

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

- Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Булдакова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
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., МИРЭА—РТУ
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
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
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)
Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мырзина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конов 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 75

12
2021

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- Жаров М.В.** Исследование перспектив применения програм-
мных сред имитационного моделирования при разработке и
оптимизации производств машиностроения 531
- Колыбенко Е.Н.** Определение первой составляющей по-
грешностей в структуре поля допуска межпереходного раз-
мера на преобразования элементов геометрической формы
в структуре исходных заготовок 537
- Янгиров И.Ф.** Низкочастотный спиральный генератор кру-
тильных колебаний 547
- Любчинова В.В., Янишевская А.Г.** Автоматизация проекти-
рования приёмопередающих устройств 551
- Горбунов А.А., Зубов А.В., Микаева С.А.** Моделирова-
ние светильника типа DownLight со светодиодным модулем
в программе «Компас-3D» 555

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

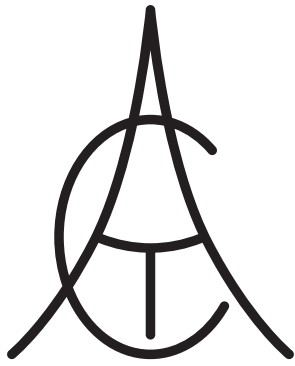
- Неусыпин К.А., Иванов М.В., Тотунов С.С., Гаврильев С.А.,
Лаухин Д.А., Лушкин А.А.** Алгоритм построения моделей
акустических характеристик материалов 560
- Тугашова Л.Г.** Прогнозирование показателей качества
нефтепродуктов с применением статистических методов 565

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Джамалов Д.Р., Гурбанова Г.Г.** Применение кепстрального
метода для обработки ириодиагностических телевизион-
ных сигналов 569

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

- Указатель статей**, опубликованных в журнале «Автомати-
зация. Современные технологии» в 2021 г. 574



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China

Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»

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., MIREA—RTU

Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS

Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»

Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI

Putilov V.N. – LLC «"Innovative Mashinostroenie"
Publishers» (deputy chief editor)

Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «"Innovative
Mashinostroenie" Publishers»

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 of RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman

He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China

Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

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 «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

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)

It is published since 1947

Volume 75 $\frac{12}{2021}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Zharov M.V. The usage prospects investigation of the software environments for simulation modeling at the development and optimization of the machine-building production 531

Kolybenko E.N. Determination of the errors first component in the tolerance field structure of the inter-transition size for the transformation of geometric elements in the structure of the initial blanks 537

Yangirov I.F. Low frequency spiral torsional oscillation generator 547

Lyubchinova V.V., Yanishevskaya A.G. Design automation of transceiver devices 551

Gorbunov A.A., Zubov A.V., Mikaeva S.A. DownLight Simulation with LED Module in the program «Compass-3D» 555

MODERN TECHNOLOGIES

Neusypin K.A., Ivanov M.V., Totunov S.S., Gavrilov S.A., Laukhin D.A., Lushkin A.A. Algorithm for constructing models of materials acoustic characteristics 560

Tugashova L.G. Prediction indicators of the petroleum products quality using statistical methods 565

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Dzhamalov D.R., Gurbanova G.G. Application of the cepstrum method for processing iridology television signals 569

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

Index of articles published in the journal «Automation. Modern technologies» in 2021 574



М.В. Жаров, канд. техн. наук, доц.

(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))

MaximZharov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Представлены результаты исследования рынка прикладных программ имитационного моделирования с точки зрения возможности и целесообразности их использования при разработке или оптимизации технологических процессов на предприятиях отечественного машиностроения. Проведён анализ особенностей технологических процессов машиностроения, и в частности авиастроения, на отечественных предприятиях. Рассмотрены особенности производства металлоёмких изделий и полуфабрикатов с точки зрения целесообразности имитационного моделирования данных процессов. Показана целесообразность проведения имитационного моделирования машиностроительных производств, которое обеспечивает адекватные результаты анализа при минимальных затратах по сравнению с другими методами моделирования. Приведены основные критерии для выбора конкретной имитационной программы.

Ключевые слова: технологии машиностроения; металлоёмкое производство; авиастроение; деформационная обработка металлов и сплавов; литейное производство; производительность оборудования; оптимальные запасы полуфабрикатов; страховые запасы; имитационное моделирование; визуализация; дискретно-событийные подходы в моделировании; критерии выбора имитационных сред.

The investigation results of the applied simulation modeling programs market from the point of view of the usage possibility and expediency at the development or optimization of technological processes on domestic machine-building enterprises are presented. The analysis of the technological processes features in machine-building, and in particular aircraft construction, at domestic enterprises is carried out. The production features of the metal-consuming products and semi-finished products from the point of view these processes simulation expediency are considered. The expediency of carrying out simulation modeling of machine-building production, which provides adequate analysis results at minimal costs in comparison with other modeling methods are shown. The main criteria for choosing of specific simulation software are given.

Keywords: mechanical engineering technologies; metal-intensive production; aircraft construction; deformation processing of metals and alloys; foundry; equipment productivity; optimal stocks of semi-finished products; insurance stocks; simulation modeling; visualization; discrete-event approaches in modeling; criteria for choosing simulation environments.

Введение. При проектировании технологических процессов изготовления металлоёмкой продукции технологом необходимо учитывать множество переменных величин, которые определяют не только особенности самих технологических процессов, но и различные экономические параметры производства. При разработке новых технологических процессов или оптимизации действующих производств необходимо не только рассматривать оптимальность маршрутов материальных потоков, определять правильность расстановки основного технологического оборудования, вспомогательных и транспортных устройств, но и определять такие факторы, как подбор

оборудования оптимальной производительности, обеспечение высокой загруженности всех видов оборудования в процессе его эксплуатации, оптимальное число изделий в партии, своевременность поставки (доставки) материалов и комплектующих к каждому рабочему месту, размеры производственных и страховых запасов перед каждой операцией и т. д.

Провести математические расчёты с таким большим числом переменных величин довольно сложно, а в ряде случаев практически невозможно. Поэтому в области исследования сложных процессов и систем с большим числом переменных стало востребовано имитационное моделирование. Можно утверждать

дать, что за последние 20 лет имитационное моделирование приобрело статус самого распространённого инструмента для подобного рода расчётов и исследований. В настоящее время на отечественном рынке программного обеспечения для имитации предлагаются более 50 мощных программных средств имитационного моделирования. Всего же на рынке информационных технологий фигурирует около 150 программных продуктов, позволяющих проводить имитационные эксперименты [1].

Известно, что имитационное моделирование подразумевает замену какого-либо явления, процесса или объекта его математической моделью. Дальнейшие операции в рамках имитационного моделирования производятся именно с математической моделью. По своей сути имитационное моделирование представляет собой метод исследования объекта, явления или процесса, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получить информацию об этой системе [2, 3].

Каждая имитационная среда как прикладная программа должна обеспечивать возможность подробного описания любого объекта или явления. С точки зрения организации производственного процесса применение имитационного моделирования позволяет решить сразу несколько вопросов, и в первую очередь, вопросы оптимизации производственной логистики, т. е. разработать систему оптимального, согласованного по производительности оборудования, внутрицехового перемещения деталей, заготовок или полуфабрикатов, определения уровня производственных запасов перед каждой операцией технологического производства и т. д. Применение имитационного моделирования обладает целым рядом неоспоримых преимуществ. В их числе возможность:

довольно быстро проводить исследования по различным производственным, управленческим, организационным проектам, не используя материальные ресурсы для реализации проводимых исследований;

рассматривать как текущее поведение моделируемой системы, так и её поведение в динамическом развитии в течение определённого интервала времени (за день, год и т. д.), что позволит оценить перспективы развития системы;

легко и оперативно рассматривать многовариантность производственных условий, определять наиболее уязвимые «узкие места» (снижение коэффициента загрузки оборудо-

вания, места снижения производительности, простой оборудования и др.);

ответить на все вопросы организации производства, которые начинаются с фразы «что если» [4, 5].

