигурации области — источника энергии, называют областью конфигурационного влияния источника энергии.

Описание математического аппарата АСОНИКА-Т. Математическое моделирование в АСОНИКА-Т осуществляется путём формирования системы нелинейных алгебраических уравнений (для стационарного теплового процесса) или системы обыкновенных дифференциальных уравнений (для нестационарного теплового процесса) по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам конструкции РЭС. Система уравнений формируется на основе топологической модели, построенной пользователем в графическом интерфейсе АСОНИКА-Т. Для решения систем уравнений задаются граничные условия.

В качестве математического аппарата используются критериальные уравнения теории подобия и уравнения теплоообмена, метод узловых потенциалов для формирования математической модели тепловых процессов в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) или системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ).

Для решения СОДУ используется метод формул дифференцирования назад (ФДН), для решения СНАУ — метод простых итераций, а для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), к которым сводятся СОДУ и СНАУ (на каждом шаге по времени и/или на каждой итерации по нелинейностям), — метод LU-разложения с символьной факторизацией и учётом разреженности матрицы тепловых проводимостей.

Основные сведения по работе с АСОНИКА-Т. ***Вызов АСОНИКА-Т*** осуществляется по команде TeRa.exe. После запуска данного файла появляется окно АСОНИКА-Т, в котором можно выделить три области: рабочую область — в ней непосредственно осуществляется построение МТП конструкции, главное меню и панель инструментов.

Главное меню (рис. 3) состоит из набора следующих команд управления АСОНИКА-Т:

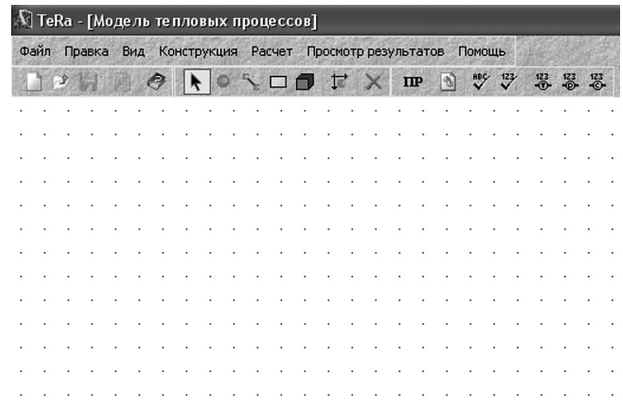


Рис. 3. Окно главного меню подсистемы АСОНИКА-Т

«Файл», «Правка», «Вид», «Конструкция», «Расчёт», «Просмотр результатов», «Помощь». Рассмотрим некоторые из них.

Команда «Файл» главного меню предоставляет следующие возможности: создать новую модель (пункт меню «Файл/Новый»); загрузить уже созданную модель с диска (пункт меню «Файл/Открыть»); сохранить созданную модель в файле на диске (пункт меню «Файл/Сохранить» или «Сохранить как»); закончить работу с программой (пункт меню «Файл/Выход»).

Исходные данные и результаты моделирования сохраняются только в каталоге Data. Никаких дополнительных каталогов и подкаталогов для исходных данных и результатов создавать не надо. Все файлы, относящиеся к данному проекту, имеют разные расширения, но одинаковое имя.

Команда «Правка» главного меню позволяет работать с базой данных теплофизических параметров материалов, сохранить фрагмент тепловой модели как типовой элемент, загрузить типовой элемент, а также выделить всю модель.

Команда «Конструкция» позволяет выбрать типовую конструкцию (пластина, корпус, модульная конструкция, кассетная конструкция, радиатор).

Команда «Расчёт» позволяет осуществить расчёт для введённой модели, выбрать параметры расчёта (стационарный и нестационарный), а также ввести таблицу для задания параметров нестационарного расчёта.

Команда «Просмотр результатов» позволяет вывести на экран:

таблицу температур в узлах модели при стационарном тепловом расчёте, а при нестационарном — таблицу температур в узлах модели в заданном диапазоне изменения времени (данную таблицу с результатами можно также сохранить в текстовый файл);

график температур во времени при нестационарном тепловом расчёте;

таблицу температур в узлах модели в заданный момент времени при нестационарном тепловом расчёте (можно также сохранить в текстовый файл).

Для построения МТП используется *панель инструментов*, которая разбита на три области: Standart, Tools, Options, каждая из которых предназначена для выполнения определённого набора команд. Рассмотрим некоторые из них.

Область Tools (рис. 4) содержит кнопки для вызова команд работы по созданию и редактированию топологических моделей тепловых процессов, а также кнопку вызова файла помощи.

Рис. 4. Область Tools

Область Options (рис. 5) содержит кнопки для вызова функций получения дополнительной информации об узлах и ветвях топологической МТП конструкции, а также вызова параметров расчёта.

Рис. 5. Область Options

Работа с графическим интерфейсом ввода МТП. Процедура ввода МТП конструкции РЭС в топологическом виде начинается с *ввода узлов модели*. Для этого нажимается кнопка на панели инструментов. После этого устанавливается курсор в любом месте на поле рабочей области и нажимается левая кнопка мыши. Открывшееся диалоговое окно предлагает ввести номер и имя узла, например номер узла — 1, имя узла — Крышка.

Нумерация узлов осуществляется автоматически, однако номер узла можно изменять вручную. Узлы должны нумероваться последовательно и без пропусков.

Удаление узла. Перед удалением узла нужно удалить все подходящие к нему ветви. После этого нажимается кнопка на панели инструментов. Затем курсор устанавливается на узел и нажимается левая кнопка мыши, одновременно удерживается клавиша Ctrl. Узел окрасится в синий цвет. После этого нажимается кнопка , и узел удаляется.

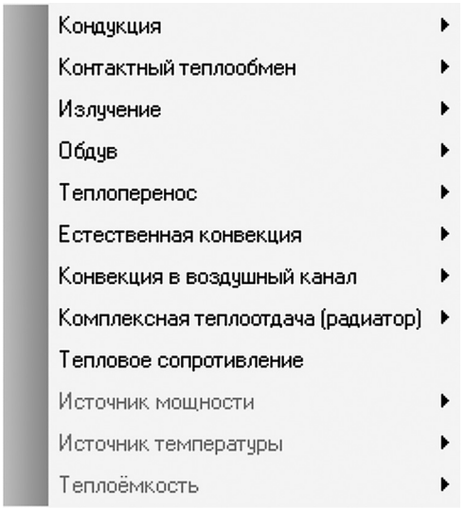


Рис. 6. Окно выбора типа ветви

Установка ветви топологической тепловой модели осуществляется между двумя узлами. Для этого нажимается кнопка на панели инструментов. Затем нужно последовательно нажать на оба узла. После этого в открывшемся диалоговом окне выбирается тип ветви (рис. 6) и в следующем диалоге вводятся параметры соответствующей ветви. Например, для ветви, моделирующей излучение, вводятся длина поверхности — 100 мм, ширина поверхности — 100 мм, степень черноты поверхности — 0,8, коэффициент облучённости — 0,8. В результате получится изображение ветви (рис. 7).

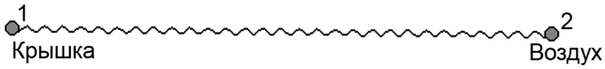


Рис. 7. Изображение ветви излучения

Ветви «Источник мощности», «Источник температуры» и «Теплоёмкость» соединяются одним концом с узлом с нулевым потенциалом. Примеры данных ветвей приведены на рис. 10...12.

Удаление ветви. Нажимается кнопка на панели инструментов. Затем устанавливается курсор на ветвь, которую нужно удалить, и нажимается левая кнопка мыши. При этом одновременно удерживается клавиша Ctrl. Ветвь окрасится в синий цвет. После этого нажимается кнопка и ветвь удаляется.

Корректировка параметров ветви. Для этого нажимается кнопка на панели инструментов. Затем устанавливается курсор на ветвь, параметры которой нужно изменить, и нажимается правая кнопка мыши с одновре-

менным удерживанием клавиши Ctrl. После этого в окне предлагается изменить параметры ветви.

Просмотр названий узлов и номеров ветвей. Для этого на панели инструментов в первом случае нажимается кнопка , а во втором — кнопка .

Создание библиотеки типовых элементов. Очень часто в физической тепловой модели новой конструкции встречаются типовые, часто повторяющиеся элементы. Чтобы каждый раз не вводить такие элементы вновь, нужно один раз их сохранить, а затем в случае необходимости вставлять в новую физическую модель.

Для *чтения типового элемента и его включения в физическую модель* нужно вначале нажать на кнопку , а затем, нажимая одновременно Ctrl и правую кнопку мыши, выбрать в предлагаемом меню пункт «Вставить типовой элемент/Открыть», войти в каталог, где хранятся модели типовых элементов, и выбрать необходимый файл с расширением .uel.

Физические модели типовых конструкций создаются программно разработчиком АСОНИКА-Т. В настоящее время заложены следующие варианты типовых конструкций РЭС: пластина, корпус, модульная конструкция, кассетная конструкция, радиатор.

Для ввода конструкции ***пластина*** нужно нажать на кнопку на панели инструментов, после этого установить курсор в любом месте на поле рабочего окна подсистемы и нажать левую кнопку мыши. В появившемся диалоговом окне задаются параметры пластины, такие как число узлов по осям *X* и *Y*, длина и ширина пластины, условия эксплуатации — вакуум или среда, одна или две плоскости взаимодействия и теплофизические параметры материала пластины.

После ввода соответствующих параметров в рабочем окне появится изображение физической модели пластины в виде прямоугольника. Если подвести курсор к нему и нажать правую кнопку мыши, появится меню, предлагающее выбрать одно из следующих действий: развернуть физическую модель пластины в топологическую модель или изменить параметры пластины. При разворачивании физической модели пластины появится изображение топологической модели (рис. 8).

Для ввода типовой конструкции ***корпус*** необходимо нажать на кнопку на панели инструментов. После этого следует установить курсор в любом месте на поле главного меню и нажать левую кнопку мыши. В появившемся окне задаются параметры корпуса, такие как его длина, ширина и высота, условия эксплуатации — вакуум или среда, теплофизические параметры материала корпуса.

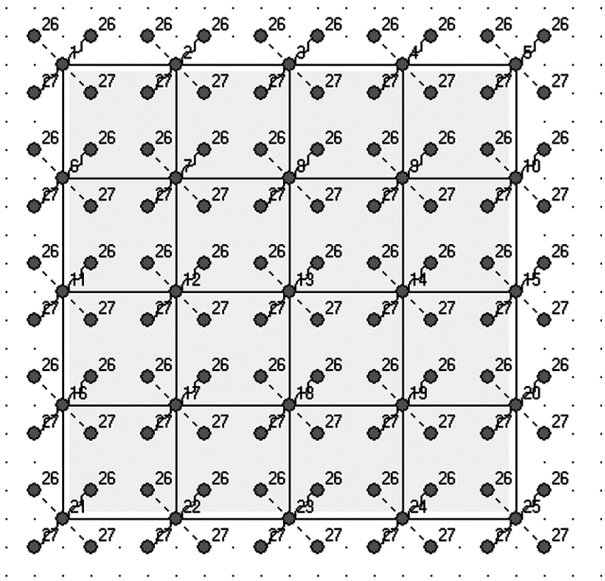
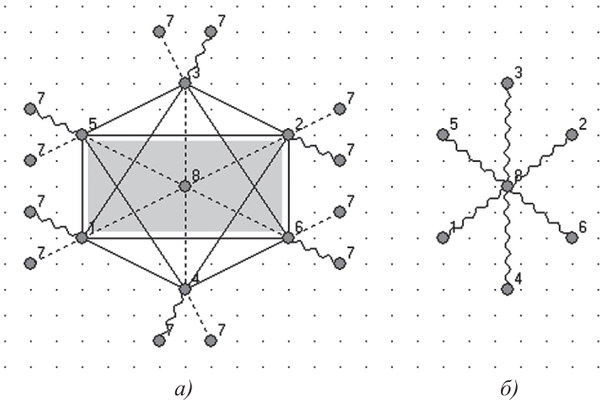


Рис. 8. Изображения топологических моделей конструкции пластина

После ввода параметров в рабочем окне АСОНИКА-Т появится изображение физической модели корпуса в виде параллелограмма. При разворачивании физической модели появится изображение топологической модели корпуса (рис. 9).

Типовой элемент корпус используется при создании практически всех конструкций РЭС. Для построения МТП конструкции блока необходимо разбить её на составляющие элементы. Выделим шесть основных элементов: передняя панель, задняя панель,



а) *б)*

Рис. 9. Изображение топологической модели конструкции корпус

верхняя крышка, нижняя крышка, правая и левая стенки. Для построения модели необходимо также ввести узлы, обозначающие окружающую среду и воздух внутри корпуса. Исходя из этого МТП корпуса будет представлять собой несвязный граф из восьми узлов и соответствующих ветвей (см. рис. 9). Как и в случае с плоскими конструкциями, данная модель зависит от среды, в которой эксплуатируется проектируемый блок. На рис. 9, *а* показана модель блока в среде. Если же корпус будет использоваться в вакууме, то в модели будут отсутствовать связи, обозначающие конвективный теплообмен (рис. 9, *б*). В такой ситуации тепловое взаимодействие между элементами блока будет осуществляться только за счёт излучения. Каждый узел конструкции имеет свой номер. Каждый узел обозначает один конструктивный элемент, а именно: 1 — передняя панель; 2 — задняя панель; 3 — верхняя крышка; 4 — нижняя крышка; 5 — левая стенка; 6 — правая стенка; 7 — окружающая среда; 8 — воздух внутри корпуса.

В АСОНИКА-Т выделена также типовая конструкция РЭС под названием ***«модульная конструкция»***, которая представляет собой набор модулей, состоящих из двух или трёх слоёв: в середине алюминиевый слой, а к нему с двух сторон приклеены платы или с одной стороны — одна плата. По краям алюминиевого слоя расположены рёбра. В результате при стягивании болтами модулей автоматически за счёт стяжки рёбер образуется корпус модульной конструкции. Остаётся закрепить две крышки — сверху и снизу.

Для ввода типовой модульной конструкции нужно войти в пункт меню «Конструкция/Модульная конструкция». После этого необходимо установить курсор в любом месте на поле окна АСОНИКА-Т и нажать левую кнопку мыши. В появившихся окнах задаются параметры модульной конструкции, такие как число модулей, их габаритные размеры, параметры условий эксплуатации и теплофизические параметры материалов.

После ввода параметров в рабочем окне АСОНИКА-Т появится изображение физической модели модульной конструкции в свёрнутом виде (рис. 10, *а*). При разворачивании корпуса и пластины появится изображение математической модели в топологическом виде (рис. 10, *б*).

Макромодель модуля можно представить в виде упрощённой модели корпуса со вставленными в него двумя печатными узлами

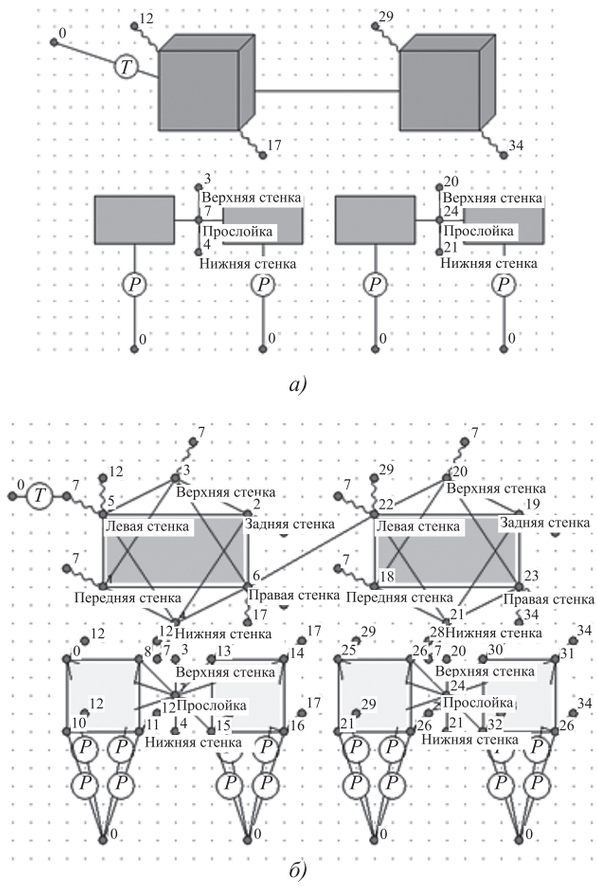


Рис. 10. Изображения моделей модульной конструкции: *а* — физическая модель; *б* — топологическая модель; *P* — мощность; *T* — температура

(рис. 10, *а*). Эта модель состоит из корпуса, узлов 1...6. Данные узлы моделируют стенки корпуса, которые взаимодействуют с окружающей средой (узел 7) посредством излучения.

Внутреннее строение корпуса модуля представляет собой прослойку, которая соединена с его верхней, нижней, передней и задней стенками. На эту прослойку с обеих сторон прикрепляются печатные платы, которые на макромодели представлены многополюсниками. Основными тепловыделяющими элементами являются печатные платы. Для более точного моделирования они представлены пластинами, разбитыми на четыре области, для каждой из которых можно задать мощность тепловыделения. Данные платы, узлы 8...11 и 13...16, посредством излучения взаимодействуют с воздухом (узлы 17 и 12) между стенками корпуса модуля и печатными платами и посредством кондуктивного теплообмена — с прослойкой.

В конструкции может быть до 15 модулей, соединённых в единую конструкцию. Корпу-

сы модулей соединяются между собой кондуктивными связями по соприкасающимся стенкам. Так как модули соединяются между собой болтовыми креплениями, то будет учитываться и теплоотвод за счёт этих соединений. При увеличении числа модулей в конструкции будут добавляться кондуктивные связи между соседними, соприкасающимися между собой, стенками модулей. Остальные части макромодели будут оставаться без изменения. Кроме того, можно задавать мощность теплоизлучений по тепловым зонам в макромодели в свёрнутом виде или прикладывать нагрузку непосредственно к узлам печатных плат при развёрнутом отображении макромодели.

Рассмотрим типовую ***кассетную конструкцию***, которая представляет собой прямоугольный корпус с установленными параллельно платами одинакового размера.

Для ввода кассетной конструкции нужно войти в пункт меню «Конструкция/Кассетная конструкция». После этого следует установить курсор в любом месте на поле и нажать левую кнопку мыши. В появившемся окне надо задать параметры кассетной конструкции, такие как габаритные размеры блока, условия эксплуатации, число кассет, теплофизические параметры материала кассет, мощности тепловыделения и др.

После ввода соответствующих параметров в рабочем окне подсистемы АСОНИКА-Т появится изображение физической модели кассетной конструкции в свернутом виде в виде параллелограмма (рис. 11, *а*). При разворачивании физической модели появится изображение топологической модели (рис. 11, *б*).

При разработке МТП кассетных конструкций РЭС необходимо рассмотреть два случая:

конструкции с принудительным воздушным охлаждением (продув воздуха между печатными узлами блока);

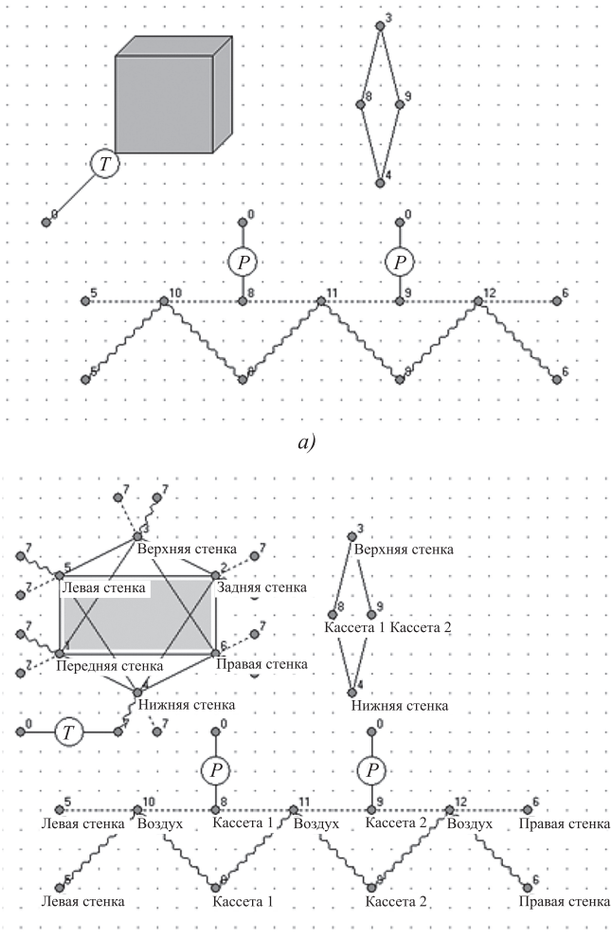
конструкции с естественным воздушным охлаждением.

В обоих случаях МТП конструкций должны позволять определять:

температуру корпуса блока;

среднеповерхностные температуры печатных узлов;

температуры воздушных объёмов между печатными узлами, причём для конструкций с естественным воздушным охлаждением — среднеобъёмные температуры каждого воздушного объёма, для конструкций с принудительным воздушным охлаждением — температуру воздуха на выходе каждого воз-



а)

б)

Рис. 11. Изображения моделей кассетной конструкции: *а* — физическая модель; *б* — топологическая модель; *P* — мощность; *T* — температура

душного канала между печатными узлами и среднюю температуру каждого воздушного канала. Эти интегральные показатели теплового режима рассматриваемых конструкций будут необходимы в дальнейшем при детальном анализе тепловых характеристик РЭС, т. е. для реализации иерархического подхода к моделированию тепловых процессов в РЭС.

Заметим, что с точки зрения протекающих в них тепловых процессов кассетные и ***этажерочные конструкции*** практически не различаются. Это позволяет предложить для их расчётов использовать идентичные МТП.

Рассмотрим типовую конструкцию ***радиатор***.