Особенности производств металлоёмкой продукции. Рассматривая технологические процессы изготовления материалоёмкой продукции машиностроения, можно выявить ряд их особенностей:

в процессе производства используется довольно мощное, энергоёмкое и дорогостоящее производственное оборудование (литейное оборудование, деформационное оборудование (прокатные станы, молоты, горячештамповочные кривошипные прессы, листогибочные прессы, гидравлические прессы и т. д.), которое характеризуется различными принципами работы, интенсивностью (скоростью хода) и производительностью;

в подавляющем большинстве случаев технологический процесс производства материалоёмкого изделия состоит из набора ряда последовательных технологических операций, на которых используются различные виды оборудования, характеризующиеся различной, иногда кардинально отличающейся производительностью, и соответственно, на последовательных операциях требуется различное время на обработку полуфабриката (штучно-калькуляционная норма выполнения операции);

при горячей деформационной обработке в качестве вспомогательного оборудования необходимо применять печи или различные нагревательные устройства. Следовательно, целесообразно проводить работы по обеспечению сбалансированности производительности вспомогательного печного и основного деформационного оборудования;

в связи с большим весом обрабатываемых заготовок и полуфабрикатов требуется применение средств механизации (робототехника, вспомогательные транспортные устройства, манипуляторы и т. д.), которые могут одновременно обслуживать как одну, так и несколько единиц основного технологического оборудования [6].

Следовательно, для оптимизации технологических процессов, определения производственных запасов и обеспечения сбалансированности производительности основного технологического оборудования в целях уменьшения времени ожидания обработки целесообразно проводить предварительные работы по моделированию проектируемых производственных систем.

Кроме того, большое значение при анализе и построении технологического процесса имеет серийность производства. В случае массово-

го, крупносерийного и серийного производства любые изменения в схему технологического процесса и маршруты движения полуфабрикатов в цехе вносятся только в случае усовершенствования технологии или при приобретении и установке нового оборудования и, как правило, не более одного-двух раз в год. Такие производства не требуют дополнительных работ по моделированию производственной среды с применением программных средств для математического моделирования. В случае мелкосерийного или единичного производства переналадка оборудования, смена ассортимента, изменение маршрутов движения полуфабрикатов в зависимости от условий производства могут проводиться до 15 раз в год.

Анализируя технологические производства по изготовлению металлоёмких изделий авиастроительной отрасли на основе анализа производственных процессов на таких предприятиях, как АО «Авиастар-СП» (г. Ульяновск), ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» (г. Москва), АО «ВАСО» (г. Воронеж), АО «ОКБ Сухого» (г. Москва) и др., можно отметить ряд особенностей:

все производства по изготовлению металлоёмкой продукции авиастроения в основном представляют собой синтез технологий металлургического производства (литейное производство, обработка металлов давлением) и последующей механической обработки полученных полуфабрикатов;

поточное массовое производство на всех предприятиях авиастроения отсутствует; давая оценку серийности исследуемого производства, целесообразно рассматривать его как мелкосерийное или среднесерийное;

как правило, даже несмотря на серийность производства, довольно часто происходит смена производимой продукции на каждой конкретной единице технологического оборудования;

отсутствует нормирование производственных и страховых запасов на каждой операции технологического процесса.

Из практики известно, что для производств с быстро изменяющимся ассортиментом продукции, выпуском продукции небольшими сериями актуальными являются рациональное использование основного технологического оборудования, рациональное использование фонда рабочего времени, повышение коэффициента загрузки оборудования; уменьшение времени простоев, в том числе вследствие несогласованности производительности смежных единиц оборудования, оптимальная величина заделов, вместимость складских помещений. Кроме того, немаловажное значение при построении тех-

нологических схем имеют формы организации производственного процесса, временные оценки полного производственного цикла [7, 8].

Таким образом, можно отметить, что по своей сути производственные процессы изготовления металлоёмких изделий в авиастроении являются сложными с точки зрения их организации. И именно имитационное моделирование позволяет максимально полно воспроизвести сложные производственные ситуации для всестороннего исследования производственных процессов и оптимизации их организации.

История развития систем имитационного моделирования. Программы имитационного моделирования появились и развиваются исходя из того, что применение систем имитационного моделирования позволяет отказаться от моделирования процессов, объектов и явлений через описание их основных характерных признаков и поведения посредством программирования на языках высокого уровня. Они не только обеспечивают снижение трудоёмкости построения моделей, проведения имитационного моделирования, но и обеспечивают возможность их применения специалистами, далекими от программирования (например, технологами или специалистами по автоматизации технологических процессов и производств).

Историю развития имитационных сред можно представить в виде последовательной смены шести поколений [9].

Первое поколение (примерно 1950-е гг.) характеризуется построением имитационных моделей посредством программирования на языках высокого уровня. При этом имитационная модель строится для каждого конкретного процесса, явления или объекта без какой-либо специальной поддержки.

Второе поколение (примерно 1960-е гг.) характеризуется специальной поддержкой моделирования в виде соответствующих библиотек подпрограмм, специальных выражений языков программирования, генераторов случайных чисел, средств представления результатов. Уже в 1960—1965 гг. появляются первые языки моделирования: CSL (язык работ), Simula (язык процессов), Simscript (язык событий), GPSS (язык транзактов).

Третье поколение (1970-е гг.) характеризуется интенсивным развитием уже разработанных средств моделирования, ориентированных на повышение эффективности процессов моделирования и превращение имитационного моделирования в более простой и быстрый метод исследования сложных систем. Системы моделирования, разработанные в 1960—1970-е гг., были еще слишком сложны для широкого ис-

пользования, прежде всего из-за сложности текстовой формы описания модели [9, 10].

Четвёртое поколение (1980-е гг.) характеризуется ориентацией прикладных программ имитационного моделирования на конкретные области применения, конкретные производственные системы. В это же время начинает активно развиваться анимация в данных системах. Делается ставка на визуализацию процесса создания моделей. Появляются и развиваются такие продукты, как GPSS PC, PC Model simfactory.

Пятое поколение (1990-е гг.). Создаются программы, имеющие ярко выраженный графический интерфейс.

Шестое поколение (конец 1990-х гг. — наше время). Создаются мощные программные комплексы имитационного моделирования (Arena, Anylogic, ProModel Solutions, Enterprise Dynamics и др.), в которых развиваются важнейшие особенности программных сред пятого поколения [11, 12].

Анализ программ имитационного моделирования для исследования производственных процессов. В настоящее время компьютерное имитационное моделирование широко используется при анализе производственных процессов, анализе транспортных перевозок, в моделировании процессов складирования, при анализе работы различных технических систем, при моделировании характера течения металла и т. д. [13, 14]. В проводимом анализе будут рассматриваться только те системы, которые направлены на исследование производственных процессов и систем.

При выборе имитационной среды необходимо помнить, что исследование динамики функционирования производственного процесса какого-либо предприятия при помощи имитационного моделирования систем позволяет не только найти оптимальный способ организации производства, но и усовершенствовать уже функционирующие процессы, что, в свою очередь, позволяет без кардинальной перестройки многократно увеличить их эффективность [15—17].

При выборе программ для проведения имитационного моделирования крайне важно учитывать тот факт, что целесообразно не создание моделей программированием на языках высокого уровня, а создание технологии построения компьютерных моделей и проведения имитационных экспериментов при помощи уже готовых специализированных компьютерных сред (например, Deneb/Quest, Arena, AnyLogic и др.). Имитационные среды не требуют программирования в виде

определённой последовательности команд. Вместо написания программы пользователи составляют модель из встроенных графических модулей, заполняют специальные формы, описывающие производственную среду, заполняют информационные таблицы [18, 19].

В практике имитационного моделирования существуют три основных подхода, используемых для создания динамических моделей производственных сред и процессов: системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование. Системная динамика предполагает высокий уровень абстракции и в основном используется для задач стратегического уровня, например, чтобы спрогнозировать темп восприятия нового товара на рынке. Дискретно-событийный (процессно-ориентированный) подход используется в основном на операционном и тактическом уровнях, например при моделировании производственных процессов или при оценке инвестиций в оборудование. Агентные модели применяются в задачах разных уровней абстракции; агент может представлять собой любой объект в действии. Именно последние два подхода наиболее приемлемы для имитации производственных сред.

В ряде исследований отмечается, что особое внимание следует уделять программам, которые работают по принципам дискретно-событийного моделирования или многоподходного имитационного моделирования, как наиболее перспективным и дающим наилучшие результаты имитационных экспериментов. Отмечается также, что идея многоподходного имитационного моделирования довольно проста: она даёт возможность органично совмещать и комбинировать методы моделирования так, чтобы достоинства одних подходов компенсировали недостатки других [20].

Другой важной особенностью имитационного моделирования является возможность визуализации и доступные механизмы анализа работы имитационной модели. С точки зрения визуализации для каждой прикладной системы моделирования положительными моментами являются:

возможность анимации модели и визуализация данных;

возможность 3D-анимации;

возможность просмотра работы модели в режиме реального и ускоренного времени.

Для сравнительной оценки также важно исследовать доступные механизмы анализа имитационной среды. Программный продукт является конкурентоспособным, если он обеспечивает:

возможность проведения анализа чувствительности;

возможность проведения оптимизации производственной среды;
 применение метода Монте-Карло;
 возможность осуществления сценарного анализа [21, 22].

На основе перечисленных выше критериев отбора имитационных сред были определены наиболее перспективные программные продукты для моделирования производственных процессов, представленные на отечественном рынке и успешно применяемые для имитационного моделирования производственных процессов металлоёмких производств на предприятиях машиностроения. Сведения о них приведены в таблице.

Все представленные в таблице прикладные программы могут использоваться для моделирования производственного процесса изготовления материалоёмких деталей. Эти прикладные программы обеспечивают:

- планирование производства;
- проектирование производственных помещений и планирование производительности;
- совершенствование процессов, анализ слабых мест;
- оптимизацию производственного цикла;
- оптимизацию ресурсов: персонала и оборудования;
- планирование запасов (в частности, незавершенного производства и сырья).

Безусловно, выбор той или той имитационной среды осуществляет конкретный потреби-

тель. При этом немаловажным фактором является стоимость программного продукта. Она варьируется в пределах от примерно 360 000 руб. за программу имитационного моделирования AnyLogic 6.3.1 до примерно 760 000 руб. за программный продукт Arena 12.0 [9].

Выводы. На основе проведённых исследований обоснована целесообразность использования имитационного моделирования в специальных прикладных средах при проектировании и оптимизации производственных систем по изготовлению металлоёмких деталей предприятиями отечественного машиностроения. Очевидно, что другие методы моделирования (математические, натурные, физические и др.) малоприменимы для моделирования сложных систем, к которым можно отнести производственные среды. Это обусловлено сложностью реализации данных методов моделирования (например, физического или натурального) и дороговизной их реализации.

Сформулированы основные требования к имитационным программам и критерии их отбора для проведения имитационного моделирования. Исследованы возможности программных сред имитационного моделирования как отечественных, так и зарубежных разработчиков, представленных на современном российском рынке информационных технологий.

Выбор предприятием той или иной программы имитационного моделирования зависит не только от выявленных возможностей

Прикладные программы для имитационного моделирования производственных процессов металлоёмких производств

Наименование программы имитационного моделирования	Разработчик	Сайт программного продукта, разработчика или дистрибьютора в Российской Федерации
Arena	Rockwell Automation Inc., Wexford, PA, США	http://www.arenasimulation.com
AutoMod	Brooks Automation, США	http://www.automod.se/eng/home.html
AnyLogic	ООО «Экс Джей Текнолоджис» («XJ Technologies»), Российская Федерация	http://www.anylogic.ru
AweSim	Symix Systems Inc., США	—
Deneb/Quest	BNP Deneb Pty Ltd., Австралия	http://deneb.com.au
Enterprise Dynamics	Incontrol Simulation Solutions, Нидерланды	http://www.incontrolsim.com
Flexsim	FlexSim Software Products Inc. (FSP), Orem, США	http://www.flexsim.com
Tecnomatix Plant Simulation	Siemens Industry Software, Германия	—
ProModel Solutions	ProModel Corporation, США	http://www.promodel.com
Simplex3	—	http://www.simplex3.net
Simul8	Corporate Headquarters, Boston, США	http://www.simul8.com
Witness	The Lanner Group Ltd, США	http://www.witness-for-simulation.com

программных сред, но и от ряда дополнительных факторов:

наличия опыта специалистов конкретного предприятия в области работы с той или иной программой имитационного моделирования, возможности организации обучающих курсов и тренингов на сайте разработчика;

возможности бесплатного дистанционного обучения работе с программой;

стоимости программной среды;

возможности организации оперативного консультирования разработчиком программного продукта или специалистами его дилерского центра, возможности организации оперативной технической поддержки.

Библиографические ссылки

1. **Ревина И.В., Бояркин Г.Н.** Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 230—234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234.

2. **Белоусов В.Е., Крахт Л.Н., Поцбенева И.В.** Модель построения оптимальной структуры бизнес-процессов в системе организационного управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 195—197.

3. **Имитационное моделирование производственных систем** / под общ. ред. А.А. Вавилова. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.

4. **Строгалева В.П., Толкачева И.О.** Имитационное моделирование. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 737.

5. **Shannon R.E.** Introduction to the art and science of simulation / Ed. D.J., Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson et al. // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conf. 1998. P. 7—14.

6. **Свищёв В.И.** Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермского государственного технологического университета, 2006. 116 с.

7. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. Т. III-2. Технологии заготовительных производств / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. М.: Машиностроение, 1996. 736 с.

8. **Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н. и др.** Современные технологии авиастроения / под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

9. **Михеева Т.В.** Обзор существующих программных средств имитационного моделирования при исследовании механизмов функционирования и управления производственными системами // Журнал теоретических и прикладных исследований «Известия Алтайского государственного университета». Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 1 (61). С. 87—90.

10. **Yan-mei Y., Xin-jun L.** Optimization of Ex-warehouse and Warehousing for Logistics Park Based on Com-

puter Simulation // Proceedings of the 2016 3rd Intern. Conf. on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC 2016). 2016. P. 1331—1337. DOI: 10.2991/icmemtc-16.2016.261.

11. **Kelton W.D., Sadowsky R.P., Sturrock D.T.** Simulation with Arena. N.Y.: The McGraw-Hill Companies, 2010. 658 p.

12. **Oprea C., Rosca E., Popa A.** et al. The quality of service in passenger transport terminals // IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. P. 1—9.

13. **Кокарева В.В., Смелов В.Г., Шитарев И.Л.** Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции «бережливое производство» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3 (34). С. 131—134.

14. **Карпов Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. СПб.: Наука, 2006. 723 с.

15. **Nyemba W.R.** Modeling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plan // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 8. P. 59—66.

16. **Поцбенева И.В., Иванова А.В., Иварлак К.Д., Ермакова О.В.** Анализ программ имитационного моделирования для совершенствования процессов и конструкций / Труды 8-й ВНТК «Современные инновации в науке и технике». Воронеж, 19—20 апреля 2018 г. С. 162—166.

17. **Рванцов Ю.А.** Сравнительный анализ систем имитационного моделирования деловых процессов по критерию функциональной полноты // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 1 (52). С. 69—72.

18. **Васимова И.Н., Садковская Н.Е., Садковский Б.П., Жаров М.В.** Оптимизация производственных процессов с помощью моделирования в программной среде AnyLogic на предприятиях авиационной и ракетно-космической отрасли // Научно-технический журнал «Научкоёмкие технологии». 2018. № 6. С. 18—24.

19. **Жаров М.В.** Имитационное моделирование производственной среды цехов механической обработки // Автоматизация в промышленности. 2020. № 5. С. 34—37.

20. **Кудряшова Э.Е.** Визуальное моделирование при разработке бизнес-плана // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 8 (46). С. 104—108.

21. **Кабанов А.А.** Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ. Вып. № 65 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (дата обращения: 12.06.2021).

22. **Алешина Е.Е., Саломатина А.А., Яблочников Е.И.** Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы DELMIA // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 50—53.

Ссылка для цитирования

Жаров М.В. Исследование перспектив применения программных сред имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 531—536. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-531-536.