Для ввода тепловой модели типового радиатора необходимо выбрать пункт меню «Конструкция/Радиатор» или нажать на панели инструментов на кнопку . После этого нужно выбрать любое свободное место в рабочей об-

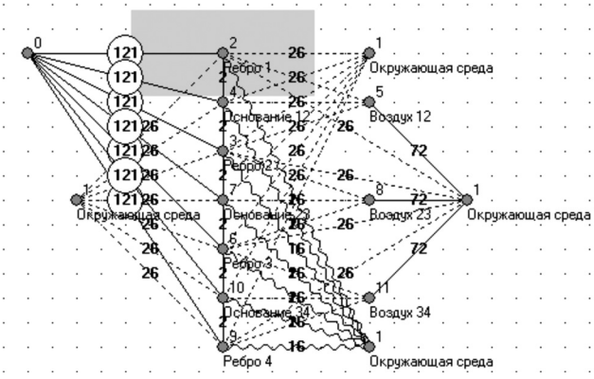


Рис. 12. Развёрнутая модель типового радиатора в рабочей области АСОНИКА-Т, построенная при выбранном нестационарном режиме расчёта

ласти АСОНИКА-Т и кликнуть по нему левой кнопкой мыши. На экране отобразится диалоговое окно выбора параметров радиатора.

Диалоговое окно позволяет определить требуемые для расчёта тепловых режимов конструкции параметры. Они разделяются на несколько групп.

Группа «Нормативный документ» позволяет выбрать нормативный документ, описывающий различные радиаторы, заранее введённые в базу данных с помощью АСОНИКА-БД.

Группа «Тип заготовки» позволяет выбрать тип заготовки для радиатора. Предусмотрено два типа заготовок: для ребристого радиатора и для штыревого радиатора.

Группа «Характер оребрения» позволяет выбрать число сторон, на которых расположены рёбра или штыри радиатора. Предусмотрено два варианта: одностороннее оребрение и двухстороннее оребрение.

Группа «Охлаждение» позволяет выбрать вид охлаждения, на который рассчитан радиатор: естественное или вынужденное.

Перечисленные группы, за исключением группы «Нормативный документ», представляют собой набор параметров типоразмера радиатора или заготовки радиатора и, по существу, просто осуществляют навигацию по уже введённым ранее в базу данных параметрам.

Группа «Материал заготовки» позволяет выбрать характеристики материала: степень черноты и теплопроводность.

Группа «Окружающая среда» задаёт характеристики окружающей среды: давление и скорость обдува для радиаторов с принудительным охлаждением.

Группа «Геометрические параметры» содержит в табличном виде характеристики конкретных экземпляров радиаторов выбранного типоразмера.

После выбора экземпляра моделируемого типового радиатора можно нажать кнопку «ОК», и тепловая модель радиатора будет построена в рабочей области АСОНИКА-Т (первоначально в виде схематического изображения радиатора). Развёрнутая модель типового радиатора представлена на рис. 12 (построена при выбранном нестационарном режиме расчёта).

При построении модели типового радиатора в нестационарном режиме

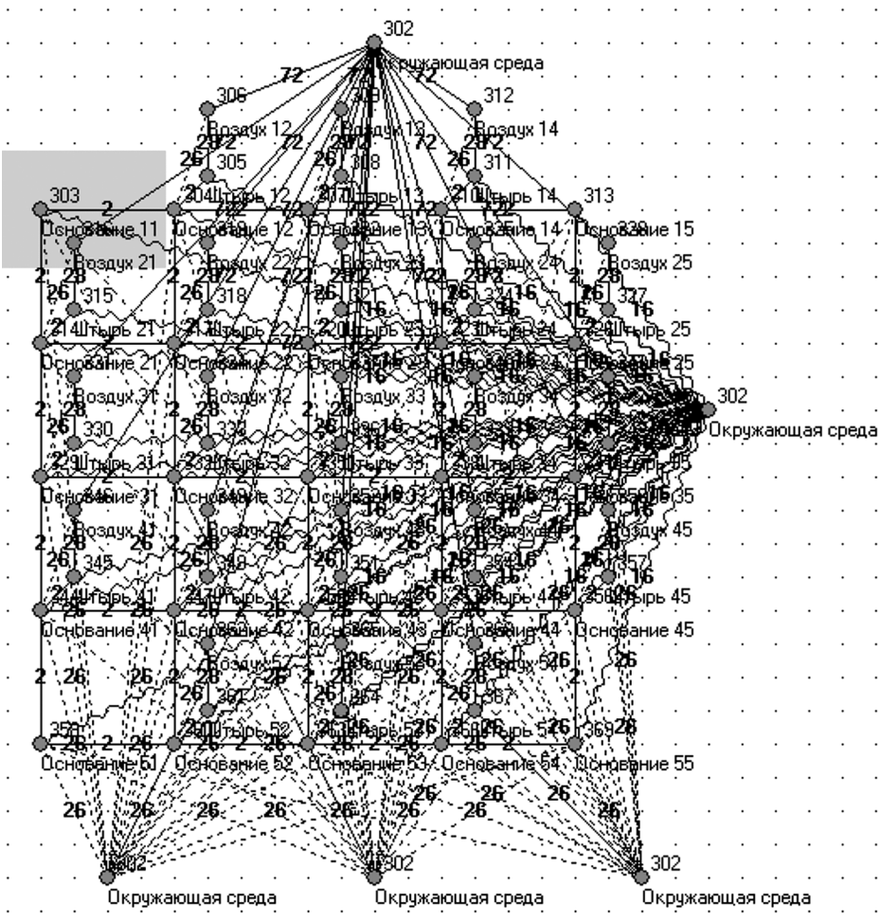


Рис. 13. Развёрнутая модель типового штыревого радиатора

к ней автоматически добавляются ветви с теплоёмкостями узлов (с номерами 121). МТП при стационарном режиме будет отличаться от МПТ, представленной на рис. 12, лишь отсутствием ветвей с номерами 121.

Принцип, используемый при генерации тепловой модели типового ребристого радиатора, основан на вводе в модель дополнительных узлов, представляющих собой условно изотермичные объёмы воздуха между рёбрами. В результате этого дополнения модель типового радиатора разбивается на узлы по следующей схеме: ребро 1 (включая основание радиатора) — основание 1 радиатора — воздух в пазе между рёбрами — основание 2 радиатора — ребро 3 и т. д.

При генерации штыревого радиатора разбиение происходит следующим образом: основание разбивается на примерно равные кубики, на каждом основании установлен штырь, а вокруг штыря — условно изотермичный объём воздуха. На рис. 13 приведён пример МТП типового штыревого радиатора.

Библиографические ссылки

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

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

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

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Чабриков С.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-Т: анализ и обеспечение тепловых характеристик конструкций аппаратуры // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 291—301.

УДК 004.896: 681.518

М.В. Бобырь, д-р техн. наук, проф.
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)

maxbobyr@gmail.com, fregat_mn@rambler.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ С ЧПУ

Представлена модель подключения шаговых двигателей к трёхпозиционному станку с ЧПУ. Показана нечёткая модель назначения управляющего параметра режима резания (скорости перемещения суппорта вдоль оси), использующая при импликации жёсткий и мягкий операторы, операторы Лукасевича и ограниченной разности. Проведено моделирование поведения системы, позволяющее оценить её эффективность при управлении оборудованием с ЧПУ.

Ключевые слова: оборудование с ЧПУ; шаговый двигатель; Ардуино; нечёткая система управления; скорость резания; мягкие вычисления.

A model for connecting stepping motors to a three-position CNC machine is presented. The fuzzy model of the control parameter setting for the cutting mode (the speed of the support movement along the axis), which uses at implication hard and soft operators, Lukasevich operators and operators with limited difference, is shown. Modeling of the system behavior, which permits to evaluate its effectiveness at the control of CNC equipment is carried out.

Keywords: CNC equipment; stepping motor; Arduino; fuzzy control system; cutting speed; soft computing.

Введение. Одним из основных направлений повышения точности при обработке изделий является использование в управляющих системах оборудования с ЧПУ интеллектуальных методов управления. К ним относятся нейронные [1] и нечёткие модели [2—4].

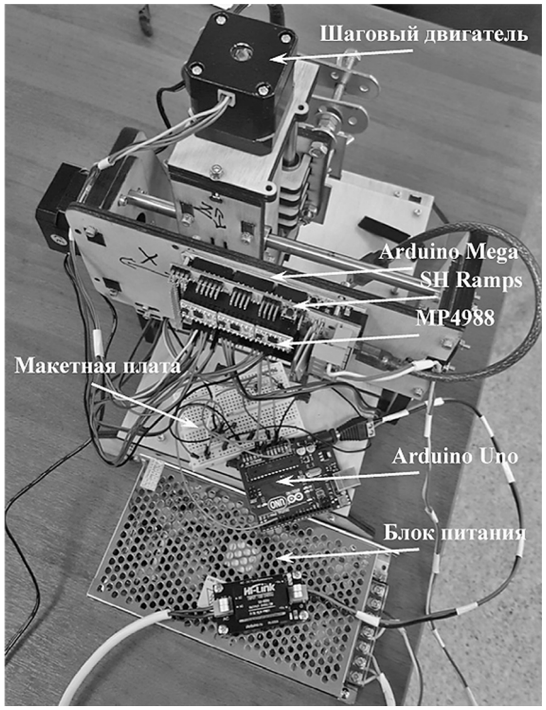


Рис. 1. Модель трёхпозиционного станка с ЧПУ

Таблица 1

Ось	Контакт	Номер пина
X	DIR STR $\overline{\text{EN}}$	55 54 38
Y	DIR STR $\overline{\text{EN}}$	61 60 56
Z	DIR STR $\overline{\text{EN}}$	48 46 62

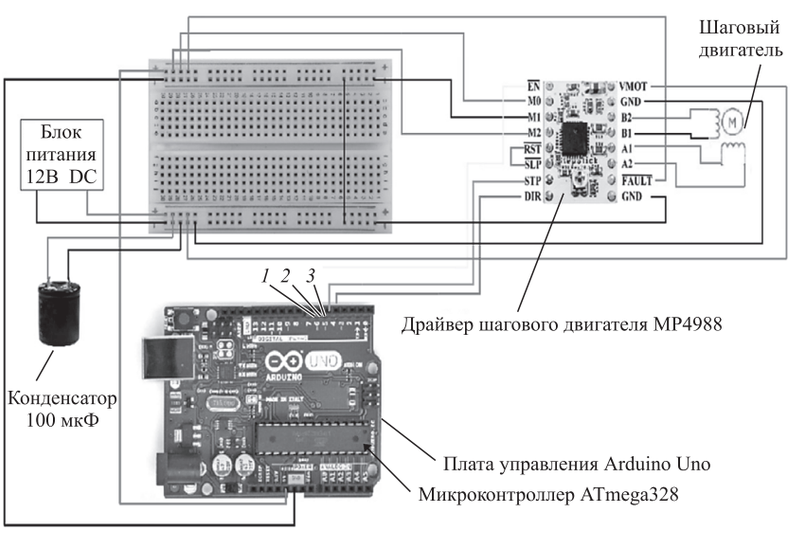


Рис. 2. Подключение шагового двигателя к микроконтроллеру

Использование данных моделей обусловлено тем, что они позволяют учитывать наличие возмущающих воздействий в системе «станок — приспособление — инструмент — деталь», носящих неопределённый характер. Как правило, нечёткие системы включают в себя блоки фаззификации, логического вывода и дефаззификации [5]. Указанные блоки реализуются методами математического программирования [6] и передаются в микроконтроллер, который управляет исполнительными механизмами оборудования с ЧПУ.

Структурная модель станка с ЧПУ и схема подключения шагового двигателя. Рассмотрим экспериментальную модель трёхпозиционного станка с ЧПУ (рис. 1). В состав модели входят: микроконтроллер Arduino Mega/Uno, плата управления SH Ramps, блок питания 12 В, три платы управления шаговыми двигателями MP4988, три шаговых двигателя с шагом 1,8°, три трап-вала. Электрическая схема подключения шагового двигателя к микроконтроллеру станка представлена на рис. 2.

Плата управления шаговыми двигателями SH Ramps устанавливается сверху микроконтроллера Arduino Mega 2560. Драйверы MP4988 закрепляются в плате SH Ramps. На электрической схеме подключения шагового двигателя к плате управления Arduino (см. рис. 2) контакты *1...3* платы Arduino Uno подключаются к контактам драйвера MP4988: DIR, STP и $\overline{\text{EN}}$ соответственно. Для соединения контактов драйвера MP4988 с микроконтроллером Arduino Mega необходимо пользоваться табл. 1.

При подключении шагового двигателя к плате Arduino Uno цифровой выход соединяется проводником с контактом DIR драйвера MP4988 и задаёт направление движения каретки станка. При значении HIGH каретка станка перемещается к шаговому двигателю. При значении LOW каретка станка перемещается в обратном направлении. Контакт STR подключается к входу платы управления Arduino Uno. Сигнал по этому контакту передаёт импульсы, необходимые для вращения шагового двигателя и последующего перемещения суппорта станка по одной оси. Перемещение суппорта станка осуществляется по трапвалу, который имеет резьбу 2 мм. То есть для того, чтобы суппорт станка с ЧПУ переместился на

2 мм, необходимо по каналу STR передать 360°/1,8° = 200 импульсов. Драйвер MP4988 также работает в нескольких режимах шага: 1/2, 1/4, 1/8 и 1/16. Уменьшение размерности шага увеличивает точность позиционирования суппорта станка с ЧПУ. Так, например, в режиме работы шага 1/4 для перемещения суппорта станка на 2 мм необходимо по каналу STR передать 800 импульсов. Для включения драйвера MP4988 на его пин $\overline{EN}$ необходимо подать сигнал «логической единицы» с цифрового выхода платы управления Arduino Uno. Шаговый двигатель подключается к разъёмам A1, A2, B1, B2 драйвера MP4988.

Управляющий программный код. Для перемещения суппортов станка по осям трёхпозиционного станка с ЧПУ используется программный код, хранящийся в микроконтроллере. Рассмотрим программный код, использующийся для перемещения суппорта по оси *X* (табл. 2).

Скорость движения суппорта определяется следующим образом. На драйвере MP4988 с помощью перемычек M1, M2, M3 (0, 1, 0) установлена 1/4 доля шага. То есть за imp = = 4000 импульсов суппорт переместится на 1 см. В случае если skorost = 20 мкс, то суппорт переместится на 1 см за 20·4000 = 0,08 мс. Тогда скорость определится как 1 см/0,08 мс = = 100/0,08·60 = 28,8 м/мин.

Модель нечётко-логического вывода. Для назначения скорости перемещения суппорта вдоль одной из осей предлагается использовать нечётко-логический вывод. Его реализация осуществляется в несколько этапов.

На *первом этапе* выполняется операция фаззификации и строятся функции принадлежности (ФП), описывающие входные и выходные переменные нечёткой системы определения скорости перемещения суппорта. Так как в процессе механической обработки изделий в зоне резания имеются возмущающие воздействия, то для управления точностью резания, как правило, используются параметры режима резания [7]. Причём в качестве входных переменных системы управления используются данные, получаемые от системы активного контроля оборудования с ЧПУ, а в качестве выходных — параметры режима резания, например подача или скорость резания [8]. Рассмотрим модель, в которой входными переменными являются данные, передаю-

Таблица 2

Программный код	Примечания
#define x_dir 55 #define x_step 54 #define x_en 38	Указываются пины микроконтроллера, к которым подключаются контакты DIR, STEP, $\overline{EN}$ драйвера MP4988
int i	Переменная *i* задаёт число импульсов, необходимых для перемещения суппорта вдоль оси *X*

void x_k_dvig (int imp, int skorost)
{ digitalWrite(x_dir, LOW);
for (i = 0; i < imp; i + +)
{ digitalWrite(x_step, HIGH);
delayMicroseconds(skorost);
digitalWrite(x_step, LOW);
delayMicroseconds(skorost); }}
	Функция движения суппорта к шаговому двигателю по оси *X*. В теле функции используются 2 переменные: imp — задаёт максимальное число импульсов; skorost — задаёт скорость перемещения суппорта по оси *X*.
	digitalWrite(x_dir, LOW) — на пин DIR подаётся сигнал «логического нуля», который указывает, что суппорт будет перемещаться к шаговому двигателю

void x_ot_dvig(int imp, int skorost)
{ digitalWrite(x_dir, HIGH);
for (i = 0; i < imp; i++)
{ digitalWrite(x_step, HIGH);
delayMicroseconds(skorost);
digitalWrite(x_step, LOW);
delayMicroseconds(skorost); }}
	Функция движения суппорта от шагового двигателя по оси *X*

void setup() { pinMode (x_en, OUTPUT); pinMode (x_step, OUTPUT); pinMode (x_dir, OUTPUT); }	Указывается, что пины драйвера MP4988 работают в режиме выхода
void loop() { x_ot_dvig (4000, 20); x_k_dvig (4000, 20); }	Пример кода для перемещения суппорта по оси *X* на 1 см от двигателя и 1 см к двигателю со скоростью 28,8 м/мин

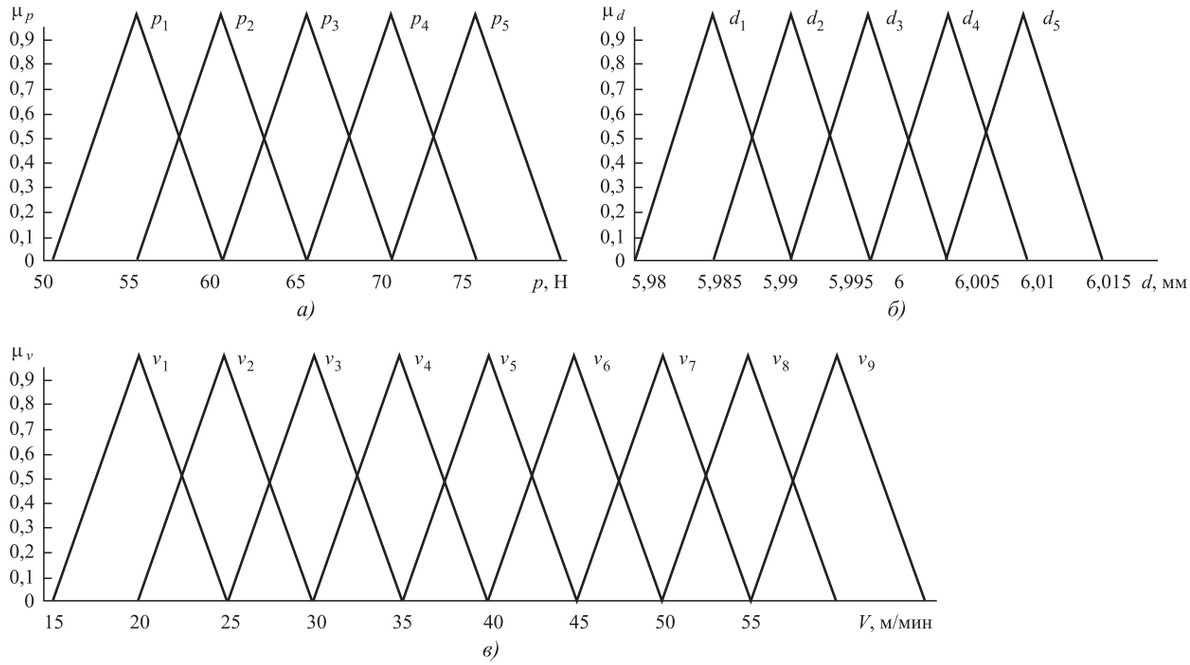


Рис. 3. Функции принадлежности:
а — входная переменная (сила резания); *б* — входная переменная (диаметр); *в* — выходная переменная (скорость резания)

щиеся от силометрического датчика — сила резания P и от оптического датчика — диаметр обрабатываемой детали D. Выходной переменной является скорость резания V. Функции принадлежности входных переменных P и D состоят из пяти термов. Для силы резания $P = [p_1] + [p_2] + [p_3] + [p_4] + [p_5]$, для диаметра $D = [d_1] + [d_2] + [d_3] + [d_4] + [d_5]$. Функция принадлежности для выходной переменной V состоит из девяти термов — скорость резания $V = [v_1] + [v_2] + [v_3] + [v_4] + [v_5] + [v_6] + [v_7] + [v_8] + [v_9]$. Тогда входные и выходные переменные описываются треугольными ФП (рис. 3).

На *втором этапе* нечётко-логического вывода создаётся база правил, имеющих структуру вида

$$R_i\text{: IF } p \text{ Is } P_i,\ d \text{ Is } D_i \text{ THEN } v \text{ Is } V_i\,.$$

Для рассматриваемого примера база нечётких правил задаётся табл. 3.