УДК 621.91:004.02+004.9+005+006.72

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-537-546

Е.Н. Колыбенко, канд. техн. наук
(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)
e.n.kolybenko@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ В СТРУКТУРЕ ПОЛЯ ДОПУСКА МЕЖПЕРЕХОДНОГО РАЗМЕРА НА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В СТРУКТУРЕ ИСХОДНЫХ ЗАГОТОВОК

Для определения первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера использована база знаний технологической подготовки производства по семи уровням её базовых объектов функционально различных типов. Поставленная задача решается в рабочем пространстве рабочих машин, в структуру которых встроены две технологические схемы: для базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины и для базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах. Технологические схемы базирования исходных заготовок в рабочие машины в общем случае оказывают существенное влияние на геометрические и размерные погрешности (рассматриваемая составляющая) подлежащих преобразованиям элементов формы в технологических схемах базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах. Показано, что определение первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера необходимо проводить средствами специализированных интеллектуальных контрольно-измерительных систем, встраивая их в структуру рабочих машин. Определение первой составляющей в структуре поля допуска межпереходного размера актуально, имеет научную новизну и практическую значимость.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства; обработка резанием; системный анализ; информационная технология; моделирование решений; системотехнология.

To determine the errors first component in the tolerance field structure of the inter-transition size the knowledge base of the production technological preparation by seven levels of its basic objects of functionally different types is used. The task is solved in the working space of working machines, in the structure of which two technological schemes are built: for basing the initial blanks in working machines and for basing form elements in working machines and their geometric forming on working machines. Technological schemes for basing the initial blanks into working machines in the general case have a significant impact on the geometric and dimensional errors (the considered component) of the shape elements to be converted in the technological schemes for basing form elements into working machines and their geometric forming on working machines. It is shown that the determination of the errors first component in the tolerance field structure of the inter-junction size must be carried out by means of specialized intelligent control and measuring systems, embedding them in the structure of working machines. Determination of the first component in the tolerance field structure of the inter-transition size is relevant, has scientific novelty and practical significance.

Keywords: technological preparation of production; cutting processing; system analysis; information technology; modeling solutions; systems technology.

Формализованные обозначения, используемые в статье:

ТПП (ОП) — технологическая подготовка основного (резание) производства;

КПП — конструкторская подготовка производства;

ТПП (ЗП) — технологическая подготовка заготовительного производства.

В основу изложенного материала положены системные принципы подхода к решению задач.

Введение. 1. Уточнение всех составляющих интегральной погрешности в структуре поля допуска [1] для их учёта в структуре межпереходного размера подлежащих преобразованиям резанием функционально различных элементов геометрической формы — одно из основных направлений определения нормативной справочной базы для решения задач ТПП (ОП) по всему её циклу. Служебные функции всех составляющих в структуре

межпереходного размера элементов формы — определение межпереходного и общего наименьшего припуска на последующие преобразования каждого единого элемента формы в структуре исходных заготовок.

В работе Б.С. Балакшина [2] обращено внимание на нерешённую задачу: «...откуда следует брать допуски на межпереходные размеры». Предваряя последующие решения этих задач, можно утверждать: «Расчётные значения допусков межпереходных размеров изначально могут быть определены только в результате экспериментальных измерений размерных и геометрических погрешностей подлежащих преобразованиям элементов формы непосредственно в структуре реальных рабочих машин для обработки резанием».

2. Подходы различных авторов к определению структуры поля допуска межпереходных размеров для решения задач ТПП (ОП) различаются. Единство в том, что в их основу положено оперирование средствами конструкторской элементной базы пяти групп, обеспеченных параметрами их проектного качества для определения объектов конструирования [3]:

1-я группа — линейные и угловые размеры элементарных простых, составных налагаемых простых и сложных элементов геометрической формы; линейчатых поверхностей с прямой направляющей линией;

2-я группа — макро- и микрогеометрическая форма элементов (высота микронеровностей);

3-я группа — отношения взаимного расположения (позиционные) между геометрическими осями основных и налагаемых простых и сложных элементов формы в структуре составных элементов формы;

4-я группа — отношения взаимного расположения между геометрическими осями различных элементов формы;

5-я группа — связи взаимного расположения (позиционные) между центрами систем координат функционально различных элементов формы в структуре одного объекта и различных объектов.

3. С одной стороны, результаты решения задач по функциям определения всех составляющих в структуре поля допуска межпереходных размеров оказывают существенное влияние на определение содержания и последовательности преобразований элементов формы по маршруту технологических операций. Содержание и последовательность преобразований элементов формы в их связи с интегральной погрешностью в структуре поля допуска межпереход-

ного размера первично определяют в пределах элемента управления технологический переход с функциями рабочий ход (черновой, полустистой, чистой). С другой стороны, на определение содержания и последовательности преобразований элементов формы по маршруту операций существенное влияние оказывает объективно существующий барьер трёх основных трудностей [4]: 1) огромное разнообразие информационных и логических связей между параметрами проектного качества основных элементов (средств) интеграции в структуре деталей и сборочных узлов изделий конструирования на их возможном множестве; 2) информационные и логические связи знаний ТПП (ОП) прерваны по маршруту технологических операций при переходе от одной рабочей машины к другой, а также между стадиями ТПП (ОП) и КПП; 3) понятия знаний ТПП (ОП) не связаны в строгую систему и часто не актуализированы для решения задач формализации знаний как условия успешного перехода к автоматизации. Неудачные попытки преодолеть эти трудности средствами САПР, в основу которых положены средства конструкторской элементной базы, предприняты в работе [5].

4. Для определения нормативной справочной базы как системной основы решения задач ТПП (ОП) по всему её циклу необходима принципиально отличная от средств конструкторской элементной базы своя органичная технологическая элементная база средств. Для определения состава таких средств автором предложена база знаний ТПП (ОП) в иерархии её структуры [4] по семи уровням её базовых объектов функционально различных типов (рис. 1). В структуре базовых объектов знаний каждого типа определяем свой состав средств технологической элементной базы, каждое средство подлежит обеспечению своими функционально различными параметрами проектного качества. В состав параметров проектного качества введены нормативно упорядоченные предельно допускаемые отклонения точности основных элементов (средств) интеграции технологической элементной базы.

5. Для определения структуры каждого из базовых объектов знаний в структуре базы знаний ТПП (ОП) используется системотехнология (методы, средства, алгоритмы, операции) в её редакции как соответствующие технологии информационного логического моделирования [4]. Эти технологии позволяют достигать соответствующих целевых функций решения задач практики ТПП (ОП). Одна из основных целе-



Рис. 1. Структура базы знаний предметной области в её иерархии по семи уровням классификации базовых объектов знаний функционально различных типов

вых функций — «Обеспечение непрерывности и гибкости интегрального алгоритма в информационной детерминированной высокого уровня автоматизации технологии решения задач практики ТПП (ОП) по всему её циклу.

6. В структуре поля допуска межпереходного размера изначально определяется первая составляющая погрешностей [1], оказывающая наиболее существенное влияние на определение содержания и последовательности преобразований элементов формы по маршруту технологических операций в структуре систем рабочих машин.

Задачи определения первой составляющей погрешностей решаются в структуре базового объекта знаний второго типа (рис. 1, 4-й уровень) — информационное изделие стадии ТПП (ОП), которому соответствуют рабочие машины для обработки резанием в пределах технологической операции. В основу этого базового объекта знаний положена структура первого и второго базовых объектов знаний первого типа (5-й уровень) в их информационной и логической связи. Этим базовым объектам знаний соответствуют две технологические схемы: базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины; базирования элементов формы в рабочие машины и геометрического

образования резанием элементов формы на рабочих машинах. Указанные две технологические схемы — инструментальные средства решения задач практики ТПП (ОП) на их возможном множестве. В состав инструментальных средств также вводим базовый объект знаний четвертого типа (2-й уровень) — технологическая схема базирования деталей и сборочных узлов в изделия конструирования. Эта технологическая схема необходима для организации информационных и логических связей знаний между стадиями ТПП (ОП) и КПП; для решения задач практики ТПП (ОП) по маршруту операций в системе рабочих машин в соответствии с содержанием и последовательностью преобразований функционально единого элемента геометрической формы. Системам рабочих машин соответствует структура базового объекта знаний третьего типа (3-й уровень) — информационное изделие стадии ТПП (ОП).

Каждый базовый объект знаний ТПП (ОП) определён в условиях статической настройки технологических схем взаимодействия объектов без использования сил какой-либо природы, так как приходится оперировать с геометрическими (информационными) объектами.

7. Исходная заготовка стадии ТПП (ЗП) — главный функционально значимый информационный объект в информационной автоматизированной технологии решения задач ТПП (ОП) на их возможном множестве. Исходные заготовки распознают по их формализованным обозначениям в соответствии с формализованными обозначениями деталей стадии КПП.

Структура исходных заготовок определяется в двух функционально различных частях в их принадлежности двум технологическим схемам (см. п. 6) по функциям решения двух задач: базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины; базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах.

Каждая функциональная часть структуры исходных заготовок определяется как ведомый объект преобразования в условиях его взаимодействия со своим ведущим объектом [4].

Для определения полного состава средств технологической элементной базы решения

задач практики ТПП (ОП) исходная заготовка вначале методом синтеза в прямом направлении подлежит определению встраиванием в её структуру двух рассматриваемых технологических схем взаимодействия объектов. Встраивание необходимо в соответствии с содержанием и последовательностью преобразований функционально единого элемента формы в структуре исходных заготовок по маршруту операций в системе рабочих машин. Структура исходных заготовок после преобразований соответствует структуре систем рабочих машин.

Материальная исходная заготовка, соответствующая своему информационному прототипу, далее подлежит преобразованию в обратном направлении методом декомпозиции в структуру деталей, сборочных узлов методами обработки резанием в условиях динамической настройки рабочих машин в общем случае по маршруту технологических операций в системе рабочих машин. При этом решаются задачи перераспределения параметров проектного качества для основных элементов (средств) интеграции из структуры исходных заготовок в структуру деталей, сборочных узлов.

Принятие такого решения — вынужденная практика преодоления объективных трудностей (см. п. 3) в автоматизированной технологии определения содержания и последовательности преобразований элементов формы по маршруту операций в системе рабочих машин.

8. Принципиально важно определить источник первой составляющей погрешности в структуре поля допуска межпереходного размера и на какие решения он оказывает влияние.

Источником первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера для подлежащих преобразованиям элементов формы является структура технологических схем базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины.

Результаты решения задач базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины предопределяют появление первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера при решении задач базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах.

Задачи, решаемые в структуре технологических схем базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины. Формализованное обозначение по содержанию материала: [...] — значение (обозначение) параметра.

9. Понятие «базирование» — концептуальное системообразующее понятие — по своим семантическим и синтаксическим свойствам обладает свойствами квантора $|\forall|$ единства и общности относительно какой-либо предметной области знаний. В частности, оно обладает инвариантными свойствами относительно базирования как деталей, сборочных узлов стадии КПП, так и базирования исходных заготовок, заготовок стадии ТПП (ОП).

Понятие «базирование» в ТПП (ОП) опирается на его определение в ГОСТ 21495—76. Базирование и базы в машиностроении и работе [2]. Однако понятие «базирование» в приведенных источниках некорректно и логически не завершено. Впервые это было отмечено в работе [6]. Верно то, что система координат должна быть выбрана. Некорректность понятия заключается в том, что выбор определён по функциям неопределённости относительно чего. Логическая незавершённость понятия в том, что выбранная система координат не определена. Базирование кругового вала на призму — пример того, как нельзя придавать «требуемое положение валу относительно выбранной системы координат», если выбрана система координат вала. Система координат в технологической схеме базирования кругового вала на призму должна быть определена на основе свойств симметрии призмы в пересечении двух взаимно ортогональных плоских поверхностей вдоль её геометрической оси. Одна плоскость — по положению точек контакта вала с призмой, другая — плоскость симметрии призмы, включающая геометрическую ось вала. Однако традиционная практика ТПП (ОП) ориентирована на выбор системы координат вала по геометрическим осям его симметрии.

Свойства понятия «базирование» и функции знаний, следующие из его формулирования в традиционных знаниях, нельзя использовать в информационной автоматизированной технологии решения задач практики ТПП (ОП). В такой технологии все функционально значимые понятия базы знаний ТПП (ОП) информационно и логически связаны в математически строгую систему. Для каждого из них помимо актуализации семантических и синтаксических свойств по функциям формализации знаний присваиваются символические свойства. Формализованные понятия изначально подлежат встраиванию в структуру основных базовых объектов знаний на правах элементов структуры и связей между элементами структуры.

Необходимо различать понятия «ориентация» и «положение» элементов в структуре систем координат ведомых объектов базирования и ведущих базирующих объектов в технологических схемах их сопряжения. Также принципиально важно учитывать состав элементов формы, участвующих в сопряжении со стороны каждого объекта взаимодействия.

Так как задачи базирования какого-либо ведомого объекта решаются наложением связей базирования на элементы структуры в системах координат функциональных элементов формы ведомого объекта со стороны функциональных элементов формы в структуре ведущего базирующего объекта [4], то определение структуры технологических схем базирования рассматриваем в отношении преобразуемого по положению объекта базирования.

Функциональный элемент формы в структуре технологических схем базирования каких-либо объектов — элемент формы, исполняющий функции лишения объектов базирования каких-либо степеней свободы перемещений и поворотов (функции базирования) [4].

Рассмотрение именно элементов структуры в системах координат объектов базирования принципиально важно, так как состав функций базирования в различных технологических схемах базирования переменен: полный состав шесть (рис. 2) — во всех направлениях осей H , O , P ; неполный — в различных сочетаниях элементарных и составных функций.

В основу решения задач базирования ведомых объектов положено перераспределение элементов структуры в системах координат их функциональных элементов формы в положение, соответствующее положению элементов структуры в системах координат функциональных элементов формы ведущих базирующих объектов. Такое перераспределение — следствие перераспределения отношений и

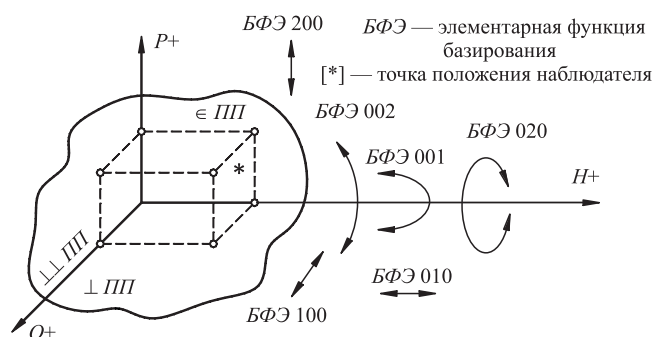


Рис. 2. Схема распределения элементарных функций базирования между элементами структуры правой прямоугольной системы координат Декарта

связей взаимного расположения между геометрическими осями функциональных элементов формы и центрами их систем координат соответственно. В результате таких перераспределений система координат ведомых объектов базирования находится в функциональной зависимости от состава функциональных элементов формы участвующих в сопряжении объектов взаимодействия и от состава исполняемых ими функций базирования; определяется частично или полностью.

Нефункциональные элементы формы в структуре технологических схем базирования каких-либо ведомых объектов в общем случае решения задач базирования могут быть подвержены перераспределению ориентации элементов в структуре их систем координат относительно элементов в структуре системы координат ведомых объектов базирования.

Задачи силового фиксирования положения объектов базирования, достигнутого в решении задач базирования наложением связей закрепления, решают в условиях динамической настройки технологических систем для взаимодействия материальных объектов базирования и базирующих объектов. Ожидаемое проектное положение систем координат ведомых объектов базирования функционально зависит от направления наложения связей закрепления (силового фиксирования) на объекты базирования. Направления наложения связей закрепления характеризуют двумя возможными вариантами: соответствие и несоответствие ожидаемому проектному решению. Несоответствие направления наложения связей закрепления препятствует достижению проектного положения для системы координат ведомых объектов базирования — грубейшее нарушение и в дальнейшем рассматриваться не будет.