На *третьем этапе* нечётко-логического вывода в предпосылках нечётких правил рассчитываются величины степеней принадлежности в зависимости от чётких значений входных переменных [8—10]. На этапе импликации в зависимости от значений степеней принадлежности рассчитываются степени выполнения нечётких правил β_k с помощью t-норм: импликация Мамдани I_M, импликация Лукасевича I_L, импликация ограниченная разность I_{BD} и импликация на основе мягких операторов I_{Soft}:

Таблица 3

Входная переменная — диаметр	Входная переменная — сила резания				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
d_1	v_9	v_8	v_7	v_6	v_5
d_2	v_8	v_7	v_6	v_5	v_4
d_3	v_7	v_6	v_5	v_4	v_3
d_4	v_6	v_5	v_4	v_3	v_2
d_5	v_5	v_4	v_3	v_2	v_1

$$\beta_k = \begin{cases} \min\limits_{i=1}^{k}\left[p'_k, d'_k\right];\ \text{if } I = I_M; \\ \min\left(1, 1 - \sum\limits_{i=1}^{k} p'_k + d'_k\right);\ \text{if } I = I_L; \\ \max\left(0, \left(\sum\limits_{i=1}^{k} p'_k + d'_k\right) - 1\right);\ \text{if } I = I_{BD}; \\ \dfrac{p'_k + d'_k + \delta^2 - \sqrt{\left[p'_k - d'_k\right]^2 + \delta^2}}{2}, \\ \delta = 0{,}05 \text{ if } I = I_{Soft}. \end{cases}$$

Если нечёткие правила в заключениях ссылаются на одну и ту же выходную ФП, то активируется то нечёткое правило, у которого степень выполнения максимальна:

$$\gamma_i = \max\{\beta_k | C_k = F_i\}.$$

На *четвёртом этапе* нечётко-логического вывода выполняется операция нечёткого пересечения выходных функций принадлежности со значениями активированных степеней выполнения нечётких правил:

$$V_i' = \begin{cases} \min[\gamma_i; V_i]; \text{ if } I = I_M; \\ \min(1, 1-(\gamma_i + V_i)); \text{ if } I = I_L; \\ \max\left(0, \left(\sum_{i=1}^{k} p_k' + d_k'\right) - 1\right); \text{ if } I = I_{BD}; \\ \dfrac{\gamma_i + V_i + \delta^2 - \sqrt{[\gamma_i - V_i]^2 + \delta^2}}{2}, \\ \delta = 0,05 \text{ if } I = I_{Soft}. \end{cases}$$

На *пятом этапе* нечётко-логического вывода выполняется операция глобальной агрегации, в ходе которой с помощью нечёткого объединения определяется нечёткая результирующая функция:

$$V'' = \max_{i=1}^{k}\{V_i'\}.$$

На *шестом этапе* рассчитывается чёткое выходное значение с помощью одного из методов дефаззификации [11], например центра тяжести:

$$v_{CoG} = \frac{\int_V v \, \mathrm{d}u\mathrm{d}v}{\int_V \mathrm{d}u\mathrm{d}v}.$$

Моделирование процесса назначения параметра режима резания. При использовании в структуре нечётко-логического вывода 4 видов импликаций: жёсткого оператора, оператора Лукасевича, оператора ограничен-

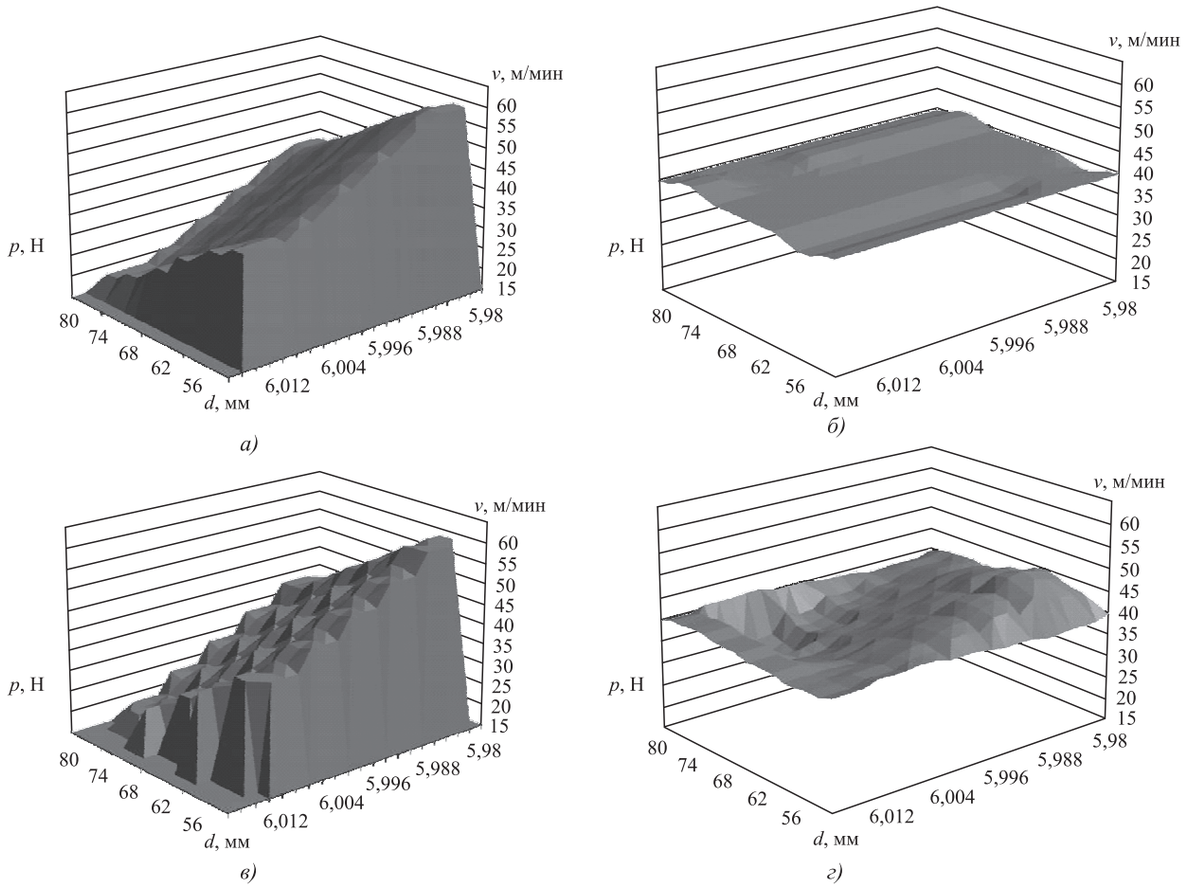


Рис. 4. Результирующая поверхность скорости:
а — жёсткая импликация; *б* — импликация Лукасевича; *в* — импликация ограниченной разности; *г* — мягкая импликация

ной разности и мягкого оператора были получены следующие графики результирующей переменной скорости перемещения суппорта вдоль одной из осей трёхпозиционного станка с ЧПУ (рис. 4).

Адекватность нечётко-логических систем зависит от выбора оператора импликации. При использовании жёсткого оператора и оператора ограниченной разности видны (см. рис. 4) зоны нечувствительности нечётко-логической системы. Причём при использовании жёсткого оператора система не реагирует на 25 % информативных признаков, при импликации ограниченной разности не учитывается 26 % информативных признаков. При мягком операторе импликации наблюдается более гладкая поверхность, способная более точно моделировать процесс изменения параметра скорости перемещения суппорта вдоль одной из осей при наличии в процессе резания возмущающих воздействий.

Заключение. В результате моделирования нечётко-логической системы назначения параметра скорости резания в задаче управления оборудованием с ЧПУ с различными операторами нечёткой импликации были получены и сравнены графики влияния силы резания и диаметра обрабатываемой поверхности изделий на скорость перемещения каретки станка по одной из осей. Установлено, что система адекватно реагирует на изменение входных переменных при использовании мягкой импликации. При использовании жёсткого оператора и оператора ограниченной разности наблюдались зоны нечувствительности нечётко-логической системы управления.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием (соглашение № 2.3440.2017/4.6) и при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-707.2017.8.

Библиографические ссылки

1. **Легаев В.П., Генералов Л.К., Галковский О.А.** Нейросетевой комплекс экстремального управления точностью обработки резанием // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 77—81.

2. **Зубков Е.В., Галиуллин Л.А.** Применение гибридной нейронной сети для настройки нечётких систем при моделировании режимов испытаний ДВС // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 21—25.

3. **Gupta A., Singh H., Aggarwal A.** Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel // Expert Systems with Applications. 2011. V. 38. № 6. P. 6822—6828.

4. **Bobyr M.V., Titov V.S., Nasser A.A.** Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. V. 44. № 7. P. 633—641.

5. **Liang M., Yeap T., Hermansyah A., Rahmati S.** Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. V. 43. № 14. P. 1497—1508.

6. **Бобырь М.В.** Способ и устройство управления скоростью резания на токарном оборудовании с ЧПУ // Патент России на изобретение № 2465115. 2012. Бюл. № 30.

7. **Зориктуев В.Ц., Шангареев Р.Р.** Система автоматического управления режимами резания на основе нечёткой логики // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 2 (37). С. 163—169.

8. **Титов В.С., Бобырь М.В., Тевс С.С.** Выбор оптимальных параметров управления технологическим процессом методами нечёткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 5. С. 21—23.

9. **Бобырь М.В., Милостная Н.А., Кулабухов С.А.** Обучение нейро-нечёткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15—26.

10. **Bobyr M., Titov V., Belyaev A.** Fuzzy system of distribution of braking forces on the engines of a mobile robot // MATEC Web of Conferences. 2016. P. 01052.

11. **Бобырь М.В., Кулабухов С.А.** Дефаззификация вывода из базы нечётких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9 (135). С. 32—41.

Ссылка для цитирования

Бобырь М.В. Интеллектуальная система управления оборудованием с ЧПУ // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 301—306.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства
ООО «Инновационное машиностроение».

УДК 621.77

Е.В. Федорина, И.Ф. Дьяков, д-р техн. наук, проф.
(Ульяновский государственный технический университет)

i.dyakov@ulstu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрены способы раскроя листового и рулонного металлопроката на полосы и штучные заготовки как основного источника ресурсосбережения заготовительного производства. Эффективность раскроя оценивается плотным размещением заготовок на материале с помощью коэффициентов раскроя и использования материала. Установлено, что в условиях динамично меняющегося ценообразования применение традиционных критериев раскроя оказывается недостаточным. Поэтому для раскроя был использован новый, более обобщённый критерий, который позволил существенно увеличить экономию материальных и денежных ресурсов.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование; раскрой; норма расхода; коэффициент использования металла; ресурсостоимостной показатель.

The methods of sheet and rolled metal-roll cutting into strips and piece blanks as the main source of resource saving of blank production are considered. The cutting efficiency is evaluated by the dense placement of blanks on the material with the help of the cutting and the material usage factors. It is established that in the conditions of dynamically changing pricing the application of traditional cutting criteria is insufficient. Therefore, a new, more general criterion was used for cutting, which allowed to significantly increasing the saving of material and monetary resources.

Keywords: automatic designing; cutting; consumption rate; metal utilization factor; resource-price index.

Введение. Одной из основных задач технологического процесса проектирования (ТПП) является внедрение в производство лучших технологических решений с соблюдением в холодноштамповочном производстве оптимального соотношения «затраты—эффект». Поэтому целью данного исследования стало проектирование оптимальных технологических процессов раскроя для повышения эффективности использования средств на приобретение металла. Реализация задачи была достигнута за счёт использования симплекс-метода для раскроя оптимизированного металлопроката по критерию оптимальности. Для анализа эффективности предложенного метода проведены численные эксперименты.

При разработке технологии изготовления деталей методом холодной листовой штамповки первоначальной операцией является раскрой листового и рулонного металлопроката. Следовательно, найти оптимальный вариант раскроя, соответствующий максимальному использованию металла с минимальным количеством отходов, — первоочередная задача [1, 2]. Вопрос о целесообразном варианте раскроя конкретного листа сводится к определению и сопоставлению количества деталей из листа (рулона) и коэффициента использования материала (КИМ) при различных способах раскроя. Результатом проектирования раскроя является создание карт раскроя. Поэтому в технологической подготовке холодноштамповочного производства значительное место занимает проектирование технологических процессов раскроя листового и рулонного материала, разработка раскройных карт.

Различают автоматизированный и неавтоматизированный расчёт раскроя. Существующие неавтоматизированные методы расчёта раскроя листового материала не только существенно увеличивают сроки технологической подготовки производства нового изделия, но и не позволяют выбрать оптимальный вариант раскроя. Технолог не в состоянии рассчитать все возможные варианты, чтобы остановиться на лучшем, с учётом всех технических и экономических характеристик (наличие оборудования необходимой мощности; направление резки листа для деталей, подвергающихся гибке; возможность использования отходов для изготовления других деталей при соблюдении комплектности и, наоборот, возможность использования отходов от производства других деталей на данную деталь и т. д.).

Кроме того, в процессе освоения нового изделия, когда дорабатываются конструкция и технология его изготовления, могут дополнительно вводиться или аннулироваться детали, меняться характеристики некоторых деталей (марка материала, толщина и т. д.). В этом случае необходимо провести перерасчёт раскроя всей номенклатуры деталей внутри профиля и, следовательно, снова спроектировать технологические процессы раскроя и отрезки заготовок, что для технолога практически невыполнимо из-за высокой трудоёмкости.

Основная часть. Автоматизация расчёта раскроя и проектирования технологии резки нужна ещё и потому, что в процессе производства нередко возникает ситуация, когда размеры поступающего листового материала не соответствуют технологии. В этом случае цеховому технологу нужно оперативно составить новую карту раскроя, причём не на одну деталь, а на плановый список деталей (дефицитных), которые необходимо изготовить за смену, и при этом обеспечить высокий коэффициент раскроя листа.

Для внедрения оптимальных технологических решений раскроя металла на постоянной основе и с учётом производственных условий, сокращения сроков технологической подготовки производства необходимо автоматизированное управление анализом и выбором наивыгоднейших вариантов. Система автоматизированного проектирования раскроя (САПР) позволяет:

осуществлять расчёт на разных стадиях производства: на этапе подготовки (при формировании портфеля заказов по металлу) и в действующем производстве (в случае замены металла);

оптимизировать затраты по металлу, снизить нормы расхода на изделие и сформировать на основании подетальных норм расхода оптимальный сортамент листового и рулонного материала;

осуществлять подбор деловых отходов за счёт оптимального использования отходов для изготовления более мелких деталей, отказаться от заказа металла на мелкие детали и, соответственно, повысить общий КИМ;

снизить трудоёмкость работы технологов по расчёту показателей раскроя, изменить подход к решению задач раскроя, создать возможность для решения логических и оптимизационных задач, что сделает труд технолога творческим, более интеллектуальным и эффективным.

САПР по раскрою ориентирована на широкий круг пользователей: работников технологического управления, отдела материальных нормативов, планово-диспетчерской службы, департамента закупок материалов и металлопродукции, департамента планирования закупок и обеспечения материалами, отдела организации и оплаты труда, цеховых технологов, департамента логистических процессов.

Кроме того, с помощью САПР решаются следующие задачи: экономия металла за счёт применения экономико-математических методов при расчёте оптимального раскроя листового и рулонного проката; определение экономически и технологически обоснованных норм расхода проката; сокращение сроков подготовки производства новых изделий и повышение производительности труда инженерно-технических работников; снижение трудоёмкости нормирования технологических процессов; оперативность раскроя поступившего на замену металла и повышение коэффициента его использования при замене; повышение качества проектных работ и технической документации.

На рис. 1 представлена архитектура взаимодействия в системе расчёта раскроя. В состав САПР входят следующие программно-методические комплексы (ПМК): «Лист», «Рулон», «Графика».

ПМК «Лист» предусматривают работу в нескольких режимах как на стадии подготовки производства, так и на стадии изготовления (в режиме действующего производства).

На стадии подготовки производства рассчитывается планируемый расход листового материала с максимальным коэффициентом использования и минимальным его потреблением. Предусмотрено определение планируемого расхода листового материала в нескольких режимах:

1) расчёт группы деталей одного изделия в одном цехе для предварительного анализа коэффициента использования материала и

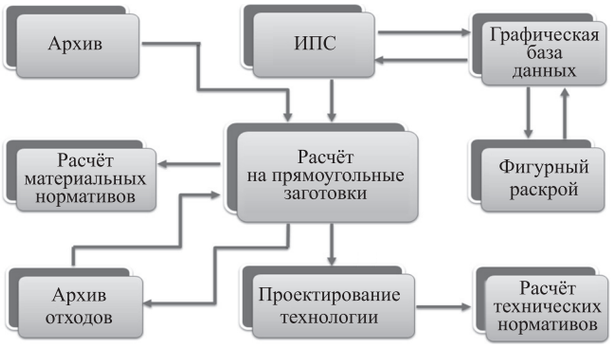


Рис. 1. Архитектура взаимодействия в системе расчёта раскроя

себестоимости изделия осуществляется с помощью системы расчёта по изделию;

2) расчёт группы деталей одного изделия независимо от цеха, где они изготавливаются (связаны между собой применяемостью и единым планом по изделию), производит система закрепления деталей по цехам.

На стадии действующего производства (изготовления) рассматриваются следующие режимы:

1) определение потребности листового материала для группы деталей разных изделий по одному цеху (система расчёта потребности материала), что позволяет обеспечить дальнейшее снижение себестоимости изделий;

2) определение фактического расхода листового материала, осуществляемое в двух направлениях:

расчёт потребности листового материала (система расчёта по производственному плану);

оперативный расчёт раскроя листового материала для дефицитных деталей при поступлении на раскрой материала с характеристиками, не соответствующими заданным по технологии (система оперативного расчёта раскроя материала).

Данный режим позволяет цеховому технологу оперативно составить раскройную карту на замену, обеспечив при этом высокий коэффициент раскроя, а также сократить потери от использования негабаритного материала путём использования отходов металла от раскроя основной детали на раскрой деталей из общей номенклатуры.

ПМК «Рулон» предназначен для проектирования и разработки оптимальных технологий раскроя рулонного материала, предусматривает работу на стадии подготовки производства и в режиме действующего производства. Виды выполняемых работ в ПМК «Рулон» показаны на рис. 2. Комплекс предусматривает решение следующих задач: проектирование схем продольного раскроя материала на прямоугольные заготовки; проектирование схем поперечного раскроя материала на карты (с докроем или без докроя карт на гильотинных ножницах); проектирование схем продольно-поперечного раскроя материала (раскрой рулона на ленты на линии продольной резки с последующей порезкой лент на заготовки на линии поперечной резки).

ПМК «Рулон» позволяет выполнять следующие функции: формирование исходных данных о заготовках, материалах, оборудовании; создание и пополнение базы данных о заготовках, материалах, изделиях, оборудовании с одновременной их корректировкой; автоматизированное проектирование возможных планов размещения заготовок и выбора оптимального варианта раскроя рулонного материала на ленты или технологические карты.

Рис. 2. Системы программно-методического комплекса «Рулон»

Кроме того, ПМК «Рулон» обеспечивает укладку заготовок заданной ширины в рулон с соблюдением требуемой комплектности деталей. Основным принципом раскроя рулона является минимизация отходов. Укладка прямоугольных заготовок в рулон осуществляется в зависимости от направления проката. При проектировании раскроя рулона учитываются технологические ограничения, накладываемые раскройным оборудованием.

Применение математических методов решения задачи оптимизации при проектировании схем раскроя позволяет снизить нормы расхода на изделие. Для сокращения времени подготовки исходных данных пользователю предоставляется возможность обращения к базе данных для получения информации о материалах и заготовках. В процессе проектирования пользователь может контролировать результаты проектирования, с этой целью на экран дисплея выводится схема раскроя рулона с таблицей результатов проектирования по норме расхода.

ПМК «Графика» обеспечивает: создание графического банка данных эскизов деталей и пооперационных эскизов; автоматизированное проектирование оптимальных геометрических размеров заготовки и формирование данных для последующего раскроя на прямоугольные заготовки и проектирования штампов; вычерчивание эскиза детали и схемы раскроя полосы; интерфейс доступа к графической информации при работе в ПМК «Лист» и «Рулон».

Входными данными в ПМК «Графика» являются: геометрия детали, представленная в координатной форме; тип заготовки (полоса, карточка, лента); тип укладки (одноряд-

ная, встречная, двухрядная); максимальная ширина (длина) полосы; ориентация по волокну; перемычка по шагу, ширине и длине; материал (марка, толщина); максимальный угол отклонения и поворота.

Подсистема «Оптимальный раскрой» организуется на предприятиях с массовым серийным и мелкосерийным производством, обеспечивает проектирование схемы раскроя с учётом оптимального плана размещения заготовок на листе, выбор габарита листа, ножниц и более рационального использования отходов (при соблюдении условий комплектности).

Составление плана размещения заготовок на листе производится с учётом основных технологических требований и ограничений: определённое расположение заготовок относительно волокон проката для деталей, подвергающихся дальнейшей гибке; ограничение размеров учитываемых технологических отходов; предварительная отрезка дефектных кромок листа; минимальная ширина зоны прижима листа при его раскрое на данном оборудовании; ограничение длины заготовки (полосы) для тонколистовой стали; ограничение массы заготовки (полосы) для толстолистовой стали и др.

Подсистема «Оперативный раскрой» позволяет осуществить расчёт оперативного раскроя листового материала в условиях действующего производства для дефицитных деталей при замене материала (в случае поступления листового проката от заводов-поставщиков с размерами, не соответствующими заданным по технологии). Процесс проектирования оперативного раскроя листового материала заключается в последовательном выполнении следующих процедур: составление планов размещения заготовок на всех заданных габаритах листа; подбор деталей на остатках; выбор оптимального варианта раскроя с учётом планового количества деталей, которые необходимо раскроить из заданного тоннажа металла данной марки материала по каждому из имеющихся габаритов листа, поступившего на раскрой; формирование выходного документа.

Проектирование раскроя листового материала в условиях серийного и массового производства осуществляется единичным методом, т. е. на листе размещаются заготовки только одного наименования.

Составление плана размещения заготовок на листе производится с учётом направления волокна проката листа, требований техники безопасности, характеристики оборудования и технологических ограничений. Для каждого плана размещения заготовок на листе рассчитывается норма расхода на каждую деталь. Окончательно выбирается исходный вариант размещения заготовок на том габарите листа, для которого норма расхода на данную деталь минимальна. Отходы от раскроя листа рассматриваются как исходный материал для раскроя заготовок другого наименования. Для каждого варианта раскроя основной заготовки рассматриваются несколько схем раскроя заготовок на каждом из остатков. Составление плана размещения заготовок на остатке производится с учётом тех же технологических ограничений, что и при составлении плана размещения заготовок на листе. Выбор оптимального варианта раскроя с учётом комплектности реализуется методом линейного программирования.

В настоящее время на рынке программных продуктов имеется большое количество пакетов по раскрою листового и рулонного материала. Программы хорошо себя зарекомендовали при проектировании раскроя для условий единичного и многономенклатурного мелкосерийного производства, где целесообразно применять групповой метод раскроя материала на различные заготовки произвольной геометрической формы [1].

Однако в условиях крупносерийного и массового производства при индивидуальном раскрое эти программы имеют ограниченное применение. Поэтому для решения задач оптимизации затрат по металлу с применением автоматизированного раскроя в условиях крупносерийного и массового производства необходимо создание новой системы или адаптация применяемых систем.

Предлагаемое программное обеспечение «ПРОМ-2013» [3] предназначено для проектирования раскроя листового материала на плоские прямоугольные заготовки для производства холодноштампуемых деталей. Задача раскроя решается в тесной взаимосвязи с производственными процессами на заготовительном участке, с учётом производственных и технологических ограничений, с применением нового ресурсостоимостного показателя (РСП).

Разработанный программный продукт позволяет произвести экспресс-оценку затрат, связанных с раскроем листового материала, и выбрать оптимальный вариант. «ПРОМ-2013» является самостоятельной программой для оценки эффективности раскроя по затратам на металл и хорошим дополнением к существующим программам по раскрою листового металлопроката.