Состав функциональных элементов формы и состав исполняемых ими функций базирования, а также разнообразие размерных и геометрических параметров функциональных элементов формы определяют состав функций базирования исходных заготовок и заготовок. Автором зарегистрировано около 150 схем.

10. Первая составляющая погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера характеризует геометрические и размерные погрешности подлежащих преобразованиям различных элементов формы в структуре технологических схем базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах.

Функциональное разнообразие первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера, достойное объединения в первую группу погрешностей межпереходного размера, соответствует функциональному разнообразию технологических схем базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины.

11. Структура рабочих машин определена в контуре функционально различных отношений и связей взаимного расположения между геометрическими осями и центрами систем координат в структуре двух технологических схем, входящих в структуру: базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины; базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах.

Отношения взаимного расположения: совмещение; несовмещение (неперпендикулярность, непараллельность) определены по двум направлениям: 1) в структуре рабочих машин — между направляющими осями в системах координат двух технологических схем базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины, базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах; 2) в структуре технологических схем базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах — между геометрическими осями основных и налагаемых простых и сложных элементов формы в структуре составных элементов формы (см. п. 2); между геометрическими осями различных элементов формы (см. п. 2).

Для наложения связей взаимного расположения определены центры трёх функционально различных систем координат: 1) центр неподвижной ведущей системы координат, определяемый в структуре технологической схемы базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины; 2) начальное положение центра потенциально подвижной ведущей системы координат в последовательно циклично сменяемой структуре технологической схемы базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах; 3) конечное положение центра подвижной ведущей системы координат в последовательно циклично сменяемой структуре технологической схемы базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах. Начальное и конечное положения центра подвижной ведущей системы

координат в последовательно циклично сменяемой структуре технологической схемы базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах определяем по положению соответствующих двух точек контакта режущей части инструмента с подлежащим технологическим преобразованиям элементом формы. Определённости положения центров систем координат пп. 1, 3 соответствует совмещение систем координат подлежащих преобразованиям элементов формы с системами координат в структуре рабочих машин.

Определение первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера на преобразования функционально различных элементов формы.

12. Формализованные обозначения:

[МП-Размер] — нормативно упорядоченный параметр в структуре поля допуска межпереходного размера, определяемый экспериментальными измерениями в условиях статической настройки рабочих машин для обработки резанием и характеризующий как геометрические, так и размерные погрешности подлежащих преобразованиям элементов формы; параметр [МП-Размер] встраивается во все элементы формы структуры исходных заготовок, подлежащие преобразованиям по маршруту технологических операций в системе рабочих машин, а также в межпереходные и общий наименьший припуски на его основе;

[Л — Размер (ЗП, ОП)] — линейные размеры элементов формы в структуре исходных заготовок и заготовок соответственно на стадиях ТПП (ЗП, ОП), используемые для решения задач базирования в рабочую машину для обработки резанием;

[ОВР] — отношения взаимного расположения функционально различных геометрических осей в структуре рабочих машин (см. п. 11, пп. 1, 2);

[СВР] — связи взаимного расположения центров трёх функционально различных систем координат в структуре рабочих машин (см. п. 11, пп. 1...3).

Наложение отношений и связей взаимного расположения реализуется вспомогательными позиционными и межпереходными движениями рабочих органов станков в общем случае в пространстве рабочих машин вдоль, ортогонально и вокруг их координатных осей.

Для исполнения функций экспериментальных измерений рабочие органы станков необходимо оснащать средствами специализированных интеллектуальных контрольно-

измерительных систем, встраивая их в структуру рабочих машин.

Экспериментальные измерения параметра |МП-Размер| необходимы в диапазоне (min, max) в общем случае как вдоль, так и ортогонально координатным осям рабочих машин для обработки резанием по векторам $\rho \langle \perp \rho_1, \rho_1, \rho_2 \rangle$, $|\perp \rho_1| - |X|$ в плоскости (X, Z) ; $|\rho_1| - |Y|$ в плоскости (X, Y) ; $|\rho_2| - |Z|$ в плоскости (Z, Y) .

Межпереходные и общий наименьший припуски также подлежат рассмотрению по векторам $\rho \langle \perp \rho_1, \rho_1, \rho_2 \rangle$ функционально различных движений рабочих органов станков.

13. В основу определения параметра |МП-Размер| положено распределение функциональных опорных точек сопряжения объектов базирования и базирующих объектов, обеспечивающих исполнение функционально различными элементами формы в структуре ведомых объектов базирования элементарных и составных функций базирования [4].

(БФЭ, БФС) |XXX| — элементарные и составные функции базирования для ограничения перемещений и поворотов элементов в структуре системы координат объекта базирования.

КСБ — система координат объекта базирования, определяемая в схеме сопряжения объектов методом базирования.

Схема распределения элементарных функций базирования между элементами структуры правой прямоугольной системы координат Декарта приведена в рис. 2.

КСБ (\in ПП (H, P); \perp ПП (H, O); $\perp\perp$ ПП (O, P); КСБЦ).

ПП — плоскость параллелизма.

\perp ПП (H, O) — опорная плоскость.

$H \in$ (ПП \cap \perp ПП) — направляющая ось.

\in ПП (H, P) — направляющая плоскость.

$\perp\perp$ ПП (O, P) — упорная плоскость.

$O \in$ (\perp ПП \cap $\perp\perp$ ПП) — опорная ось.

$P \in$ (ПП \cap $\perp\perp$ ПП) — упорная (persistent — англ.) ось.

КСБЦ — центр в системе координат объекта базирования, определённый по положению первой и второй опорных точек сопряжения объектов в поперечном сечении относительно координатной направляющей оси |H| технологической схемы базирования.

14. Состав (в общем случае не более пяти) [4] функционально различных элементарных и составных элементов формы, участвующих в решении задач базирования исходных заготовок и заготовок в рабочую машину, определён на основе исполнения ими своих функций базирования. В основу исполнения функций

базирования выбранными элементами формы положено распределение в общем случае шести функциональных опорных точек сопряжения объектов базирования и базирующих объектов по двенадцати вариантам.

Первый—шестой варианты — исполнение какой-либо одной элементарной функции базирования в общем случае из шести БФЭ (200, 100, 002, 001, 010, 020).

Седьмой—двенадцатый варианты — исполнение одновременно составных функций базирования в различных сочетаниях. Седьмой вариант — исполнение БФС (200, 002) в сопряжении, например, двух плоских поверхностей. Восьмой вариант — исполнение БФС (100, 001) в сопряжении, например, двух плоских поверхностей. Девятый вариант — исполнение БФС (200, 100) в сопряжении, например, двух конических поверхностей. Десятый вариант — исполнение БФС (200, 100) в сопряжении, например, круговых цилиндров. Одиннадцатый вариант — исполнение БФС (002, 001) в сопряжении, например, круговых конических поверхностей. Двенадцатый вариант — исполнение БФС (200, 100, 002, 001) в сопряжении поверхностей, например, резьбовых, зубчатых, цилиндрических кругового вращения, квадратов, шестигранников.

15. Возможные преобразования положения элементов в структуре системы координат объектов исходных заготовок и заготовок, а также опорных точек сопряжения объектов определяются на основе пяти системных принципов управления функциональной зависимостью этих преобразований: (А, В, С, D, E).

А — преобразование положения КСБЦ исполнением БФЭ (200, 100) отдельно или одновременно выбранными элементами формы в диапазоне (min, max) параметров |Л — Размер (ЗП, ОП)| с учётом параметров |форма|.

В — преобразование положения правой точки координатной направляющей оси |H| объекта базирования относительно КСБЦ исполнением БФЭ (200, 100) отдельно или одновременно выбранными элементами формы в диапазоне (min, max) параметров |СВР| с учётом параметров |Л — Размер (ЗП, ОП)| и параметров |форма|.