На основе установленных связей система обеспечивает выполнение следующих функ-

ций: формирование и ввод входных данных о деталях, заготовках, материалах и оборудовании с возможностью их корректировки; проектирование рациональных схем раскроя листа и рулона на гильотинных ножницах и комплексах поперечной резки рулона на прямоугольные (штучные и полосовые) заготовки; расчёт нормативных показателей раскроя (подетальные нормы расхода, коэффициенты раскроя и использования материала); формирование выходных документов.

«ПРОМ-2013» включает в себя две интегрированные системы: справочник деталей и материалов и расчёт оптимального раскроя металлопроката с определением РСП.

Справочник деталей и материалов (рис. 3) сформирован на базе классификаторов действующего производства по деталям, металлу, оборудованию и состоит из двух таблиц: банка данных по деталям (номер детали, наименование детали, марка материала, толщина, масса детали, ширина, шаг подачи, рядность, припуск) и банка данных по сортаменту металлургических комбинатов (марка, толщина листа, размеры листа, масса, количество листов, цена листов от разных поставщиков).

Наглядное представление информации в виде двух объединённых справочников позволяет производить действия над объектами банков данных (создание, удаление, редактирование, просмотр данных) и одновременно отслеживать их взаимодействие. Так, при выборе материала для раскроя в первой таблице во второй формируется список деталей, изготавливаемых из материала заданной марки и толщины листа (рулона). В это же время изменяются данные в первой таблице — на раскрой выдаются только те листы (рулоны), которые были выбраны для расчёта.

При формировании задания на раскрой из справочника материалов, применяемых на заготовительном участке, выбираются листы для раскроя (или добавляется запись листа с новыми размерами) и детали на раскрой. Согласно производственному заданию и с учётом программы выпуска детали выбираются из справочника или добавляется новая запись с информацией о новой детали. Ключевыми параметрами выбора являются толщина и марка материала. После выбора толщины листа программа выдаёт все имеющиеся в справочнике листы заданной толщины. Далее пользователь выбирает марку материала (рис. 4).

При нажатии на кнопку «Материал» появляется таблица со всеми деталями одной группы, изготавливаемыми из материала заданной марки и толщины. Пользователь выбирает деталь на расчёт. Появляющаяся кнопка «Рассчитать» свидетельствует об окончании выбора (рис. 5). Таким образом отбираются листы для задания на раскрой и создания планов раскроя для изготовления заданных деталей. После формирования задания на раскрой выполняется расчёт.

По окончании расчёта появляется окно «Form 9» с вариантами раскроя (рис. 6). Пользователь имеет возможность сравнить резуль-

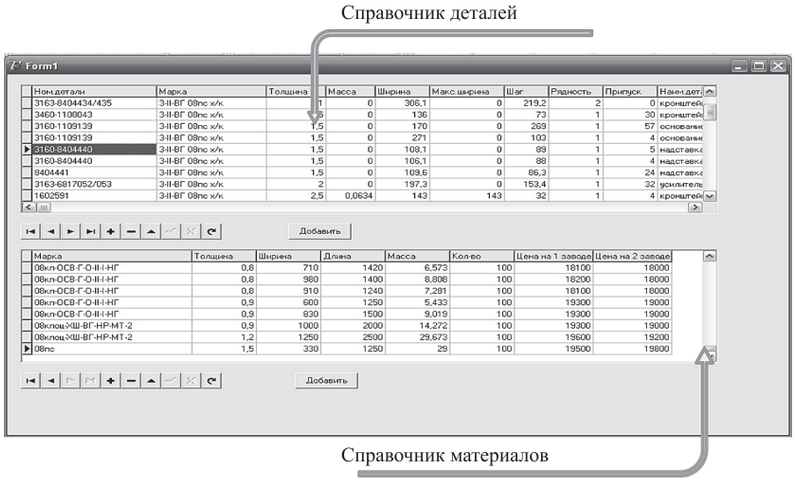


Рис. 3. Справочник деталей и материалов

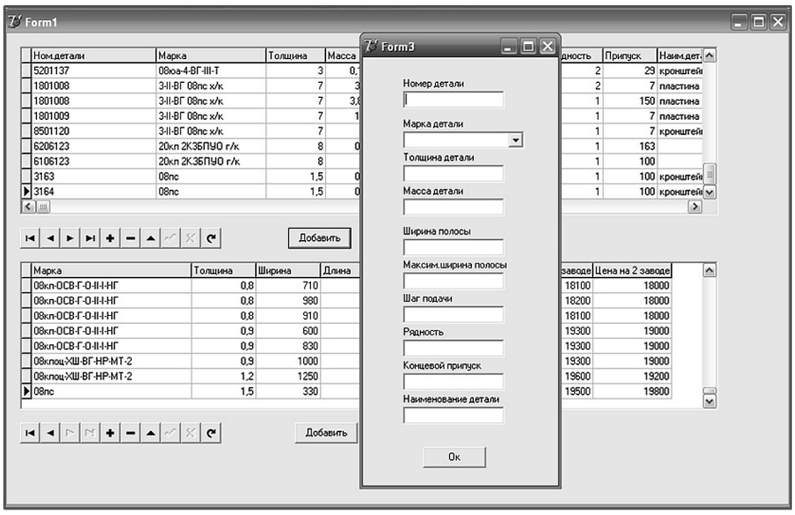


Рис. 4. Выбор детали на раскрой, толщины и марки раскраиваемого материала

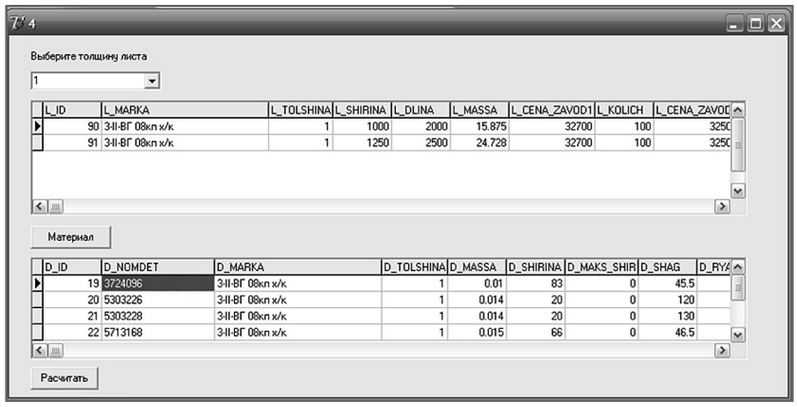


Рис. 5. Пример сформированного задания на раскрой

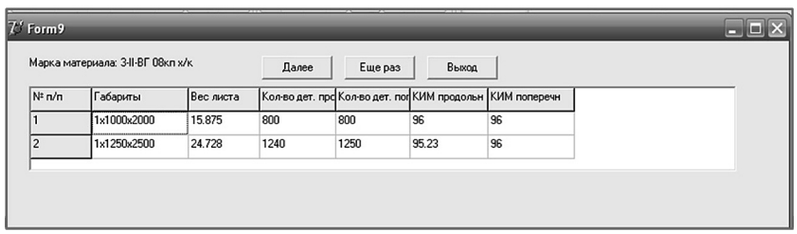


Рис. 6. Результаты расчёта КИМ

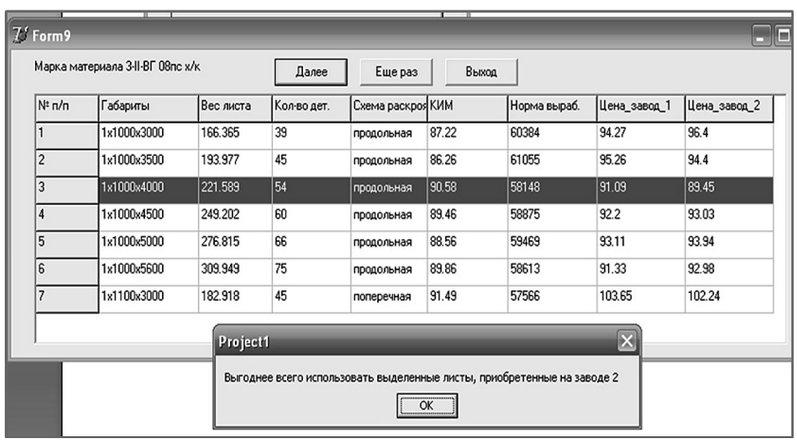


Рис. 7. Итоговый результат с определением КИМ и финансовых затрат

таты раскроя заданных деталей по количеству деталей и КИМ при продольном и поперечном раскрое заданных листов. Итоговый расчёт с оптимальным раскроем листа (наибольшим КИМ и наименьшими финансовыми затратами на одну деталь) представлен в следующем окне (рис. 7).

По результатам выбора самого выгодного раскроя по новому критерию оптимальности РСП формируется раскройная карта. На карте раскроя (рис. 8) показаны укладка деталей в полосе, схема раскроя с указанием сквозных резов и необходимых размеров, численные значения раскроя (КИМ, норма расхода), текстовая информация.

В программе создан полный многоуровневый архив всех результатов расчётов оптимального сортамента. В случае изменения договоров поставки металлопроката, производственных и экономических условий это позволит извлекать и оперировать результатами расчёта одного и того же профиля, а также результатами расчётов всех профилей для быстрого и качественного анализа ситуации и принятия соответствующего решения.

Поэтапно решаются следующие задачи:

подготовка и систематизация полной информации о номенклатуре и сортаменте по всем заводам—поставщикам металлопроката (заполнение, ведение и корректировка банка данных по сортаменту металлургических комбинатов);

формирование на основании подетального плана производства технологически и экономически обоснованного оптимального сортамента листового материала.

Решение указанных задач осуществляется в несколько этапов:

автоматическое проектирование раскроя каждой детали (более 5 тыс.) на каждом габарите листа (более 1 млн позиций) при строгом соблюдении всех технологических требований и ограничений, технических возможностей, налагаемых характеристиками оборудования для порезки листового материала и дальнейшей штамповки или обусловленных другими производственными требованиями;

выбор для каждой детали, независимо от её металлоёмкости, экономически оптимального габарита листа от конкретного металлургического комбината на основании расчётной нормы расхода на деталь и с учётом стоимости габарита на данном комбинате;

формирование оптимального сортамента металлопроката путём исключения из полученного перечня габаритов, не соответствующих требованиям транспортной (монтажной) нормы, и минимизации количества заказываемого материала за счёт применения принципа расчёта, при котором подбор оптимальных габаритов с учётом заготовок всей группы деталей, изготавливаемых из данного материала

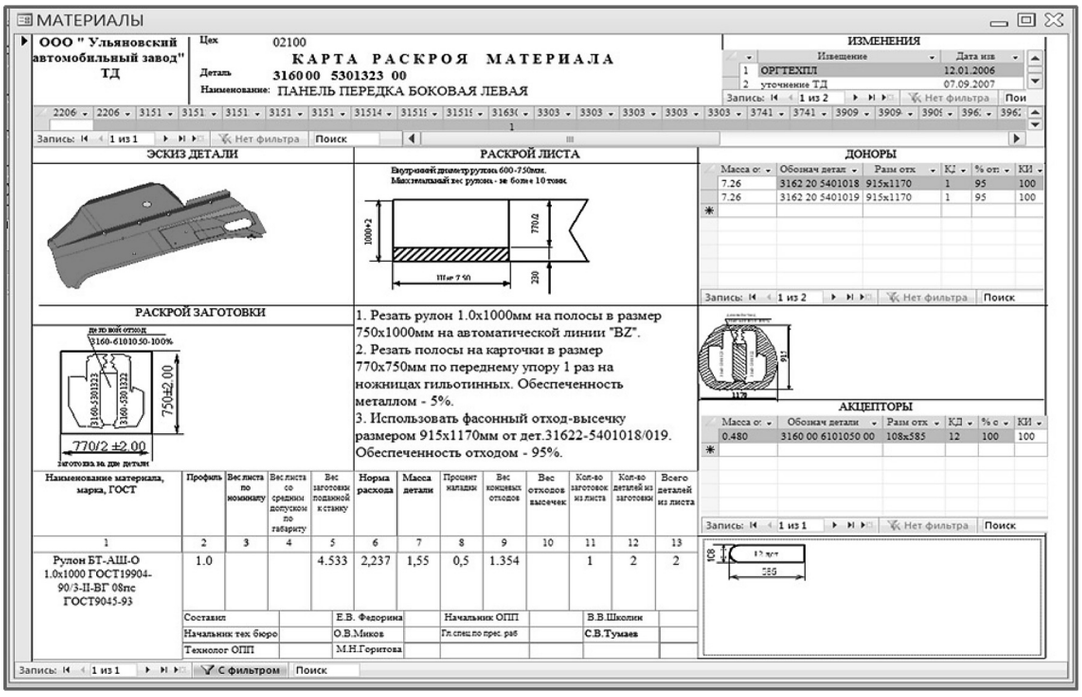


Рис. 8. Карта раскроя

(вместо существующего принципа формирования сортамента листов под габариты основных металлоёмких деталей), что позволяет максимально использовать отходы для раскроя под другие детали данной марки и толщины;

формирование итоговых данных о выбранных габаритах и расчёт потребности в них на основании подетальной годовой программы (материальное нормирование с расчётом подетальных норм расхода листового материала; обеспечение минимизации затрат, связанных с приобретением рулонного материала; оптимизация заказываемого сортамента рулонного материала с использованием полной базы данных, учитывающей стоимостные характеристики).

Заключение. Таким образом, создана математическая модель раскроя, позволяющая вводить изменяющиеся нормы расхода и формировать оптимизированный сортамент. Разработан новый критерий оптимизации раскроя — ресурсостоимостной показатель (РСП). Разработанный программный продукт определяет КИМ, норму расхода, количество деталей, ресурсостоимостной показатель; экономит время при расчёте показателей раскроя за счёт быстродействия; имеет минимальные системные требования. В случае изменения производственных условий и конъюнктуры рынка новый показатель эффективности раскроя позволит осуществить быстрый и качественный анализ ситуации и выбрать максимально выгодное решение с минимальным значением РСП и получить ежегодную экономию порядка 5 — 10 % от затрат на металлопрокат. Программа раскроя металлопроката «ПРОМ-2013» официально зарегистрирована (свидетельство о государственной регистрации программы № 2016611103). Для обеспечения широкого использования и взаимодействия с другими программами (обмена информацией — импорт входной информации по оптимальной укладке деталей в полосе для расчёта оптимизированного проката и стоимостного анализа, экспорт выходной информации в другие программы) необходимо функциональное расширение программы «ПРОМ-2013».

Библиографические ссылки

1. **Бабаев Ф.В.** Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1982. 168 с.

2. **Амбос Э., Нойбауер А., Освальд Ю.** и др. Экономия сырья и материалов. М.: Металлургия, 1989. 255 с.

3. **Кокорин В.Н., Федорина Е.В., Шакирзянов Р.Ф.** Применение программы «ПРОМ-2013» для оценки раскроя металла // Сб. матер. 48-й НТК «Вузовская наука в современных условиях». Ульяновск: УлГТУ, 2014. С. 74—78.

Ссылка для цитирования

Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих технологий раскроя металлопроката в условиях холодноштамповочного производства // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 307—313.

УДК 662.17:623.459

Р.Н. Абдулов
(НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики),
Ф.Г. Аббасзаде
(Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика),
С.А. Меджидова
(Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку)

rauf-abdulov@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ РЕЖИМА РАБОТЫ АЭРОЗОЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРЕГРАЖДЕНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены способы (методы) определения оптимального режима аэрозольного генератора, используемого для создания аэрозольных завес, преграждающих прохождение вредных электромагнитных лучей оптического диапазона. Введены новые показатели (коэффициент относительного ослабления оптического излучения и коэффициент отношения соответствующих видимостей) и показана их взаимосвязь.

Определено условие создания аэрозольной завесы, преграждающей прохождение оптической радиации в широком диапазоне длин оптических волн. Сформулирована и решена оптимизационная задача определения оптимальной взаимосвязи между показателями «параметр формы» и «параметр масштаба» закона гамма-распределения аэрозоля по геометрическому размеру, при которой достигается высокая эффективность преграждения оптических лучей.

Ключевые слова: аэрозольная завеса; электромагнитные лучи; оптимизация; оптическое излучение; распределение частиц.

The methods for determining the optimum mode of an aerosol generator used to create aerosol screens for the passage interception of harmful electromagnetic beams in the optical range are considered. New indicators (the coefficient of relative attenuation of optical radiation and the coefficient of the ratio of the corresponding visibilities) are introduced and their interrelationship is shown. The condition for the creation of an aerosol curtain for the passage interception of optical radiation in a wide range of optical wave lengths is determined. The problem of determining the optimal relationship between the «shape parameter» and «scale parameter» indices for the gamma-law of the aerosol distribution over the geometric size is formulated and solved, at which the high efficiency of the optical radiation interception is achieved.

Keywords: aerosol screen; electromagnetic beams; optimization; optical radiation; particle distribution.

Аэрозольная дымовая завеса выполняет две основные функции: создание помех для прохождения оптических лучей и уменьшение видимости в целях маскировки [1].

Дымовая завеса значительно ослабляет прохождение вредных ультрафиолетовых волн, что может стабилизировать состояние сельскохозяйственного урожая на полях.

Задача оптимального контроля реализации дымовой завесы может быть решена путём цифрового моделирования с использованием метода штрафной функции [1].

Закон распределения геометрических размеров сгенерированных аэрозольных частиц является важнейшей характеристикой создаваемого аэрозольного экрана [2]. При этом используются такие механизмы генерации аэрозоля, как пламенное горение, пиролиз и тление. На рис. 1 показана кривая распределения диаметра сгенерированных аэрозольных частиц.

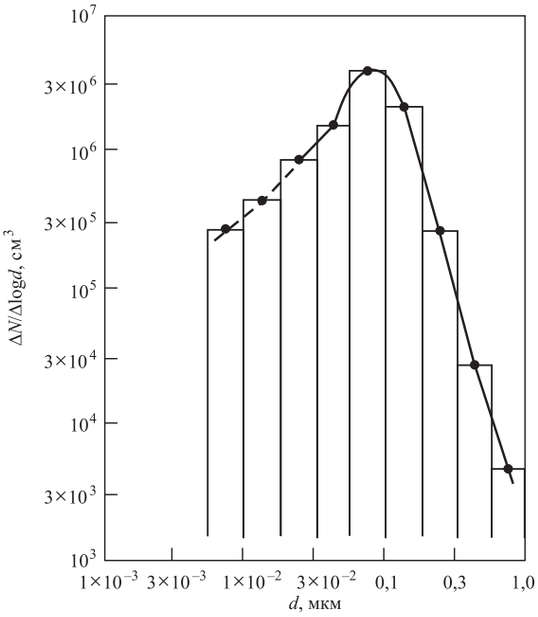


Рис. 1. Кривая распределения диаметра сгенерированных аэрозольных частиц методом тления

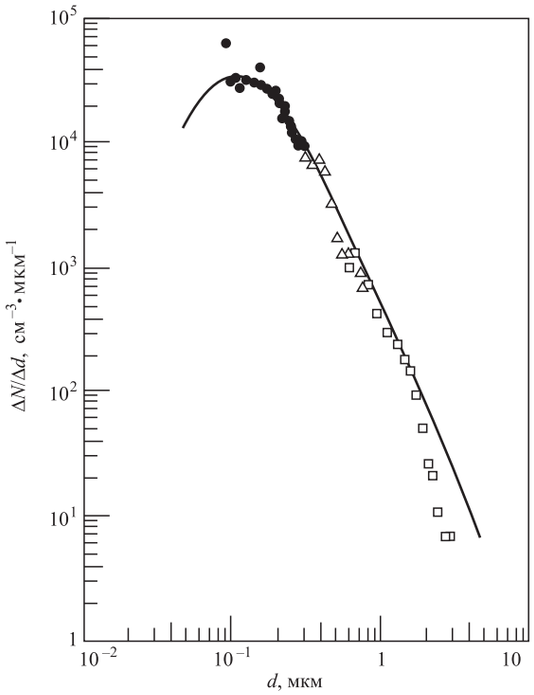


Рис. 2. Кривая распределения диаметра аэрозоля, сгенерированного при тлении целлюлозного материала

Сгенерированный аэрозоль можно представить в виде одномодового аэрозоля, так как при двукратном увеличении (уменьшении) диаметра количество аэрозольных частиц увеличивается (уменьшается) более чем на порядок (рис. 2).

Рассмотрим способы ослабления оптического излучения аэрозольной завесой и ухудшения видимости из-за отражения и поглощения оптического излучения аэрозольными частицами.

Атмосферная видимость на дистанциях менее 6 км определяется по формуле [3]

$$V = \frac{3,91}{\gamma(\lambda)}\left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-q}, \qquad (1)$$

где V — видимость, км; γ — коэффициент ослабления, 1/км; λ — длина волны, мкм; $q = 0,585V^{1/3}$.

Коэффициент ослабления определяется по следующему выражению [4]:

$$\gamma = \int_0^\infty \pi r^2 n(r) Q_{ext} dr, \qquad (2)$$

где r — радиус частицы; $n(r)$ — закон распределения частиц по размеру; Q_{ext} — коэффициент эффективности ослабления.

Отметим, что функция $n(r)$ определяется функцией гамма-распределения, т. е.

$$n(r) = ar^{\alpha}e^{-br}, \qquad (3)$$

где α и b — регулируемые показатели; a — функция α и b.

Эффективный радиус гидрометеорных частиц пропорционален отношению общего объёма частиц к общему геометрическому поперечному сечению этих частиц [4], т. е.

$$r_e = \frac{\int_0^\infty r^3 n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 n(r) dr}. \qquad (4)$$

Допустим, что атмосферный аэрозоль состоит из двух типов аэрозолей, радиусы которых соответственно r_0 и r_1, где $r_0 = 0,1$ мкм (на рис. 1 и 2 $n(r) = \max$; $r_1 > r_0$).

Соответствующие коэффициенты ослабления с учётом выражения (2) составят

$$\gamma_0 = \pi r_0^2 n(r_0) Q_{\text{ext}}; \qquad (5)$$

$$\gamma_1 = \pi r_1^2 n(r_1) Q_{\text{ext}} \qquad (6)$$

при

$$n(r) = ar^{\alpha}e^{-br}, \qquad (7)$$

где α, b — регулируемые коэффициенты; α — параметр формы; b — параметр масштаба.

Введём новый показатель — коэффициент относительного ослабления η, т. е. отношение γ_1/γ_0, которое с учётом выражений (5)...(7) определяется как

$$\eta = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} = \frac{r_1^2}{r_0^2}\frac{r_1^{\alpha}e^{-br_1}}{r_0^{\alpha}e^{-br_0}} = \frac{r_1^{\alpha+2}e^{-br_1}}{r_0^{\alpha+2}e^{-br_0}}. \qquad (8)$$

При этом учитываем, что для частиц Ми Q_{ext} почти не изменяется по величине радиуса. С учётом выражения (1) коэффициент отношения χ видимостей, соответствующих γ_1 и γ_0, определим как

$$\chi^{-1} = \frac{V_1}{V_0} = \frac{\frac{3,91}{\gamma_1}\left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-q}}{\frac{3,91}{\gamma_0}\left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-q}} = \frac{\gamma_0}{\gamma_1} = \frac{1}{\eta}. \qquad (9)$$

С учётом выражений (8) и (9) получим

$$\chi^{-1} = \frac{V_1}{V_0} = \frac{r_1^{\alpha+2}e^{-br_1}}{r_0^{\alpha+2}e^{-br_0}} = (k_1)^{\alpha+2}e^{-b(k_2)}, \quad (10)$$

где

$$k_1 = \frac{r_1}{0}; \;\; k_2 = r_1 - r_0. \quad (11)$$

С точки зрения создания аэрозольной завесы, преграждающей прохождение оптической радиации в широком диапазоне длин волн, при отношении радиуса r_1 к $PM_{2,5}$, а r_0 к $PM_{0,5}$ необходимо добиться минимальной величины χ и, соответственно, максимальной величины η. Это связано с тем, что оптическая плотность частиц определяется по формуле Ангстрёма

$$\tau = \beta\lambda^{-\gamma}, \quad (12)$$

где $$\gamma(PM_{0,1}) > \gamma(PM_{2,5}) \quad (13)$$

при $$\beta(PM_{0,1}) > \beta(PM_{2,5}). \quad (14)$$

Следовательно, $\eta < 1$ и $\chi > 1$.

Таким образом, можно сформулировать задачу минимизации α и b: необходимо обеспечить минимальную величину функционала

$$F_1 = \int_{\alpha=0}^{\alpha_{\max}} k_1^{\alpha+2}e^{-b(k_2)}d\alpha. \quad (15)$$

При наличии функциональной зависимости $b = \psi(\alpha)$ и ограничительного условия

$$F_2 = \int_0^{\alpha_{\max}} \psi(\alpha)d\alpha = C_1; C_1 = \text{const}. \quad (16)$$

Задача решается путём выбора функции $\psi(\alpha)$, при которой F_1 достиг бы минимального значения.

С учётом выражений (15) и (16) составим полный функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$F_3 = F_1 + zF_2 = \\ = \int_0^{\alpha_{\max}} k_1^{\alpha+2}e^{-\psi(\alpha)(k_2)}d\alpha + z\int_0^{\alpha_{\max}} \psi(\alpha)d\alpha, \quad (17)$$

где z — множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (17) находим из следующего условия [5]:

$$F_4 = \frac{d\{k_1^{\alpha+2}e^{-\psi(\alpha)k_2} + z\psi(\alpha)\}}{d\psi(\alpha)} = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получим

$$-k_1^{\alpha+2}e^{-\psi(\alpha)k_2}k_2 + z = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим

$$\beta = \psi(\alpha) = \frac{1}{k_2}\ln\frac{k_2k_1^{\alpha+2}}{z}. \quad (20)$$

Таким образом, при условии (20) функционал (17) достигает экстремального значения.

Для выяснения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта величин в выражении (17), т. е.

$$F_5 = \frac{d^2\{k_1^{\alpha+2}e^{-\psi(\alpha)k_2} + z\psi(\alpha)\}}{d\psi(\alpha)^2} \quad (21)$$

и убедиться, что F_5 всегда положительна.

Следовательно, при решении уравнения (20) функционал F_3 достигает минимального значения.

Для определения множителя Лагранжа учтём уравнение (20) в условии (16). Тогда

$$F_2 = \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{1}{k_2}\ln\frac{k_2k_1^{\alpha+2}}{z}d\alpha = C_1. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим

$$z = \exp\left\{\frac{1}{\alpha_{\max}}\int_0^{\alpha_{\max}} \frac{1}{k_2}\ln\frac{k_2k_1^{\alpha+2}}{z}d\alpha - C_1\right\}. \quad (23)$$

Как видно из выражения (20), в оптимальном режиме между α и b должна существовать линейная зависимость, т. е. рост b должен сопровождаться увеличением α.

Следовательно, оптимальным режимом генерации аэрозольной завесы можно считать такой режим, при котором изменение α и b происходит синфазно, с обеспечением линейной зависимости между α и b.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведённого исследования:

введены новые показатели (коэффициент относительного ослабления оптического излучения и коэффициент отношения соответствующих видимостей) и показана их взаимосвязь;

определено условие создания аэрозольной завесы, преграждающей прохождение оптической радиации в широком диапазоне длин оптических волн;

сформулирована и решена оптимизационная задача определения оптимальной взаимосвязи между показателями «параметр формы» и «параметр масштаба» закона гамма-распре-

деления аэрозоля по геометрическому размеру, при которой достигается высокая эффективность преграждения оптических лучей.

Библиографические ссылки

1. **Cui Ch., Xu Sh., Zhu Zh., Liu F., Zhu X., Huang Sh.** Optimal Control for Smokescreen Release Based on Numerical Simulation: Challenges and Theoretical Framework // Advances in Chemical Engineering and Science. 2015. № 5. P. 158—163.

2. **Mulholland G.W.** Smoke production and properties / In: DiNenno P.J. et al., Editors, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Edition. Chapter 15. Section 2. P. 217—227.

3. **Nebuloni R.** Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog // Applied Optics. 2005. № 44. Vol. 18. P. 3795—3804.

4. **Hulst H.C.** Light Scattering by Small Particles. URL: wiley.com/doi/10.1002/actp.1984.010350426/pdf (access: 30.08.2017).

5. **Эльсгольц Л.Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 342 с.

Ссылка для цитирования

Абдулов Р.Н., Аббасзаде Ф.Г., Меджидова С.А. Оптимальный контроль режима работы аэрозольного генератора для преграждения прохождения оптического излучения // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 314—317.

УДК 628.9.03

А.А. Горбунов, канд. техн. наук
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),
А.С. Микаева, канд. экон. наук, доц., **С.А. Микаева,** д-р техн. наук, проф.
(Московский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Описаны пути освоения новых конструкций люминесцентных ламп и технологий введения в них ртути, обеспечивающие минимизацию использования ртути в лампах и её попадания в окружающую среду и обусловленные необходимостью решения проблемы зартученности при производстве и эксплуатации люминесцентных ламп. Рассмотрены исследования конструкций и технологии изготовления ламп с минимально необходимым количеством ртути, находящейся в связанном состоянии — в виде амальгамы.

Ключевые слова: люминесцентная лампа; ртуть; амальгама; штенгель; колба; конструкция; технология.

The ways of mastering new designs of fluorescent lamps and technologies for introducing mercury in them are described, which ensure minimization of the mercury usage in lamps and its entry into the environment. It is determined by the need to solve the problem of mercury redundant in the production and operation of fluorescent lamps. Studies of designs and technology for manufacturing lamps with the minimum necessary amount of mercury in a bound state, in the form of amalgams, are considered.

Keywords: fluorescent lamp; mercury; amalgam; Stengel; tabulation; flask; design; technology.

В настоящее время можно выделить следующие направления повышения качества и экологичности люминесцентных ламп (ЛЛ) [1].

1. Создание ЛЛ на безртутной основе. В рамках данного направления создавались ЛЛ с использованием разряда в инертных газах, молекулярных газах и парах кадмия. Однако в силу ряда причин, рассмотренных в работе [1], удовлетворительных результатов, соответствующих требованиям серийного и массового производства, пока не получено.

2. Создание ЛЛ с уменьшенным количеством ртути. В рамках данного направления было установлено, что можно уменьшить количество жидкой ртути, вводимой в лампу, перейдя на малые диаметры трубок и малые габариты ЛЛ, — до 3 мг, а также с помощью производства безэлектродных ЛЛ — до 1 мг [1].

3. Создание ЛЛ с использованием ртути в связанном состоянии — в виде амальгам, оксида ртути и пр.

4. Создание ЛЛ с защитными покрытиями. Использование защитных полимерных покрытий на малогабаритных компактных ЛЛ (КЛЛ) [2] и безэлектродных ЛЛ, в которых можно использовать достаточно малое количество ртути, выглядит достаточно перспективно.

Остановимся более подробно на возможности использования в ЛЛ ртути в связанном состоянии. В связанном состоянии ртуть может вводиться в лампы в виде порошка меркурида титана, в виде твёрдых амальгам, в виде оксида ртути. Анализ показывает, что наиболее перспективным является амальгамный метод.

Во-первых, амальгама во время работы лампы способна выделять необходимое количество ртути (к примеру, 0,076 мг в ЛЛ мощностью 40 Вт), а в выключенном состоянии практически полностью поглощать её из объёма лампы.

Во-вторых, утилизация амальгамных ЛЛ представляется более надёжной.

В-третьих, данный метод введения ртути в ЛЛ оказывается предпочтительным в случае ламп, работающих в закрытых светильниках. Он обеспечивает необходимое давление паров ртути в лампе, а следовательно, и максимальный световой поток. При работе же ЛЛ в открытых светильниках используются низкотемпературные амальгамы, которые не нарушают зависимости светового потока от температуры окружающей среды.

Существуют и недостатки данного метода, которые препятствуют широкому производству и применению амальгамных ЛЛ [3]:

повышенное время разгорания (3...5 мин);

малое значение светового потока в момент включения (30...40 % от установившегося значения);

отсутствие термического обезгаживания компонентов амальгамы в процессе производства, что отрицательно сказывается на характеристиках ламп;

изменение состава амальгам в печи откачного полуавтомата, что влечёт за собой разброс характеристик ламп;

ненадёжная конструкция дозаторов амальгамы в откачном полуавтомате.

Конструктивно амальгамные ЛЛ различаются местом расположения и химическим составом амальгам [4]. Наиболее характерные места расположения амальгам в ЛЛ — внутренняя поверхность колбы, удлинённая ножка и штенгель ламп.

Технологический процесс изготовления ЛЛ с амальгамой, расположенной в штенгеле, является более предпочтительным, так как удовлетворяет всем основным требованиям массового производства ламп. Однако такое расположение амальгамы предполагает её введение на откачном полуавтомате специальными дозаторами амальгам. Количество амальгамы в полуавтомате достаточно для его работы в течение одной или даже двух смен. Введение амальгамы в лампу проводится на том же этапе обработки, на котором обычно вводится ртуть, т. е. уже в остывающую лампу при температуре 250...300 °С, что требует жёсткого соблюдения вакуумной гигиены при изготовлении и загрузке амальгам (амальгама не должна прогреваться до 400 °С).

Состав амальгамы может изменяться (обедняться ртутью) в течение смены (двух смен) за счёт постоянной откачки ртути из дозатора. Дозатор охлаждается, что не будет способствовать стабильности температурных характеристик ламп.

Для улучшения обезгаживания амальгамы, а также исключения дозаторов в полуавтомате откачки предлагается дозировать амальгаму в штенгель или в объём лампы до её поступления в откачной полуавтомат, что в перспективе позволило бы использовать только один дозатор — перед откачным полуавтоматом.

Для исключения испарения ртути из амальгамы при нахождении лампы в печи откачного полуавтомата предлагается амальгамы помещать в специальный контейнер. Данная технология актуальна именно для низкотемпературных амальгамных ЛЛ.

На базе ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина» были изготовлены экспериментальные образцы ламп типа ЛБА20 с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия. Эти образцы ламп использовали для определения температурных и временны́х зависимостей параметров ламп, исследования процесса стабилизации их характеристик и выявления возможности сокращения времени разгорания.

В качестве низкотемпературной амальгамы применяли амальгаму состава 70 % Pb + + 30 % Hg, в качестве высокотемпературной — амальгаму состава 43 % Cd + 35 % Pb + + 5,5 % Bi + 7 % Sn + 9,5 % Hg.

Было изготовлено 12 ламп типа ЛБА20. По конструкции экспериментальные лампы ана-

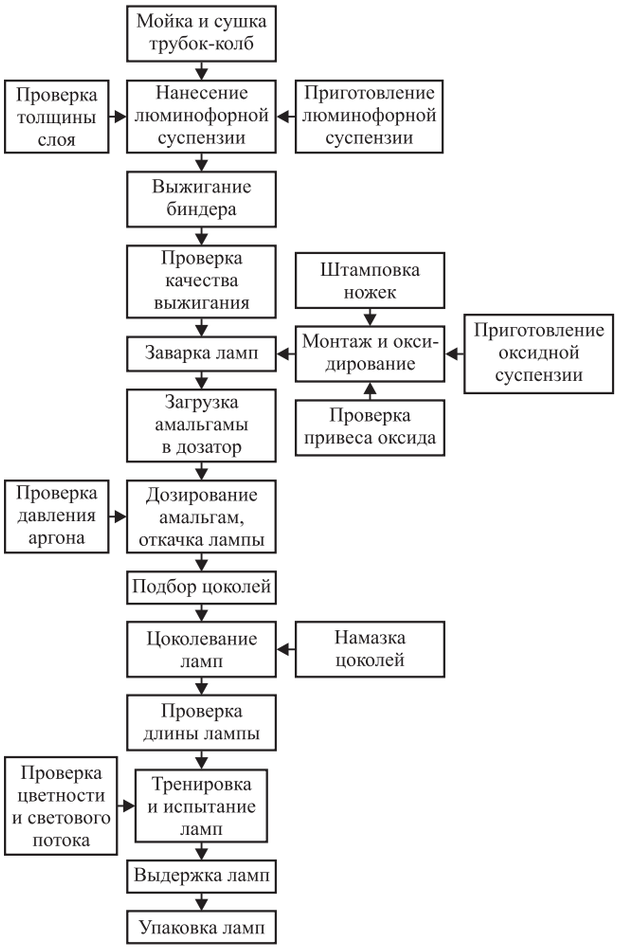


Схема технологического процесса изготовления амальгамной ЛЛ типа ЛБА20 с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия

логичны лампам типа ЛБ20, за исключением наличия амальгамы вместо ртути.

Технология изготовления ламп в отличие от промышленной имела следующие особенности:

откачку ламп проводили на откачном посту, снабжённом дозатором амальгамы, при этом для ЛЛ с низкотемпературной амальгамой амальгаму вводили непосредственно в объём лампы, а для ЛЛ с высокотемпературной амальгамой в штенгель лампы перед откачкой помещали трубочку из стекла, препятствующую прохождению амальгамы в объём лампы (амальгама в штенгеле);

амальгаму вводили в лампу, прошедшую термовакуумную обработку и охлаждённую до комнатной температуры.

Схема технологического процесса изготовления амальгамных ЛЛ с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия представлена на рисунке.

Разработанная конструкция амальгамных ЛЛ обеспечивает введение амальгамы в лампу в контейнерах, препятствующих испарению ртути из амальгамы во время нахождения ламп в печи откачного полуавтомата. При этом, с одной стороны, амальгама нагревается и обезгаживается, а с другой — малое испарение из неё ртути способствует стабильности состава амальгамы и, как следствие, стабильности (минимальному разбросу) характеристик ламп.

Усовершенствованная технология производства ЛЛ позволяет вместо дозаторов ртути на каждой позиции откачного полуавтомата использовать всего лишь один дозатор амальгамы перед откачным полуавтоматом.

Предложенные конструкторско-технологические решения могут быть использованы на предприятиях, производящих ЛЛ, при организации производства экологически безопасных, энерго- и ресурсосберегающих ЛЛ.

Библиографические ссылки

1. **Федоренко А.С., Абрамова Л.В.** О повышении экологичности разрядных ламп и светоизлучающих систем с их применением // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. / под ред. проф. Л.В. Абрамовой. Саранск: СВМО, 2002. С. 254—259.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Повышение качества компактных люминесцентных ламп // Стекло и керамика. 2015. № 10. С. 38—40.

3. **Охонская Е.В., Федоренко А.С.** Расчёт и конструирование люминесцентных ламп. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1997. 184 с.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Металлокерамический припой для натриевых ламп высокого давления // Стекло и керамика. 2014. № 8. С. 35—36.

Ссылка для цитирования

Горбунов А.А., Микаева А.С., Микаева С.А. Исследования по повышению качества и экологичности люминесцентных ламп // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 317—319.

Уважаемые читатели!

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

УДК 629.78: 004.94

Л.Ф. Ноженкова, д-р техн. наук, проф., **О.С. Исаева,** канд. техн. наук,
А.А. Евсюков, канд. техн. наук
(Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск)

expert@icm.krasn.ru

РАЗРАБОТКА ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработана проблемно-ориентированная инфраструктура имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических систем на основе международного стандарта «Simulation Model Portability». Она позволяет создавать, интегрировать и совместно использовать имитационные модели различного назначения, в том числе разных производителей. Инфраструктура включает в себя программные компоненты, спецификации, имитационные модели, результаты экспериментов и базы знаний, консолидирующие опыт экспертов по созданию бортовой аппаратуры космических систем.

Ключевые слова: стандарт переносимости имитационных моделей; космический аппарат; бортовая аппаратура; командно-измерительная система; инфраструктура имитационного моделирования.

A problem-oriented infrastructure for simulation modeling on-board equipment of space systems on the grounds of the international standard «Simulation Model Portability» is developed. It allows creating, integrating and jointly utilizing simulation models for various purposes, including models of the different manufacturers. The infrastructure includes software components, specifications, simulation models, experimental results and knowledge bases that consolidate the experience of experts in the development of onboard equipment for space systems.

Keywords: standard of portability of imitation models; spacecraft; on-board equipment; command-measuring system; simulation modeling infrastructure.

Введение. Унификация производства космической техники требует соответствующих подходов к программным инструментам, поддерживающим жизненные циклы её производства. Европейская корпорация по стандартизации в области космической техники разработала ряд стандартов, рекомендующих применение технологии компьютерного моделирования для сопровождения всех этапов реализации космических проектов [1]. Для различных задач проектирования и производства разрабатываются имитационные модели, которые отражают необходимые характеристики и свойства космических систем. Чтобы обеспечить построение и использование сложных, многокомпонентных имитационных моделей, показывающих особенности работы программно-аппаратных комплексов, необходимо повысить интегрируемость отдельных моделей в комплексные решения. Актуальным направлением исследований в этой связи становится создание библиотек многоразовых моделей и технологий их совместного использования, независимо от инструментов моделирования, в которых они были построены. Базовые принципы, обеспечивающие интегрируемость моделей разных производителей, задаются в международном стандарте «Simulation Model Portability» (SMP2) [2]. Стандарт определяет универсальные подходы к организации систем моделирования для построения имитационных моделей и их переносимости между средами моделирования и операционными системами.

Программные среды, реализующие стандарт SMP2, называются инфраструктурами имитационного моделирования (Simulation Infrastructures). В современной литературе описан ряд таких инфраструктур. К наиболее крупным и значимым проектам относятся SimTG — Astrium Satellites [3], SimSAT — European Space Agency [4], симулятор Европейского центра управления полётами SWARMSIM [5]. Каждый проект, основанный на стандарте, отличается собственными технологическими подходами к построению моделей и проведению имитационных экспериментов.

В данной работе авторы представляют результаты своих исследований по созданию проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических систем, основанной

на стандарте SMP2. В инфраструктуре реализованы архитектурные и функциональные требования, заложенные в стандарте SMP2. Помимо этого разработаны оригинальные инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования. Инструменты информационно-графического моделирования позволяют в графическом виде задавать структуру моделируемой системы, визуализировать в процессе симуляции поведение модели и возникающие в ней события взаимодействия бортовых систем: передачу пакетов команд и импульсов, формирование и анализ телеметрии. Инструменты интеллектуального моделирования позволяют в интерактивном режиме создавать правила функционирования модели, описывающие логику взаимодействия бортовых систем в терминах предметной области. Такая возможность обеспечивает простоту построения и модификации имитационных моделей.

Инфраструктура имитационного моделирования, интегрирующая информационно-графические, интеллектуальные и имитационные методы, удовлетворяющая принципам стандарта переносимости имитационных моделей SMP2, является оригинальной и перспективной для поддержки конструирования бортовой аппаратуры космических систем.

Задачи инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры. Разработанная инфраструктура имитационного моделирования позволяет решать основные задачи конструирования бортовой аппаратуры космических систем, в которые входят поддержка проектирования и анализ конструкторских решений на разных этапах жизненного цикла производства. Технологически задачи можно представить в виде последовательности действий: построение модели, создание сценария, имитационное моделирование, визуализация и анализ результатов, сохранение результатов. Функциональная диаграмма инфраструктуры моделирования показана на рис. 1.

Построение модели включает в себя создание структуры моделируемой бортовой системы, выделение подсистем, составляющих модель, и их функциональных зависимостей. Инфраструктура предоставляет конструктору бортовой аппаратуры возможность строить модели функционирования космических систем, применяя готовые модели оборудования разных производителей или создавая собственные в специализированной среде, не требующей от него дополнительных навыков программирования. Модели сохраняются в банке моделей, который объединяет различные способы их реализации. Разработана технология интеграции моделей [6], которая позволяет строить комплексные модели больших систем путём объединения моделей на основе правил и моделей SMP2 в единое решение. Различные способы реализации моделей приводятся к унифицированному виду инструментами информационно-графического моделирования, что позволяет применять одни и те же подходы и программные инструменты подготовки, выполнения имитационных экспериментов, а также визуализации и анализа результатов моделирования.

Подготовка имитационных экспериментов выполняется в подсистеме создания сценариев. На основе сценариев проводятся имитационные эксперименты. Программное ядро инфраструктуры моделирования позволяет выполнять модели SMP2 и делать логические выводы на основе базы правил. Кроме того, в его функции входят получение и анализ результатов моделирования. Визуализация выполняется инструментами информационно-графического моделирования, позволяющими на графической структуре модели отображать изменения состояния её элементов и получаемые данные. Результаты моделирования сохраняются в банке моделей, сценариев и результатов. Программное обеспечение при сохранении данных в банке сопоставляет модели и результаты моделирования и позволяет восстанавливать не только текущее состояние модели, но и состояния, актуальные на момент моделирования.