С — преобразование положения третьей и четвёртой опорных точек сопряжения объектов относительно КСБЦ исполнением БФЭ (002, 001) отдельно или одновременно выбранными элементами формы в диапазоне (min, max) параметров |СВР| по осям (H, O, P) с учётом параметров |Л — Размер (ЗП, ОП)| и параметров |форма|.

Д — преобразование *КСБ* для ограничения её в свободе перемещений вдоль оси $|H|$ исполнением *БФЭ* 010 выбранным элементом формы в диапазоне (min, max) параметров $|СВР|$ по осям (H, O, P) с учётом параметров $|Л — Размер (ЗП, ОП)|$ и $|форма|$.

Е — преобразование *КСБ* для ограничения её в свободе поворота вокруг оси $|H|$ исполнением *БФЭ* 020 выбранным элементом формы в диапазоне (min, max) параметров $|СВР|$ по осям (H, O, P) с учётом параметров $|Л — Размер (ЗП, ОП)|$ и $|форма|$.

16. Понятия и их формализованные обозначения, используемые для характеристики пространства рабочих машин для обработки резанием, приводятся в соответствие с решением задач проведения экспериментальных измерений параметра $|МП-Размер|$.

Координатные направляющие оси в структуре технологических схем для базирования исходных заготовок и заготовок — $|H|$.

Координатные направляющие оси в структуре технологических схем для базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах — $|Z|$.

$|ОВР|$ в диапазоне (min, max) параметров между координатными осями $|H|$ и $|Z|$: совмещение — 1;

несовмещение: параллельно, ортогонально, под углом в плоскости (совмещение осей в точке) — 2; несовмещение в пространстве — 3.

$|СВР|$ в диапазоне (min, max) параметров между центрами двух ведущих систем координат в структуре указанных (см. п. 11) технологических схем: отсутствуют — 1; имеются — 2.

17. Экспериментальные измерения параметров $|МП-Размер|$ в диапазоне (min, max) необходимы для вариантов $|ОВР 2|$, $|ОВР 3|$, $|СВР 2|$ в пространстве рабочих машин между начальной и конечной точками контакта режущих частей инструментов с подлежащими преобразованиям элементами формы (см. п. 11) на возможном множестве точек контакта. Это положение рассматривается на инвариантной основе относительно возможного множества рабочих машин по функциям реализации в их структуре функционально различных методов обработки резанием на их возможном множестве.

18. Системные принципы управления преобразованиями параметра $|МП-Размер|$ исходя из значений параметров $|ОВР|$ и $|СВР|$ (см. п. 16) рассмотрены в пространстве рабочих машин некоторых групп из их возможного множества.

В условиях существования параметров $|ОВР 1|$ и $|СВР 1|$ параметр $|МП-Размер|$ не существует. Такое положение реализовано в пространстве рабочих машин протяжной и бесцентрово-шлифовальных групп на основе обладания свойствами квантора $|\forall|$ единства и общности элементов в структуре ведущих систем координат двух рассматриваемых технологических схем (см. п. 11) и квантора единственности их существования $|\exists 1|$.

Так, например, базирование втулки для протягивания в ней отверстия осуществляется на основе исполнения *БФЭ* (200, 100) центрированием правой точки координатной оси отверстия по режущему инструменту — базирующему объекту, затем исполнением *БФЭ* (002, 001) в процессе протягивания отверстия. Динамичное исполнение *БФЭ* (002, 001) завершается центрированием левой точки координатной оси отверстия. Левая точка координатной оси отверстия также исполняет *БФЭ* 010 на основе сопряжения плоской поверхности левого торца втулки с подвижной шаровой опорой. В этой схеме сопряжения объектов базирующий объект представлен двумя элементами из состава технологического оснащения рабочей машины: подвижная шаровая опора и режущий инструмент. Исполнение *БФЭ* 020 возможно режущим инструментом при протягивании внутренних и внешних пазов.

Примеры определения параметра $|МП-Размер|$ в пространстве рабочих машин токарной группы рассматриваются по двум вариантам.

Первый вариант — параметры $|ОВР 1|$ и $|СВР 2|$. Второй вариант — параметры $|ОВР 2|$ и $|СВР 2|$. Оба варианта возможны, в частности, при определении положения оси $|H|$ в технологических схемах базирования валов методом центрирования двух точек с использованием центровых отверстий конической формы.

Первый вариант — параметры $|ОВР 1|$ и $|СВР 2| \Rightarrow$ технология формообразования резанием двух центровых отверстий конической формы обеспечивает совмещение осей $|H|$ и $|Z|$.

Во втором варианте параметр $|МП-Размер|$ находится в зависимости от несовмещения геометрической оси правого центрового отверстия относительно координатной оси левого центрового отверстия, что соответствует несовмещению осей $|H|$ и $|Z|$. При этом параметр $|МП-Размер|$ тем больше, чем больше несовмещение осей центровых отверстий.

Существенное влияние на параметр $|МП-Размер|$ в этих трёх вариантах оказывают погрешности параметров $|форма|$ геометрических элементов, подлежащих преобразованиям.

Метод центрирования двух точек координатной направляющей оси $|H|$ используется также в схемах базирования круговых валов на призму. Алгоритм (последовательность операций преобразования) в технологии (методы, соответствующие средства) реализации этого примера аналогичен алгоритму в технологии реализации примера центрирования двух точек двумя центровыми отверстиями конической формы на рабочих машинах токарной группы.

19. Диапазон (min, max) изменений параметров $|MP\text{-Размер}|$ подлежащих преобразованиям резанием элементов формы в структуре исходных заготовок находится в функциональной зависимости от принципов выбора последовательности и содержания технологических операций по их маршруту в системе рабочих машин. Акценты необходимо ставить на последовательность операций, рациональный её выбор существенно уменьшает влияние на параметры $|MP\text{-Размер}|$ первичных погрешностей параметров (ОВР, СВР) (см. п. 16).

Выбор последовательности технологических операций необходимо осуществлять исходя из учёта трёх важных формулируемых и циклично применяемых системных принципов. Если первый принцип применить нецелесообразно (в общем случае не может быть реализован), то выбор необходимо осуществлять исходя из учёта второго и третьего принципов. Принцип 1: использование принципа «совмещения конструкторской и технологической баз» при решении задач базирования исходных заготовок для преобразований элементов формы в первой операции. Принцип 2: первичный выбор технологических схем базирования исходных заготовок и соответствующих элементов формы для первичных технологических преобразований должен быть направлен на устранение погрешностей параметров (ОВР, СВР) (см. п. 16) или, по крайней мере, на тенденцию к их уменьшению в последующих операциях. Принцип 3: если выбор принципа 2 затруднён, важно позаботиться о технологических преобразованиях элементов формы, которые могут быть использованы в роли технологических баз в частях исходных заготовок для базирования в последующих операциях.

20. В традиционной нормативной справочной базе для решения задач ТПП (ОП) [7—9] первую составляющую погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера определяют преимущественно в графических информационных масштабируемых отображениях, имитирующих сопряжение исходных за-

готовок стадии ТПП (ЗП) с соответствующими технологическими приспособлениями стадии ТПП (ОП). При этом элементы формы в структуре исходных заготовок, участвующие в решении задач их базирования в технологические приспособления, задаются в диапазоне изменений их реальных геометрических и размерных параметров относительно выбранных осей в системах координат исходных заготовок (условно — относительно координатных осей (H, O, P) , определённых по положению левой точки оси H). Возможные линейные смещения геометрических осей элементов формы (участвующих в решении задач их базирования) вдоль осей (O, P) и угловые их смещения относительно оси H , определённые в диапазоне изменений их геометрических и размерных параметров, фиксируются как потенциальные значения погрешности базирования (условно — как первая составляющая погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера). Погрешности базирования, полученные в технологических схемах базирования исходных заготовок в рабочие машины по их видам, упорядочиваются их расчётом для использования в справочной нормативной документации на проектирование как рекомендуемые предельно допускаемые отклонения точности. Встраивание расчётных значений допусков, полученных в графических отображениях технологических схем базирования исходных заготовок, в межпереходные размеры подлежащих преобразованиям резанием элементов формы некорректно.