Структура и функции программного обеспечения. Схематично структура программного обеспечения представлена на рис. 2. Поскольку разработкой отдельных подсистем моделируемой бортовой аппаратуры и использованием готовых моделей могут заниматься различные структурные подразделения одного или нескольких предприятий, программное обеспечение предполагает специализированные функции для конструкторов моделей и инженеров-

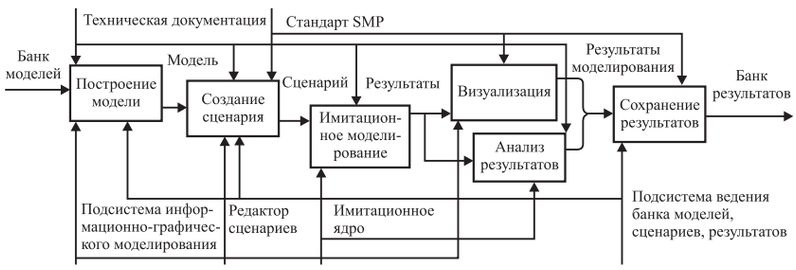


Рис. 1. Инфраструктура и задачи имитационного моделирования

конструкторов бортовой аппаратуры. Программное обеспечение содержит развитые средства навигации по моделям, сценариям и результатам моделирования, поддерживая их взаимосвязь, что позволяет легко выбирать, выполнять и просматривать готовые модельные решения.

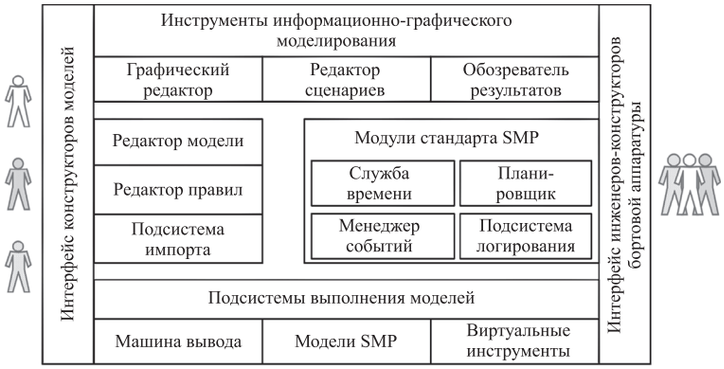


Рис. 2. Структура программного обеспечения

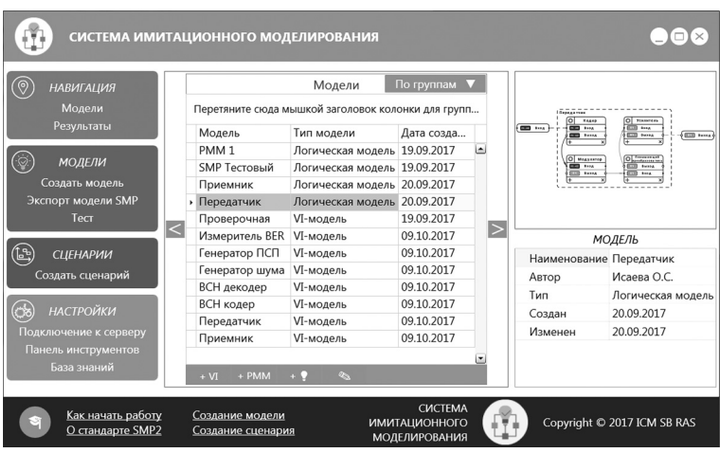


Рис. 3. Главное окно инфраструктуры имитационного моделирования

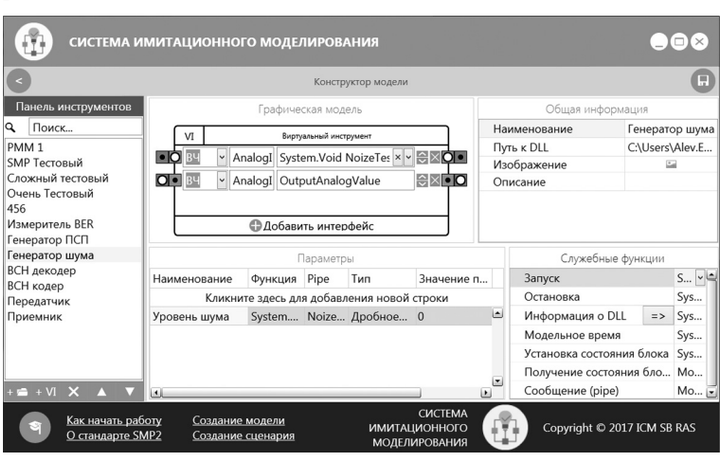


Рис. 4. Пример представления модели в инфраструктуре моделирования

Программное обеспечение содержит подсистемы для работы с моделями, соответствующие требованиям стандарта SMP2, что позволяет интегрировать модели, построенные по данному стандарту в единые комплексные решения. Кроме того, оно содержит дополнительные инструменты для информационно-графического и интеллектуального моделирования. Инструменты информационно-графического моделирования встроены во все основные подсистемы для решения задач импорта моделей, их интеграции, создания сценариев испытаний, визуализации и анализа имитационных экспериментов.

Все модели, независимо от способа их реализации, представлены в банке моделей и сценариев. Выбранные из банка модели или сценарии можно открывать в окне просмотра. Визуальные инструменты инфраструктуры имитационного моделирования позволяют графически представлять структуру моделируемой системы и выполнять декомпозицию моделей на подмодели. На рис. 3 показан вид главного окна инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

На рис. 4 показан пример представления модели в инфраструктуре имитационного моделирования. Здесь представлена графическая модель, для которой в редакторе задаются входные и выходные коммутационные интерфейсы и перечень дополнительных параметров.

Модели описывают различные варианты реализации бортового оборудования космических систем. Для каждого элемента модели может быть выполнена детализация, включающая формирование структуры подмоделей и определение коммутационных интерфейсов, которые будут имитировать информационное взаимодействие между этими подмоделями. Пример детализации модели приведён на рис. 5.

Логика работы модели может описываться в виде правил «Если условие, то действие». Такое интеллектуальное моделирование позволяет задавать поведение элементов модели и их реакции на входные воздействия. Пример правил функционирования имитационной модели бортовых систем показан на рис. 6.

Реализация в программном обеспечении методов информационно-графического и интеллектуального модели-

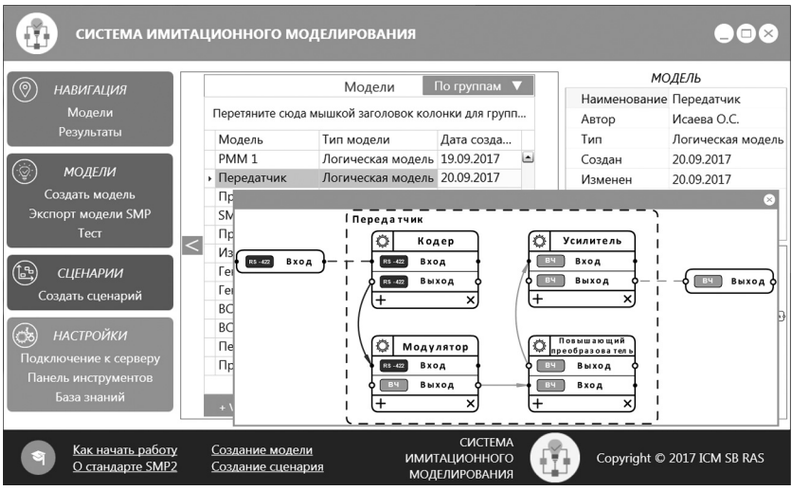


Рис. 5. Пример детализации модели в инфраструктуре моделирования

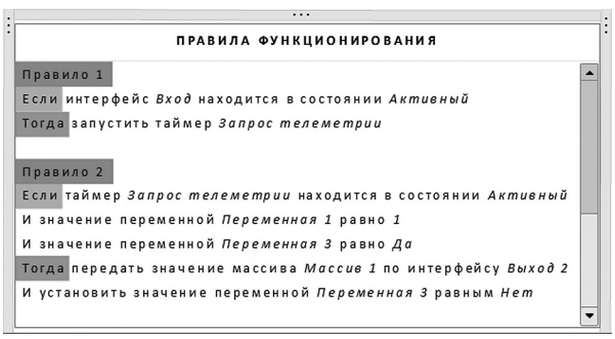


Рис. 6. Пример правил функционирования имитационной модели

рования выгодно отличает разрабатываемую инфраструктуру от существующих. Ранее инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования прошли апробацию на предприятии—изготовителе спутниковых систем для построения модели функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата [7]. Внедрение их в инфраструктуру имитационного моделирования расширит её возможности и позволит инженеру-конструктору строить модели космических систем, оперируя терминами и понятиями предметной области, обеспечивая удобство работы и минимизируя возможные ошибки.

Заключение. Внедрение проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования, основанной на стандарте Simulation Model Portability, позволит строить различные модели космических систем. Разработанное программное обеспечение содержит все необходимые компоненты, поддерживающие интегрируемость и переносимость имитационных моделей. Структура программных подсистем дополнена оригинальными инструментами информационно-графического и интеллектуального моделирования, которые обеспечивают формирование, сохранение и тиражирование уникального опыта и знаний специалистов-конструкторов бортовой аппаратуры. Использование средств моделирования позволит повысить качество и обоснованность конструкторских решений на разных этапах жизненного цикла производства космической техники. Формирование централизованных банков моделей и сценариев моделирования обеспечит обмен знаниями между специалистами различных подразделений и направлений приборостроения космической отрасли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-41-242042.

Библиографические ссылки

1. **Space** engineering. System modelling and simulation // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. 2010.

2. **Simulation** modelling platform**.** ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherland, 2011. P. 49.

3. **Cazenave C., Arrouy W.** Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure. SESP 2012: Simulation and EGSE for space programmes. ESTEC. Noordwijk, 2012. P. 13.

4. **Sarkarati M., Merri M., Spada M.** Cloud based architectures in ground systems of space missions. GSW 2013. ESA, 2013. P. 14.

5. **Fritzen P., Segneri D., Pignede M.** SWARMSIM — The first fully SMP2 based Simulator for ESOC. Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmes. ESTEC. 2010. P. 7.

6. **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С.** Метод проблемно-ориентированной интеграции имитационных моделей // Информатизация и связь. 2017. № 4. С. 124—128.

7. **Исаева О.С., Грузенко Е.А., Вогоровский Р.В., Колдырев А.Ю.** Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 58—64.

Ссылка для цитирования

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. Разработка проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 320—323.

УДК 681.5

С.В. Поршнев, д-р техн. наук, проф., **И.А. Корелин**
(Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

korelin.ivan@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОНТРОЛЬНО-ПРОПУСКНЫХ СИСТЕМ, ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА АППРОКСИМАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАЯВОК

Исследованы проблемы получения оценок количественных показателей функционирования контрольно-пропускных устройств объектов проведения массовых мероприятий как нестационарных систем массового обслуживания (НСМО). Продемонстрирована возможность вычисления количественных характеристик данных НСМО и получены статистически обоснованные оценки длительности интервалов кусочно-постоянной аппроксимации зависимости интенсивности прибытия посетителей футбольных матчей на стадионы от времени.

Ключевые слова: нестационарные системы массового обслуживания; дискретно-событийное моделирование.

The problems of obtaining estimates of the functioning quantitative indicators for control-throughput devices of mass events objects as non-stationary mass service systems (NMSS) are investigated. The possibility of calculating the quantitative characteristics of the NMSS data was demonstrated and statistically grounded estimates of the intervals duration of the piecewise constant approximation of the relation from time the visitors arrival intensity to football matches on the stadiums were obtained.

Keywords: non-stationary mass service systems; discrete-event modeling.

Введение. Проблема обеспечения безопасности посетителей массовых мероприятий (футбольные матчи, концерты и т. п.) несмотря на накопленный опыт её решения остаётся актуальной и сегодня [1]. Ошибки, допущенные на этапах создания подобных объектов и/или при организации массовых мероприятий, могут привести к потере человеческих жизней. В этой связи актуальной является разработка научно обоснованных подходов, позволяющих создателям объектов проведения массовых мероприятий и их организаторам обеспечить требуемый уровень безопасности.

Неотъемлемой частью объектов проведения массовых мероприятий являются информационные контрольно-пропускные системы (ИКПС), обеспечивающие доступ посетителей на объект и выход с объекта по окончании мероприятия, правильный выбор конфигураций, технического и информационного обеспечения которых является одним из необходимых условий обеспечения безопасности посетителей. С математической точки зрения ИКПС относятся к нестационарным системам массового обслуживания (НСМО) [2], у которых зависимость интенсивности поступления заявок на обслуживание от времени описывается функцией $\lambda = \lambda(t)$.

Первые результаты систематических исследований особенностей функционирования ИКПС объектов проведения массовых мероприятий приведены в работе [3]. Здесь на основе анализа статистической информации, собранной во время проведения 14 футбольных матчей на стадионах «Петровский» (г. Санкт-Петербург), «Металлург» (г. Самара) и Центральном стадионе (г. Екатеринбург), предложены имитационные модели как отдельного турникета, так и ИКПС в целом. Программные реализации данных имитационных моделей [4, 5] на основе использования информации о времени, соответствующем началу и окончанию обслуживания посетителей выбранного массового мероприятия, обеспечивают генерацию входных потоков, характеристики которых оказываются близкими к соответствующим характеристикам реальных потоков, и позволяют определять количественные характеристики исследуемой НСМО.

В связи с тем, что при использовании описанного подхода используется экспериментальная информация, зарегистрированная

во время проведения конкретного массового мероприятия, результаты моделирования оказываются не универсальными, а «привязанными» к данному конкретному массовому мероприятию. Отметим, что потенциально для преодоления указанного недостатка можно использовать известные математические методы описания НСМО [2], которые позволяют для некоторых конкретных типов НСМО получать аналитические зависимости, описывающие изменения состояния НСМО во времени [6]. Однако к данным типам НСМО контрольно-пропускные устройства объектов проведения массовых мероприятий не относятся. В этой связи в работе [7] в развитие подхода [8] предложена имитационная модель НСМО, в которой использована кусочно-постоянная аппроксимация зависимости $\lambda = \lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lambda_i = \mathrm{const}_i, \qquad (1)$$

где $t \in (ts_i, te_i]$, $i = \overline{1, H}$; H — число участков усреднения; ts_i — начало интервала; te_i — конец интервала кусочно-постоянной аппроксимации зависимости $\lambda = \lambda(t)$.

Из выражения (1) видно, что на каждом i-м интервале кусочно-постоянной аппроксимации зависимости $\lambda = \lambda(t)$ от времени ts_i до момента te_i НСМО рассматривается как стационарная система массового обслуживания (ССМО), на вход которой поступает поток заявок с интенсивностью λ_i, а её начальное состояние соответствует конечному состоянию ССМО на (i–1)-м интервале кусочно-постоянной аппроксимации, на вход которой поступал поток заявок с интенсивностью λ_{i-1} (рис. 1). Адекватность данной имитационной модели была подтверждена результатами моделирования НМСО, у которой зависимость $\lambda = \lambda(t)$ подобна реальным зависимостям интенсивности прибытия посетителей футбольных матчей на стадионы.

Отметим, что результаты, полученные в работе [7], опровергают утверждение о невозможности исследования динамики НСМО [6, С. 7—8] с помощью выбранного подхода. Более того, в работе [7] показано, что удаётся вычислить зависимости от времени макроскопических количественных характеристик, смысл которых понятен не только специалистам в области НСМО, но и проектировщикам подобных систем и организаторам массовых мероприятий (числа посетителей, прошедших через ИКПС, от времени $N(t)$; длины очереди на входе ИКПС от времени $L(t)$, длительности ожидания в очереди от времени $\tau^w(t)$ и т. д.). В свою очередь результаты анализа данных зависимостей показали, что для описания такого типа НСМО можно использовать максимальную длину очереди на обслуживание $\overline{L}_{\max}$, число посетителей, прошедших на стадион к началу массового мероприятия N_0, максимальное время ожидания в очереди $\overline{\tau^w_{\max}}$ и др. При этом зависимости этих характеристик от параметров входного потока (времени начала поступления заявок, максимальной интенсивности поступления заявок, времени окончания поступления заявок) и обслуживающего устройства (интенсивности обслуживания заявок) описываются детерминированными функциями.

Из рис. 1 следует, что точность используемой кусочно-постоянной аппроксимации зависит от количества используемых интервалов кусочно-постоянной аппроксимации K.

Принимая во внимание отмеченное свойство кусочно-постоянной аппроксимации зависимости $\lambda = \lambda(t)$, значения оцениваемых макроскопических характеристик НСМО также зависят от используемого числа интервалов кусочно-постоянной аппроксимации K. В этой связи актуальным является исследование влияния длительности интервалов кусочно-постоянной аппроксимации на макроскопические характеристики НСМО с выбранными видами зависимостей интенсивности поступления заявок от времени $\lambda = \lambda(t)$. Далее приведены результаты исследования данной проблемы.

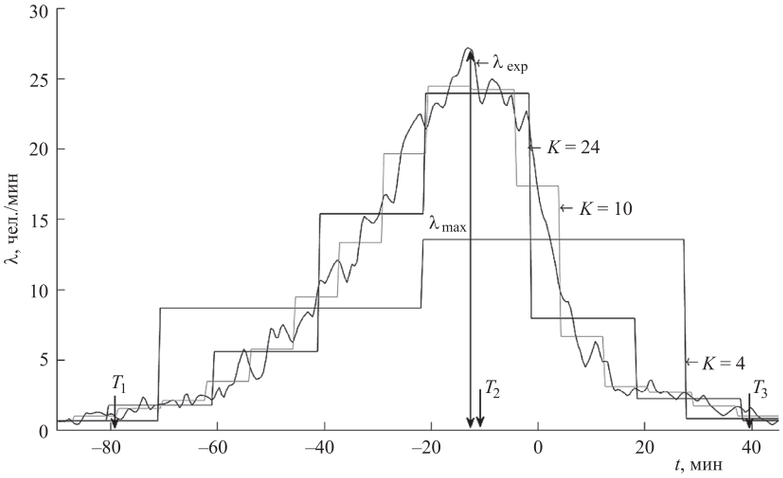


Рис. 1. Кусочно-постоянная аппроксимация зависимости $\lambda = \lambda(t)$ для K = 4, 10 и 24

Методика моделирования ИКПС. При описании зависимостей интенсивности поступления заявок на вход НСМО $\lambda = \lambda(t)$ были использованы семейства функций, которые на временном интервале $[T_1, T_2]$ ($T_1 = -80$ мин, $T_2 = -10$ мин) возрастали по квадратичному закону от 0 до λ_{max}, далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ ($T_3 = 40$ мин) квадратично убывали от λ_{max} до 0. При этом параметр λ_{max} варьировался в диапазоне [18...32] чел./мин с постоянным шагом 0,8 чел./мин, значения T_1, T_2 и T_3 оставались неизменными, а параметры парабол выбраны таким образом, чтобы общее число вошедших $N \left(N = \int_{T_1}^{T_3} \lambda(t)\,dt \right)$ для каждого значения λ_{max} составляло 1400 чел. (рис. 2).

В проведённых вычислительных экспериментах использована кусочно-постоянная аппроксимация функций $\lambda = \lambda(t)$ на интервале $[T_1, T_3]$ при $K \in \{2, 4, 8, 16, 32, 64, 100, 154, 205, 308, 616, 1232\}$.

Для обслуживания очереди посетителей осуществлялась политика FIFO (firs in — fist out, первый вошёл — первый вышел). Скорость обслуживания поступающих заявок определялась интенсивностью обслуживания $\bar{\mu}$, описываемой случайной величиной с плотностью вероятности

$$p\{\xi\} = \begin{cases} 0 \text{ при } \xi < 1; \\ \dfrac{2}{9(M[\xi]-1)}(\xi - 1) \text{ при } 1 \leqslant \xi < M[\xi]; \\ \dfrac{2}{9(M[\xi]-10)}(\xi - 10) \text{ при } M[\xi] < \xi \leqslant 10; \\ 0 \text{ при } \xi > 10, \end{cases} \quad (2)$$

где $\xi \in [1, 10]$.

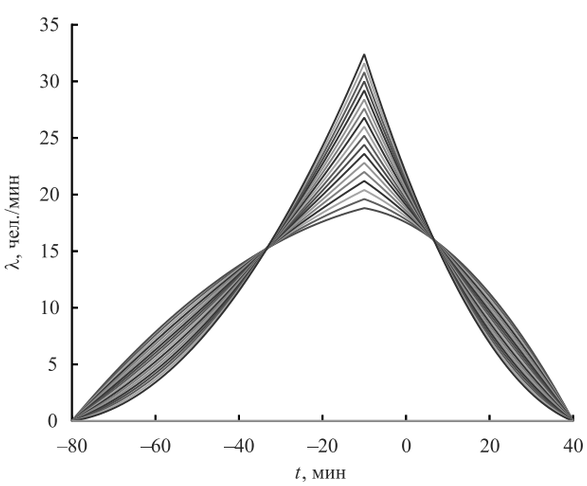


Рис. 2. Зависимости $\lambda(t)$ НСМО (начало мероприятия $t = 0$)

В данном исследовании выбран такой закон распределения, что $M[\xi] = 4$ с и $\bar{\mu} = 15$ чел./мин.

Блок-схема алгоритма, использовавшегося при проведении статистического моделирования, подробно описана в работе [7]. На каждом интервале кусочно-постоянной аппроксимации в интервале $(ts_i, te_i]$ генерировалось время поступления заявки t_A — случайные числа с экспоненциальным законом распределения и интенсивностью, равной среднему значению интенсивности поступления заявок на данном интервале кусочно-постоянной аппроксимации. Длительность времени обслуживания каждой заявки τ^s генерировалась как случайное число с плотностью распределения (2). Далее для каждой заявки вычисляли время t_E, когда она поступила на обслуживание. Для этого поочередно просматривали все заявки, находящиеся в очереди на обслуживание на данном интервале. При этом очевидно, что для первой заявки $t_{E_1} = t_{A_1}$:

$$t_{E_i} = \begin{cases} t_{A_i} \text{ при } t_{A_i} > t_{E_{i-1}} + \tau_{i-1}^S; \\ t_{A_i} + (t_{E_{i-1}} + \tau_{i-1}^S - t_{A_i}) \\ \text{при } t_{A_i} < t_{E_{i-1}} + \tau_{i-1}^S. \end{cases} \quad (3)$$

В работе [5] показано, что для количественного описания динамики изучаемой НСМО следует использовать:

зависимость длины очереди посетителей (в терминах СМО — длины очереди заявок) от времени:

$$L = L(\lambda_{max}, t_k, K) = |Q|, \quad (4)$$

где $Q = \{q_n : t_{A_n} < t_k \cap t_{E_n} > t_k\}$;

среднюю длительность ожидания посетителя (в терминах СМО − заявки) в очереди от времени:

$$\tau^w = \tau^w(\lambda_{max}, t_k, K) = \frac{\sum_{i=1}^{|Q|}(t_{E_i} - t_{A_i})}{|Q|}, \quad (5)$$

где $Q = \{q_n : t_{E_n} \leqslant t_k \cap t_{E_n} > t_{k-1}\}$; $t_k = T_1 + \frac{T_3 - T_1}{K}(k-1)$; $k = \overline{1, P}$, P — количество отсчётов, используемых для изучения процесса обслуживания;

число вошедших посетителей к началу матча:

$$N_0 = N_0(\lambda_{max}, K) = |Q|, \quad (6)$$

где $Q = \{q_n : t_{E_n} < t = 0\}$;

время, необходимое для обслуживания всех входящих посетителей:

$$T_{All} = T_{All}(\lambda_{\max}, K) = \{t: N(t) \geqslant 0,97 N_{\max}\}, \quad (7)$$

где $N_{\max} = \max[N(t)]$.

Так как при моделировании использовался метод Монте-Карло, в качестве значений функции характеристик НСМО принимались их средние значения по ансамблю независимых реализаций:

$$\overline{\Phi}(\lambda_{\max}, t_k, K) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} \Phi_j(\lambda_{\max}, t_k, K), \quad (8)$$

где m — число независимых испытаний в методе Монте-Карло; Ф — элемент множества $\{L, \tau^w\}$,

$$\overline{\Psi}(\lambda_{\max}, K) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} \Psi_j(\lambda_{\max}, K), \quad (9)$$

где Ψ — элемент множества $\{L, \tau_w, N_0, T_{All}\}$.

Далее по каждой зависимости $\overline{L} = \overline{L}(\lambda_{\max}, t_k, K)$, $\tau^w = \tau^w(\lambda_{\max}, t_k, K)$ были вычислены:

максимальные значения функций

$$\overline{L}_{\max} = \max\left[\overline{L}(\lambda_{\max}, t_k, K)\right];$$

$$\overline{\tau^w_{\max}} = \max\left[\overline{\tau^w}(\lambda_{\max}, t_k, K)\right];$$

значения абсцисс функций $\overline{L}(\lambda_{\max}, t_k, H)$, $\overline{\tau^w} = \overline{\tau^w}(\lambda_{\max}, t_k, K)$, в которых они достигали своего максимального значения

$$t_{L\max} = \arg\max_{t_k}\left[\overline{L}(\lambda_{\max}, t_k, K)\right],$$

$$t_{\tau^w_{\max}} = \arg\max_{t_k}\left[\overline{\tau^w}(\lambda_{\max}, t_k, K)\right].$$

Отметим, что каждая из введённых величин является некоторой функцией, зависящей от $\lambda_{\max}$ и K.

Анализ результатов моделирования НСМО. Рассмотрим графики зависимостей $\overline{L}_{\max} = f(\lambda_{\max}, K)$, $\overline{\tau^w_{\max}} = f(\lambda_{\max}, K)$ при определённых ранее значениях $\lambda_{\max}$ (рис. 3 и 4 соответственно). Здесь каждая из точек соответствует среднему значению по ансамблю из 500 независимых статистических испытаний, проводимых в соответствии с описанной выше методикой.

Из рис. 3 и 4 видно, что изучаемые зависимости $\overline{L}_{\max} = f(\lambda_{\max}, K)$, $\overline{\tau^w_{\max}} = f(\lambda_{\max}, K)$ при $K > 100$ (соответствующая длительность интервала кусочно-постоянной аппроксимации функции $\lambda = \lambda(t)$ — 3,75 мин) значения данных функций практически не изменяются. Аналогичные результаты получены и для числа обслуженных посетителей к началу мероприятия N_0, а также максимального времени обслуживания T_{All}. В то же время понятно,

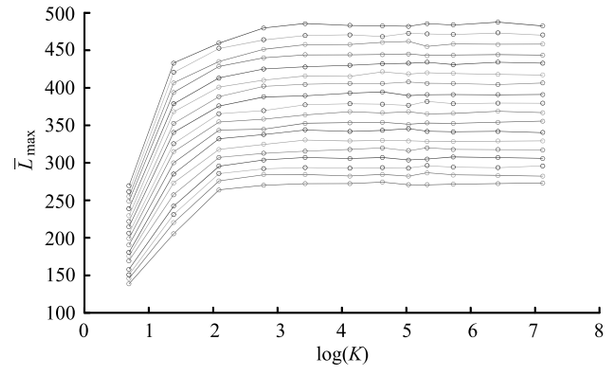


Рис. 3. Зависимости $\overline{L}_{\max} = f(\lambda_{\max}, K)$ для указанных значений $\lambda_{\max}$

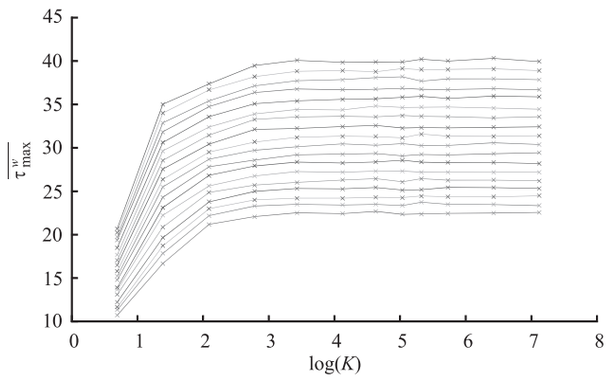


Рис. 4. Зависимости $\overline{\tau^w_{\max}} = f(\lambda_{\max}, K)$ для указанных значений $\lambda_{\max}$

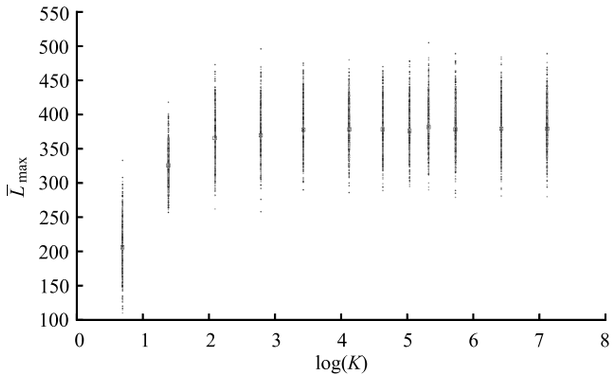


Рис. 5. Визуализация выборок значений максимальной длины очереди заявок на обслуживание, по которым оценивается средняя максимальная длина очереди $\overline{L}_{\max} = f(\lambda_{\max}, K)$ при $\lambda_{\max}$ = 26 чел./мин

что данный вывод является скорее качественным, нежели количественным, поскольку значения выбранных макроскопических показателей являются оценками математического ожидания, вычисленными по некоторым случайным выборкам (рис. 5).

В этой связи для более строгого обоснования выбора числа интервалов кусочно-постоянной аппроксимации были получены оценки статистической значимости отличий распределений выбранных макроскопических показателей НСМО для j-й и $(j + 1)$-й случайных выборок, $j = \overline{1,11}$. Здесь номер выборки соответствует порядковому номеру элемента последовательности, содержащей значения числа интервалов кусочно-линейной аппроксимации. Для оценки статистической значимости отличий данных распределений использовался непараметрический критерий типа теста Колмогорова—Смирнова, реализованный в пакете MATLAB, в виде функции *ktest*2(), возвращающей значение 1, если гипотеза об однородности сравниваемых выборок отклоняется, и 0 — в противоположном случае. В результате применения данной функции для каждого из выбранных макроскопических параметров были получены зависимости значения критерия от порядкового номера элемента $KST(\psi, \lambda_{\max}, j)$, где ψ — элемент множества $\{L, \tau^w, N_0, T_{All}\}$.

Сравнение результатов значений критерия на основе теста Колмогорова—Смирнова, полученных в нескольких независимых испытаниях, показало, что их значения при некоторых K числа интервалов кусочно-постоянной аппроксимации, зависящих от $\lambda_{\max}$, случайным образом оказываются равными 0 или 1. В этой связи для каждого набора параметров ψ, $\lambda_{\max}$, j были проведены по 20 независимых испытаний и получены соответствующие значения критерия, по которым были вычислены оценки средних значений данного критерия $\overline{KST}(\psi, \lambda_{\max}, j)$. Зависимости $\overline{KST}(\overline{L}_{\max}, \lambda_{\max}, j)$, $\overline{KST}(\overline{\tau^w}, \lambda_{\max}, j)$ от номера элемента последовательности, содержащие значения числа интервалов кусочно-линейной аппроксимации, представлены на рис. 6—9.

Из рис. 6—9 видно:

вычисленные зависимости для разных макроскопических показателей подобны друг другу;

при выборе числа интервалов кусочно-постоянной аппроксимации зависимости $\lambda = \lambda(t)$

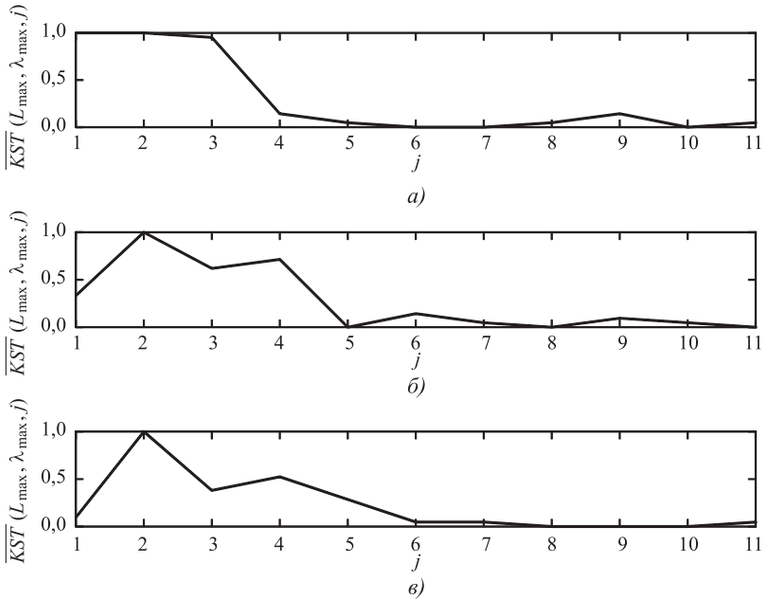


Рис. 6. Зависимости усреднённых значений теста однородности Колмогорова—Смирнова для $\overline{L}_{\max}$:
а — $\lambda_{\max}$ = 18,8 чел./мин; *б* — $\lambda_{\max}$ = 21,2 чел./мин; *в* — $\lambda_{\max}$ = 23,6 чел./мин

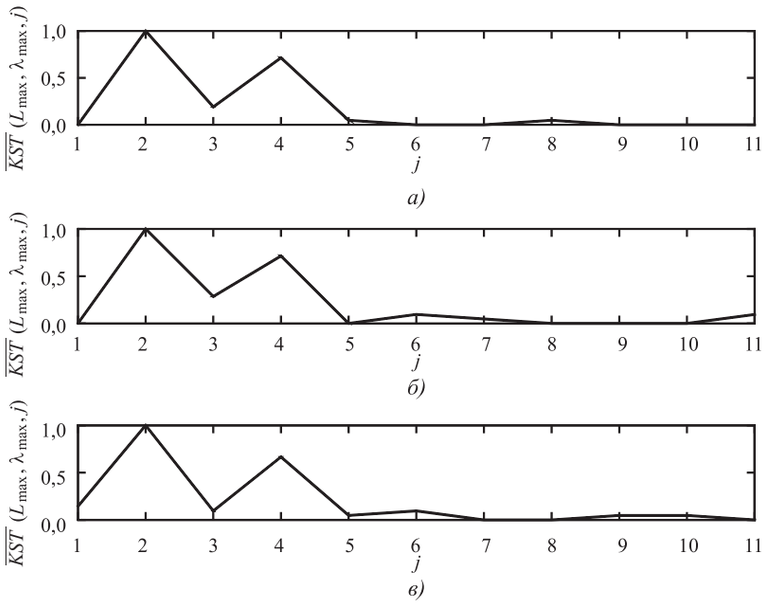


Рис. 7. Зависимости усреднённых значений теста однородности Колмогорова—Смирнова для $\overline{L}_{\max}$:
а — $\lambda_{\max}$ = 26 чел./мин; *б* — $\lambda_{\max}$ = 28,4 чел./мин; *в* — $\lambda_{\max}$ = 30,8 чел./мин

следует выбирать их количество, принимая во внимание значение λ_{max};

для случая $\lambda_{max} \in [18{,}8;\ 30{,}8]$ заявок/мин следует использовать не менее 154 интервалов кусочно-постоянной аппроксимации (соответственно, длительность интервала — 1,875 мин).

Заключение. Предложена методика, позволяющая получать статистически обоснованные оценки длительности интервалов кусочно-постоянной аппроксимации произвольных зависимостей интенсивности поступления заявок на вход НСМО от времени.

Для выбранной зависимости интенсивности поступления потока заявок получены статистически обоснованные оценки длительности интервалов кусочно-постоянной аппроксимации.

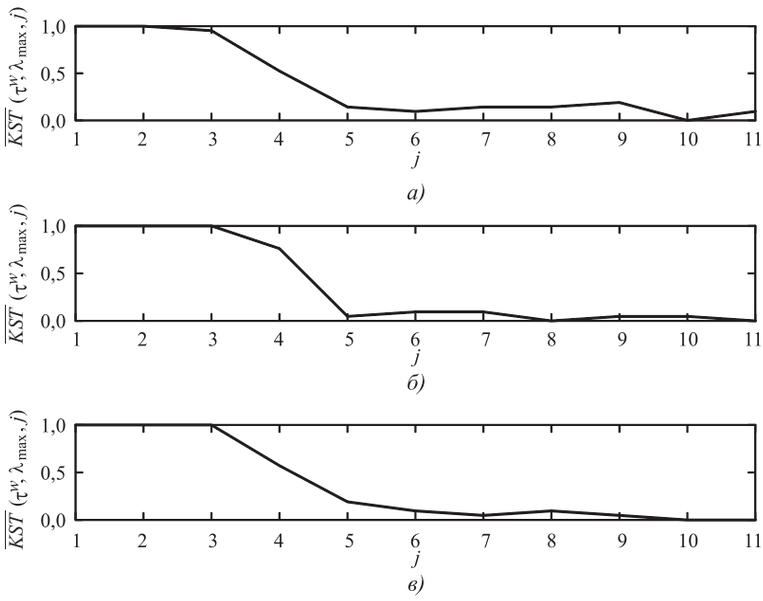


Рис. 8. Зависимости усреднённых значений теста однородности Колмогорова—Смирнова для τ^w:
а — λ_{max} = 18,8 чел./мин; *б* — λ_{max} = 21,2 чел./мин; *в* — λ_{max} = 23,6 чел./мин

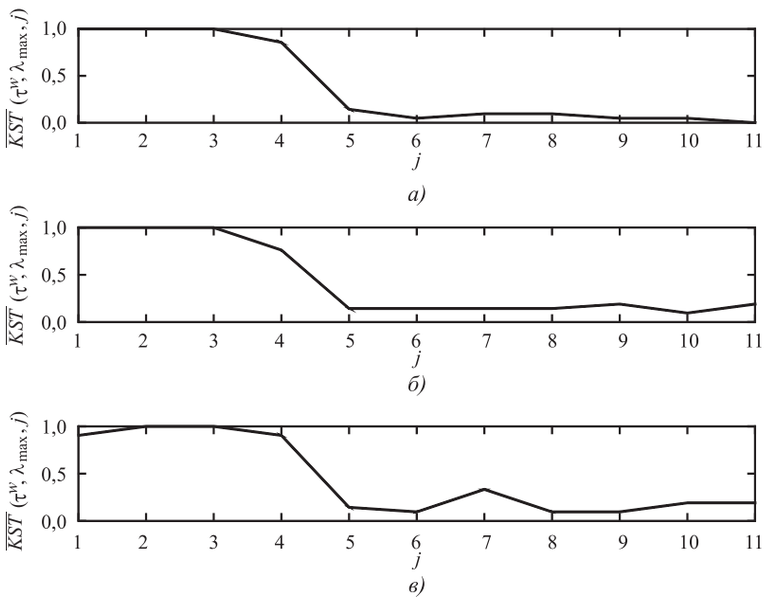


Рис. 9. Зависимости усреднённых значений теста однородности Колмогорова—Смирнова для τ^w:
а — λ_{max} = 26 чел./мин; *б* — λ_{max} = 28,4 чел./мин; *в* — λ_{max} = 30,8 чел./мин

Библиографические ссылки

1. **Казаков С.В., Костенко Г.Д.** Футбольные истории. Ростов н/Д.: Феникс, 2004. С. 260—266.

2. **Newell G.F.** Queues with time-dependent arrival rates (parts I—III) // Journal of Applied Probability. № 5. 1968. P. 436—451 (I), 579—590 (II), 591—606 (III).

3. **Поршнев С.В., Якоб Д.А.** Исследование особенностей функционирования информационных контрольно-пропускных систем объектов проведения массовых мероприятий. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2014. 216 с.

4. **Поршнев С.В., Якоб Д.А.** OneGateFlow for MATLAB // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013618902. 2013.

5. **Поршнев С.В., Якоб Д.А.** MOdCS for MATLAB // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201369145. 2013.

6. **Бубнов В.П., Сафонов В.И.** Разработка динамических моделей нестационарных систем массового обслуживания. СПб.: Лань, 1999. 64 с.

7. **Поршнев С.В., Корелин И.А., Якоб Д.А.** Исследование особенностей математических моделей нестационарных систем массового обслуживания // Материалы 26-й междунар. крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 4—10 сент. 2016 г. В 13 т. Т. 4. С. 600—607.

8. **Сигалов Г.Г., Люперсольский А.М.** Метод приближённого расчёта переходных процессов в сетевых моделях систем массового обслуживания // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 3. С. 40—43.

Ссылка для цитирования

Поршнев С.В., Корелин И.А. Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем, обоснование выбора аппроксимации интенсивности поступления заявок // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 324—329.

УДК 004.89

В.Э. Мирзаханов
(Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку)
mirzakhanv@inbox.ru

КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ DATA MINING

Представлен обзор и проведено сравнение современных программных средств интеллектуального анализа данных (англ. Data Mining). Рассмотрены программные средства общего назначения с акцентированием внимания на наиболее популярных программных решениях. Особое внимание уделено программной платформе Hadoop, широко применяемой для интеллектуального анализа больших данных (англ. Big Data).

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных; программные средства; большие данные; платформа Hadoop.

The review and comparison of modern software facilities for intellectual data mining is presented. General software facilities are considered, with emphasis attention on the most popular software solutions. Particular attention is given to the software platform Hadoop, widely used for intellectual analysis big data.

Keywords: intellectual data analysis; software facilities; big data; Hadoop platform.

Введение. Проведённые обзор и сравнение охватывают программные средства (ПС) интеллектуального анализа данных (англ. *Data Mining*), возникшие или получившие заметное распространение в течение последних лет.

На сегодняшний день сформировалась полноценная область программного обеспечения (ПО), ориентированного на имплементацию различных методов Data Mining (DM). Количество программных средств Data Mining (ПС DM), частота их появления и скорость развития создают объективные затруднения в обзоре современного инструментария DM. В частности, возникают ситуации, когда два ПС с идентичным функционалом имеют различную популярность по причине большей известности одного из них. Во избежание подобных и других ситуаций составляются научные обзоры ПС DM, призванные объективно оценить современный рынок, обозначить и сравнить актуальные средства DM.

Англоязычная научная литература представлена довольно большим количеством обзорных статей по средствам DM [1—8]. Русскоязычная научная литература в этом отношении достаточно скудна, что порождает объективную потребность в подготовке и распространении обзорного материала, дающего русскоязычному читателю представление о современном состоянии и тенденциях в сфере ПС DM.

По мнению автора, релевантная обзорная статья по ПС DM должна соответствовать следующим минимальным требованиям:

во-первых, в обзоре ПС DM должна учитываться степень востребованности ПО (неприемлемо претендовать на охват современного состояния ПС DM путём перечисления и описания преимущественно непопулярного, но знакомого авторам ПО);

во-вторых, в обзоре ПС DM должна учитываться степень ориентированности ПС на реализацию всех этапов Data Mining (неприемлемо претендовать на охват современного состояния ПС DM путём перечисления популярных, но мало ориентированных на реализацию всех этапов DM программных средств, таких как MS Excel и т. п.);

в-третьих, в обзоре ПС DM должны проводиться анализ и определяться соотносимость рассматриваемых ПС DM (нельзя претендовать на охват современного состояния ПС DM путём простого перечисления таких базовых атрибутов рассматриваемого ПО, как год создания, компания-производитель, тип лицензии и т. п.).

Например, не соответствует приведённому перечню требований статья [8], в которой список ПС DM довольно краток, содержит непопулярное ПО (GhostMiner, DataDetective, Coheris SPAD и т. д.), не содержит многих популярных ПС DM (RapidMiner, WEKA,

KNIME и т. д.) и предоставляет только базовую информацию по рассматриваемому ПО.

Обзор средств Data Mining. В данной работе рассмотрен ряд современных программных средств Data Mining: список средств, используемых на тех или иных этапах DM, но к полноценным средствам DM не относящихся, приведён в табл. 1, список актуальных средств DM — в табл. 2, список неактуальных средств DM — в табл. 3.

В данной статье рассматриваются только средства Data Mining общего назначения, т. е. пропущены обзор и анализ специализированного ПО, к которому, в частности, относится: ПО SocNetV, предназначенное для анализа и визуализации данных из социальных сетей [1]; ПО 11Ants Retail Analytics Platform, предназначенное для анализа данных в сфере розничной торговли [9] и т. д.

Приведённые в табл. 2 и 3 средства Data Mining отнесены к устаревшим/непопулярным или популярным в соответствии со следующими критериями:

степень освещённости средств Data Mining в научных обзорах [1—8];

рейтинг средств Data Mining в соответствующих опросах [10—17];

количество веб-страниц и различных документов, содержащих информацию о соответствующем ПО;

территориальная распространённость средств Data Mining: если ПС завоевало неко-

Таблица 1

Список вспомогательного ПО Data Mining

Название ПО	Период сопровождения	Разработчик ПО	Доступ*
Microsoft Excel	1985 — н.в.	Microsoft Corp., США	П
Google Sheets	2006 — н.в.	Google Inc., США	Б
EDM Workbench	2011 — н.в.	Ateneo Laboratory for the LS, Филиппины	Б
Jupyter Notebook (Python)	2014 — н.в.	NumFOCUS Foundation, США	Б
Tableau	2003 — н.в.	Tableau Software, США	Б/П
D3.js	2011 – н.в.	Mike Bostock и др.	Б
MS SQL Server	1989 – н.в.	Microsoft Corp., США	Б/П

* Данный табличный атрибут может принимать следующие значения: Б (бесплатный), П (платный) и Б/П (имеются и коммерческие, и некоммерческие версии). Отметим, что наличие бесплатного пробного периода не разрешает относить ПС к разряду бесплатного ПО.

Таблица 2

Список актуального ПО Data Mining

Название ПО	Период сопровождения	Разработчик ПО	Доступ
RapidMiner	2001 — н.в.	RapidMiner, США и Германия	Б/П
WEKA	1994 — н.в.	University of Waikato, Новая Зеландия	Б
IBM SPSS Modeler	1994 — н.в.	IBM Corp., США	П
KNIME	2006 — н.в.	KNIME.com AG, Швейцария и Германия	Б/П
Orange	1997 — н.в.	University of Ljubljana, Словения	Б
R	1991 — н.в.	Ross Ihaka и Robert Gentleman	Б
Scikit-learn (Python)	2007 — н.в.	David Cournapeau и др.	Б
SAS Enterprise Miner	1999 — н.в.	SAS, США	П
Oracle Data Mining	2002 — н.в.	Oracle Corp., США	Б/П
SPM software suite	2010 — н.в.	Salford Systems, США	П
Apache Hadoop	2011 — н.в.	Apache Software Foundation, США	Б
H2O	2011 — н.в.	H2O.ai, США	Б
MATLAB	1984 — н.в.	MathWorks, США	П
Azure Machine Learning Studio	2014 — н.в.	Microsoft Corp., США	Б/П

Таблица 3

Список устаревшего/непопулярного ПО Data Mining

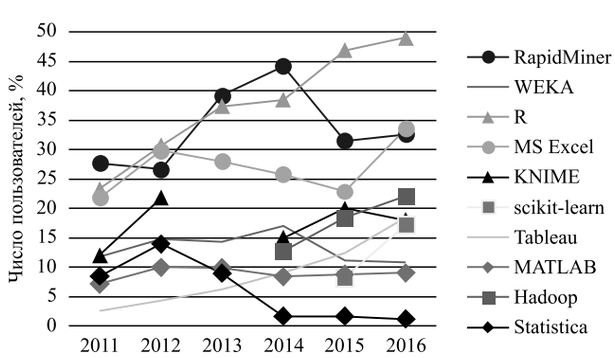
Название ПО	Период сопровождения	Разработчик ПО	Доступ
DataDetective	1991 — н.в.	Sentient Information Systems, Нидерланды	П
GhostMiner	2002 — н.в.	FQS Poland/Fujitsu Ltd., Япония	П
KEEL	2004 — н.в.	Spanish National Projects, Испания	Б
Angoss KnowledgeSTUDIO	1997 — н.в.	Angoss Software Corp., Канада	П
ADAPA	2007 — н.в.	Zementis, США	П
Viscovery suite	2002 — н.в.	Viscovery Co., Австрия	П
Coheris SPAD	1996 — н.в.	Coheris SA, Франция	П
TANAGRA	2004—2013	Lumi@re University Lyon 2, Франция	Б
GGobi	2001 — н.в.	Deborah Swayne и др.	Б
Statistica	1984 — н.в.	Statsoft, США Dell Software, США Francisco Partners, США	П
ELKI	2008 — н.в.	Erich Schubert, Arthur Zimek и др.	Б

торое признание лишь в отдельно взятой стране (странах), то оно считается непопулярным.

По разным причинам, в частности из-за возможности определения ПО в качестве интерфейса, надстройки или модификации другого средства DM, в данной статье не приводится обзор таких средств Data Mining, как Apache Spark MLlib (США), SAP Predictive Analytics (Германия), Anaconda (США), XLMiner (США).

Рассмотрим подробнее следующие ПС Data Mining, которые пользовались широкой популярностью в течение последних лет: RapidMiner, MATLAB, Statistica, WEKA, Microsoft Excel, Apache Hadoop, Tableau, scikit-learn, KNIME, R.

RapidMiner. Данный программный продукт до 2007 г. был известен как YALE (Yet Another Learning Environment). Он является одним из



Сравнение средств Data Mining по критерию популярности (на основе ежегодных KDnuggets Software Poll Results [10—15])

самых распространённых ПС DM общего назначения (см. рисунок), достаточно широко освещён как в научной литературе [1—4; 6], так и на различных форумах по интеллектуальному анализу данных и поддерживается весьма крупным сообществом пользователей [3]. Производится одноимённой компанией в качестве коммерческого ПО (данное ПО изначально являлось бесплатным до 5-й версии включительно). Производитель также поддерживает некоторые бесплатные версии RapidMiner с существенным ограничением возможностей.

RapidMiner является одним из наиболее функциональных ПС DM, дополнительно поддерживает возможность подключения и использования функционала WEKA [3] и R [18]. Одной из отличительных особенностей RapidMiner является наличие широких возможностей по валидации (англ. *validation*) создаваемых моделей DM [1]. Отметим, что RapidMiner, в отличие от ряда других ПС DM, весьма широко используется различными коммерческими структурами [6].

Среди потенциальных недостатков данного ПС отметим следующие: ограничения в работе с большими данными (англ. *Big Data*), визуально программистский уклон ПС, отсутствие поддержки режима командной строки. RapidMiner непосредственно не поддерживает обработку Big Data [4], но может привлекать функционал Hadoop посредством использования решения RapidMiner Radoop [3, 4, 19]. Как отмечается в работах [1, 2], среди многих

известных ПС DM (KNIME, WEKA и т. п.) RapidMiner является наиболее программистской средой с графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ). Вследствие этого, аналитикам, не имеющим опыта в программировании, данное средство может показаться достаточно сложным в эксплуатации.

MATLAB. Данное коммерческое ПО разработано в середине 1980-х гг. и сопровождается компанией MathWorks. MATLAB является одним из наиболее популярных в мире программных пакетов, используемых для разного рода вычислений и моделирования. MATLAB обладает весьма внушительным функционалом для эксплуатации в самых разных сферах человеческой деятельности: робототехнике, биомедицине, экономике, телекоммуникациях и т. д. Сообщество пользователей MATLAB, среди которых есть и известные учёные, довольно многочисленно и активно участвует в разработке и продвижении различных пользовательских скриптов и инструментов MATLAB.

MATLAB является довольно распространённым инструментом Data Mining, причём популярность пакета остаётся стабильной на протяжении последних нескольких лет (см. рисунок). Работать с инструментарием DM в MATLAB можно как посредством соответствующих ГПИ, так и в режиме командной строки. Благодаря широким программистским возможностям, MATLAB удобно использовать для создания пользовательских средств DM.

MATLAB поддерживает работу с Hadoop и обладает широкими возможностями для проведения параллельных и распределённых вычислений, что позволяет применять его для обработки Big Data [20].

Statistica. Данный коммерческий программный продукт изначально принадлежал и сопровождался компанией Statsoft, которая была приобретена Dell (Dell Software Group) в 2014 г. [21]. В 2016 г. Dell продала Dell Software Group фирме Francisco Partners (США).

Будучи некогда весьма востребованным ПО, Statistica в последние несколько лет демонстрирует довольно интенсивное падение своей популярности. Об этом свидетельствуют *KDnuggets Software Poll Results* (см. рисунок), а также результаты опросов и исследований *Rexer Analytics* (США) [16, 17], отображающие следующее: с 2011 по 2015 г. падение популярности ПО Statistica, как основного пользовательского инструмента DM, составило 12 % (с 17 до 5 %).

Несмотря на относительно невысокую нынешнюю популярность, Statistica обладает весьма внушительными возможностями для осуществления DM, расширяемыми интеграцией с R [21]. Statistica также поддерживает обработку Big Data, реализуемую, в частности, посредством привлечения функционала Apache Hadoop [22].

WEKA. Waikato Environment for Knowledge Analysis является некоммерческим институтским проектом University of Waikato, берущим своё начало в 1994 г. WEKA поддерживает работу как с ГПИ, так и с командной строкой [1]. Данное ПО весьма популярно (см. рисунок) и широко освещено в научной литературе [1—6]. WEKA достаточно интенсивно поддерживается пользовательским сообществом WEKA, разрабатывающим для него различные расширения. Сообщество пользователей WEKA по численности сопоставимо с RapidMiner, но оба ПС DM по численности сообщества значительно уступают R [3].

Отметим, что WEKA, являясь довольно популярным и успешным ПС DM, тем не менее значительно уступает в популярности RapidMiner и R по следующим причинам: повышенная ресурсоёмкость ряда программных реализаций методов DM в WEKA [3]; функционал WEKA полностью ассимилируется RapidMiner через WEKA Extension, тогда как WEKA не поддерживает подключение функционала RapidMiner, допуская при этом привлечение функционала R [18]; меньшее удобство ГПИ WEKA в сравнении с таковым у RapidMiner [18]; ограниченность средств визуализации данных в WEKA в сравнении с RapidMiner [3, 18]; невозможность сохранения в WEKA моделей DM, которые повторно синтезируются для каждого нового набора входных данных [5, 6].

Кроме того, WEKA значительно уступает R в плане статистического функционала, но превосходит его в машинном обучении [2]. Работа с Big Data в WEKA частично поддерживается, в частности, посредством привлечения функционала Apache Hadoop [3].

Microsoft Excel. Данное коммерческое ПО является частью пакета Microsoft Office корпорации Microsoft и представляет собой наиболее популярный в мире табличный процессор с весьма широкими возможностями. Наряду с R

и RapidMiner, MS Excel является одним из наиболее популярных средств DM (см. рисунок). Следует отметить, что возможности непосредственного DM в MS Excel являются довольно ограниченными, и чаще всего Excel применяется именно в предварительной обработке данных (выборке, очистке, трансформации) благодаря многочисленному и эффективному функционалу по манипулированию данными [1].

Apache Hadoop. Данное ПС является некоммерческой программной платформой для выполнения распределённых вычислений. Изначально рассматриваясь как программная платформа для поисковых систем, Hadoop нашёл применение во многих сферах, в числе которых криптоанализ, метеорология, астрономия, биология, обработка изображений и т. д. [23, 24]. Платформа Hadoop в настоящее время применяется во многих организациях (от многочисленных стартапов до гигантов вроде американских компаний Facebook, Yahoo, Ebay, Twitter) [23, 25]. Hadoop характеризуется наличием быстроразвивающегося сегмента производных программных решений (Hive, Pig, HBase, Mahout, HCatalog и т. д.) [26].

Apache Hadoop производит распределённые вычисления на группах компьютеров, именуемых Hadoop-кластерами. Платформа спроектирована таким образом, что пользователь абстрагируется от многих технических нюансов (организация отказоустойчивости, распределение данных, взаимодействие параллельных вычислительных процессов и их результатов и т. д.) [27, 28]. Основными программными компонентами Hadoop являются HDFS и MapReduce [24, 26]. HDFS (Hadoop Distributed File System) представляет собой файловую систему для хранения данных в Hadoop-кластерах. MapReduce представляет собой основной вычислительный компонент Hadoop, программную реализацию одноимённой вычислительной модели, поддерживающей крупнозернистый параллелизм в обработке больших объёмов данных [29].

Apache Hadoop нередко подвергается критике из-за ряда объективных недостатков:

HDFS испытывает проблемы при работе с файлами малого размера [24];

MapReduce испытывает затруднения в работе с данными в итеративном режиме, а также в режиме реального времени, так как его архитектура основана на пакетной обработке (англ. *batch processing*) [24, 27];

объём хранения данных значителен и избыточен, так как HDFS предполагает избыточность данных для минимизации угрозы потери информации, вследствие чего в рамках кластеров одновременно хранятся три копии оперируемых данных [26, 30].

На сегодняшний день Hadoop и производные программные решения являются одними из наиболее популярных инструментов DM для работы с Big Data (см. рисунок). Многие ПС DM (Statistica, WEKA, RapidMiner и т. д.) допускают привлечение функционала Hadoop для работы с Big Data.

Tableau. Данное ПС является вспомогательным коммерческим средством DM, предназначенным преимущественно для визуализации данных, и завоевавшим в последние годы достаточно большую популярность (см. рисунок). Отметим, что компания—разработчик Tableau Software также предлагает некоторые бесплатные версии Tableau.

Преимуществами Tableau являются простота в использовании и богатый функционал для визуализации данных, а недостатками — отсутствие непосредственного функционала Data Mining и интеграции с ПС, обладающими данным функционалом [1].

Scikit-learn. Данное ПС является некоммерческим пакетом (библиотекой) для Python, набравшим в последние годы большую популярность. *Scikit-learn* прост в использовании, хорошо задокументирован и предлагает относительно широкий набор функционала DM, но требует наличия некоторых навыков в программировании и не поддерживает ГПИ [3, 31]. Сообщество пользователей, вкладывающееся в разработку и продвижение *scikit-learn*, относительно невелико в сравнении с WEKA, RapidMiner и R [3].

KNIME. KoNstanz Information MinEr, ранее известный как Hades, является довольно популярным ПС DM (см. рисунок), широко освещённым в научной литературе [1—6]. Существуют коммерческие и некоммерческие версии и расширения данного ПС. Взаимодействие с пользователем осуществляется посредством ГПИ [3].

KNIME поддерживает взаимодействие с R и Python [1], ассимилирует функционал WEKA [2, 3] через соответствующие программные решения, поддерживает работу с Big Data посредством KNIME Big Data Extension [4]. Сообщество пользователей, вкладывающихся в

разработку и продвижение KNIME, относительно невелико в сравнении с WEKA, RapidMiner и R [3].

R. Данное некоммерческое ПО на сегодняшний день является самым популярным ПС DM в мире (см. рисунок). Отметим, что согласно данным работы [17], R удерживает лидирующие позиции в сфере ПС DM начиная с 2010 г. Данное ПО широко освещено в научной литературе [2—4, 8]. Под R понимается язык программирования и соответствующая среда, предназначенные как для проведения классических статистических расчётов, так и для интеллектуального анализа данных.

R поддерживает работу как в режиме командной строки, что требует наличия программистских навыков, так и посредством многочисленных ГПИ, среди которых особо выделяется довольно популярный Rattle, предназначенный для проведения Data Mining средствами R [32].

R пользуется чрезвычайно высокой поддержкой пользовательского сообщества [3], благодаря чему существуют сотни дополнительных пакетов и расширений R [2]. R поддерживает обработку Big Data, привлекая функционал Hadoop посредством программного решения RHadoop [4].

Заключение. В рамках данной статьи осуществлён краткий обзор современных программных средств Data Mining. Подробно рассмотрены наиболее популярные программные решения DM. По причине стремительного роста популярности и распространённости работы с Big Data, особое внимание в обзоре уделено соответствующей программной платформе Apache Hadoop.

Библиографические ссылки

1. **Slater S.** et al. Tools for Educational Data Mining: A Review // J. Educ. Behav. Stat. 2016. Vol. 42. № 1. P. 85—106.

2. **Zupan B., Demsar J.** Open-Source Tools for Data Mining // Clin. Lab. Med. 2008. Vol. 28. № 1. P. 37—54.

3. **Jovic A., Brkic K., Bogunovic N.** An overview of free software tools for general data mining // 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE, 2014. P. 1112—1117.

4. **Wimmer H., Powell L.M.** A Comparison of Open Source Tools for Data Science // Proceedings of the Conference on Information Systems Applied Research. Wilmington. 2015. P. 9.

5. **Solanki H.** Comparative Study of Data Mining Tools and Analysis with Unified Data Mining Theory // Int. J. Comput. Appl. 2013. Vol. 75. № 16. P. 23—28.

6. **David S.K., Saeb A.T.M., Rubeaan K.Al.** Comparative Analysis of Data Mining Tools and Classification Techniques using WEKA in Medical Bioinformatics // Comput. Eng. Intell. Syst. 2013. Vol. 4. № 13. P. 28—39.

7. **Andronie M., Crişan D.** Commercially Available Data Mining Tools used in the Economic Environment // Database Syst. 2010. Vol. 1. № 2. P. 45—54.

8. **Gheware S.D., Kejkar A.S., Tondare S.M.** Data Mining: Task, Tools, Techniques and Applications // Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng. 2014. Vol. 3. № 10. P. 8095—8098.

9. **Kiwi** Companies in the Cloud. Microsoft Corp., 2015. P. 68. URL: https://dxnz.blob.core.windows.net/share/2015/nzazurecatalogue.pdf (accessed: 01.02.2018).

10. **Piatetsky G.** 12th annual KDnuggets Software Poll Results. 2011. URL: http://www.kdnuggets.com/polls/2011/tools-analytics-data-mining.html (accessed: 08.06.2017).

11. **Piatetsky G.** 13th annual KDnuggets Software Poll Results. 2012. URL: http://www.kdnuggets.com/polls/ 2012/analytics-data-mining-big-data-software.html (accessed: 08.06.2017).

12. **Piatetsky G.** 14th annual KDnuggets Software Poll Results. 2013. URL: http://www.kdnuggets.com/2013/06/kdnuggets-annual-software-poll-rapidminer-r-vie-for-first-place.html (accessed: 06.06.2017).

13. **Piatetsky G.** 15th annual KDnuggets Software Poll Results. 2014. URL: http://www.kdnuggets.com/2014/06/kdnuggets-annual-software-poll-rapidminer-continues-lead.html (accessed: 06.06.2017).

14. **Piatetsky G.** 16th annual KDnuggets Software Poll Results. 2015. URL: http://www.kdnuggets.com/2015/05/poll-r-rapidminer-python-big-data-spark.html (accessed: 06.06.2017).

15. **Piatetsky G.** 17th annual KDnuggets Software Poll Results. 2016. URL: http://www.kdnuggets.com/2016/06/r-python-top-analytics-data-mining-data-science-software.html (accessed: 06.06.2017).

16. **Karl Rexer** et al. 2011 Data Miner Survey // Rexer Analytics. 2012. P. 37. URL: http://www.rexeranalytics.com/assets/rexer_analytics_2011_data_miner_survey_summary_report.pdf (accessed: 09.06.2017).

17. **Karl Rexer** et al. 2015 Data Science Survey // Rexer Analytics. 2016. P. 39. URL: http://www.rexeranalytics.com/assets/rexer_analytics_2015_data_miner_survey_summary_report.pdf (accessed: 09.06.2017).

18. **Kosorus H., Honigl J., Kung J.** Using R, WEKA and RapidMiner in Time Series Analysis of Sensor Data for Structural Health Monitoring // 22nd International Workshop on Database and Expert Systems Applications. IEEE. 2011. P. 306—310.

19. **Prekopcsak Z.** et al. Radoop: Analyzing Big Data with RapidMiner and Hadoop // Proc. 2nd RapidMiner Community Meet. Conf. 2011. P. 1—12.

20. **Martynenko D.** Big Data Analytics with MATLAB. Munich: MATLAB EXPO, 2015. P. 13.

21. **Demidova L.** et al. Software Package STATISTICA and Educational Process // SHS Web Conf. 2016. Vol. 29. P. 2011.

22. **Brochure:** Statistica Data Miner. Aliso Viejo: Dell Software, 2014. P. 2.

23. **Shvachko K.** Apache Hadoop: The Scalability Update // Login. 2011. Vol. 36. № 3. P. 7—13.

24. **Jayasree M.** Data Mining: Exploring Big Data Using Hadoop and MapReduce // Int. J. Eng. Sci. Res. 2013. Vol. 4. № 1. P. 1321—1324.

25. **Lin J., Ryaboy D.** Scaling big data mining infrastructure // ACM SIGKDD Explor. Newsl. 2013. Vol. 14. № 2. P. 6—19.

26. **Hadoop's** Limitations for Big Data Analytics. ParAccel, 2012. P. 8. URL: https://www.whitepapers.em360tech.com/wp-content/files_mf/1360922634PARACCEL1.pdf (accessed: 02.02.2018).

27. **Garcia S.** et al. Big data preprocessing: methods and prospects // Big Data Anal. 2016. Vol. 1. № 1. P. 9.

28. **Dittrich J., Quiané-Ruiz J.-A.** Efficient big data processing in Hadoop MapReduce // Proc. VLDB Endow. 2012. Vol. 5. № 12. P. 2014—2015.

29. **Stewart R., Singer J.** Comparing Fork/Join and MapReduce // Technical Report HW-MACS-TR-0096. 2012. P. 20. URL: http://www.macs.hw.ac.uk/cs/techreps/docs/files/HW-MACS-TR-0096.pdf (accessed: 01.02.2018).

30. **Bhosale H.S., Gadekar D.P.** A Review Paper on Big Data and Hadoop // Int. J. Sci. Res. Publ. 2014. Vol. 4. № 10. P. 7.

31. **Hackeling G.** Mastering Machine Learning with scikit-learn. Birmingham: Packt Publishing, 2014. 238 p.

32. **Williams G.J.** Rattle: A Data Mining GUI for R // R J. 2009. Vol. 1. № 2. P. 45—55.

Ссылка для цитирования

Мирзаханов В.Э. Краткий обзор современных средств DATA MINING // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 330—336.

Уважаемые читатели!

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

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 26.04.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 21.06.2018.	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