Перспектив появления методов аналитического расчёта параметров $|MP\text{-Размер}|$ для подлежащих преобразованиям резанием элементов формы в структуре исходных заготовок и заготовок автор этой работы, как и автор работы [2], не видит.

21. Параметр $|MP\text{-Размер}|$ — один из важнейших в нормативной справочной базе ТПП (ОП) для решения проектных задач определения последовательности и содержания технологических операций по их маршруту в системе рабочих машин для преобразования резанием функционально различных элементов формы в структуре исходных заготовок и заготовок. Он подлежит экспериментальным измерениям в условиях предприятий металлообработки средствами специализированных интеллектуальных контрольно-измерительных систем, встраиваемых в структуру рабочих машин. Например, работа используемого в практике предприятий металлообработки России импортного оборудования с ЧПУ уже основана

на экспериментальных измерениях параметров подлежащих преобразованиям элементов формы контрольно-измерительными системами твердотельного моделирования. Средствами информационного и программного обеспечения интернет-технологий типа Индустрия 4-0 в режиме сложного диалога с пользователями системы проводятся анализ результатов и принятие решений по содержанию и последовательности технологических операций.

22. Нормативное упорядочение параметра $|MP-Размер|$ возможно только на множестве примеров, накопленных в информационных моделях и базах данных на основе моделей по функции идентификации каждого решения, обеспечивающей возможности информационного поиска необходимого решения в базах данных. Информационные модели и базы данных их решений формируются для базовых объектов знаний всех типов (см. рис. 1) в иерархической структуре базы знаний ТПП (ОП). Функция идентификации реализуется только в составе других функций управления знаниями практики ТПП (ОП) в их информационной и логической последовательности: систематизация, формализация, унификация, идентификация, группирование. Функция идентификации — основа автоматизированной информационной технологии решения задач практики. Группирование решений по идентификаторам связи — основа нормативного упорядочения параметров $|MP-Размер|$. Приведённый состав функций управления знаниями практики ТПП (ОП) позволяет проводить системный анализ прошлого и текущего опыта проектных решений и формирование необходимой нормативной справочной базы ТПП (ОП) для предприятий металлорежущего станкостроения и металлообработки.

Заключение. Определение самой «вредоносной» первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера (параметр $|MP-Размер|$) для подлежащих преобразованиям элементов формы в структуре исходных заготовок необходимо осуществлять экспериментальными измерениями в рабочем пространстве рабочих машин для обработки резанием. Рабочее пространство рабочих машин необходимо определять по функциям наложения отношений и связей взаимного расположения в структуре двух технологических схем: базирования исходных заготовок и заготовок в рабочие машины; базирования элементов формы в рабочие машины и их геометрического формообразования на рабочих машинах соответственно между координатными направ-

ляющими осями $|H|$ и $|Z|$ и функционально различными центрами в структуре их систем координат. Для экспериментальных измерений в структуру рабочих машин необходимо встраивать специализированные интеллектуальные контрольно-измерительные системы. Нормативное упорядочение параметра $|MP-Размер|$ возможно только на основе накопленного множества примеров практики по их видам в базе прошлого и текущего опыта проектных решений по пяти функциям управления решениями в их информационной и логической последовательности: систематизация, формализация, унификация, идентификация, группирование.

Библиографические ссылки

1. **Колыбенко Е.Н.** Структура поля допуска размера по функциям определения её составляющих в конструкторской и технологической подготовке механообрабатывающего производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2019. № 11 (101). С. 39—48.
2. **Балахнин Б.С.** Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1969. 560 с.
3. **Глухов В.И.** Структура полей допусков для линейных размеров геометрических элементов деталей // Омский научный вестник. 2012. № 1. 107 с.
4. **Колыбенко Е.Н.** Формализованные знания технологических схем базирования объектов на их возможном множестве для автоматизированного решения задач практики в подготовке производства // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 299—307. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-299-307.
5. **Митин С.Г., Бочкарев П.Ю.** Проектирование операций со сложной структурой в многоменклатурных механообрабатывающих системах. Саратов: Саратовский гос. техн. университет им. Ю.А. Гагарина, 2016. 108 с.
6. **Колыбенко Е.Н.** Методы и инструментальные средства отображения схем установок объектов производства в базах данных технологического назначения: автореф. дис. канд. техн. наук. Ростов н/Д.: Донской гос. техн. ун-т, 1999. 19 с.
7. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
8. **Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А.** Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. Справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.
9. **Палей М.А.** Отклонения формы и расположения поверхностей. М.: Изд-во стандартов, 1973. 244 с.

Ссылка для цитирования

Колыбенко Е.Н. Определение первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера на преобразования элементов геометрической формы в структуре исходных заготовок // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 537—546. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-537-546.

УДК 621.313.13:621.314.571.001

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-547-551

И.Ф. Янгиров, д-р техн. наук, доц.

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

yangirov@yandex.ru

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СПИРАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Приведена математическая модель низкочастотного спирального генератора крутильных колебаний (НСГК) в субгармоническом режиме с экспериментальным подтверждением. Статья предназначена для инженеров, занимающихся проектированием и эксплуатацией вибрационных машин.

Ключевые слова: низкочастотный спиральный генератор; субгармонические колебания; форма колебания.

A mathematical model of a low-frequency spiral torsional oscillation generator in a subharmonic mode with experimental confirmation is presented. The article is intended for engineers involved in the design and operation activity of vibration machines.

Keywords: low-frequency spiral generator; subharmonic oscillations; oscillation form.

Введение. Вибрационные машины и устройства широко применяются в транспортных и технологических устройствах различного назначения: от миниатюрных устройств для медицинских и косметических целей и до мощных установок для горного и химико-металлургического производства.

В общем специальном машиностроении они значительно облегчают решение задач транспортирования и ориентации деталей в гибких автоматических технологических линиях для быстрой переналадки производства. Особенно возросла роль вибрационных машин при выполнении нестандартных нетрадиционных технологических операций в биотехнологии, сепарации, перемешивании и т. д. Все эти области характеризуются сложными начальными условиями, разнообразными и переменными характеристиками обрабатываемых материалов, их взаимодействием с внешними средами (жидкость, газ), эффектом наложения различных полей (инерционные, гравитационные, тепловые), правильной дозировка и регулирование которых дают желаемые эффекты, недостижимые обычными способами без использования вибрации.

Решение этих вопросов требует значительного улучшения и расширения технологических и эксплуатационных возможностей и характеристик вибрационных машин — регулирования амплитуды и частоты, общего снижения вредных воздействий вибраций и шума на рабочую среду, снижения металлоёмкости и т. д.

Развитие вибротехники обуславливается, с одной стороны, обширными областями применения, а с другой — эффективность вибротехники зависит от машин, создающих эти

механические колебания. Современное развитие техники предъявляет всё новые и более качественные требования к генераторам механических колебаний. В настоящий момент необходимо иметь достаточно эффективные, надёжные и автоматически управляемые генераторы механических колебаний.

В работе рассмотрены пути эффективного решения указанных вопросов и создания спиральных низкочастотных вибрационных машин общего назначения с электромагнитным возбудителем колебаний (НСГК).

Проведён теоретический анализ спирального генератора механических колебаний (НСГК) с улучшенными механическими характеристиками, получены выражения для расчёта механических характеристик, которые подтверждены экспериментально.

Конструкция. Предлагается устройство для возбуждения крутильных колебаний [1], имеющее корпус с жёстко закреплёнными постоянными парнополюсными магнитами 2 (рис. 1). В воздушном зазоре между постоянными магнитами расположены спиральные электро-

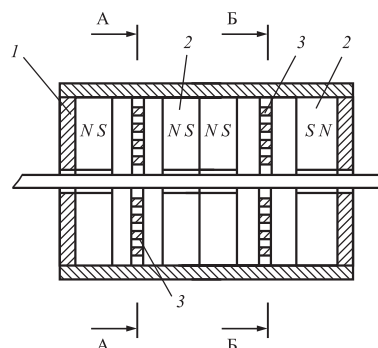


Рис. 1. Низкочастотный спиральный электромеханический преобразователь

проводящие пружины 3, закреплённые жёстко одним внутренним концом к валу генератора, а другим — внешним к источнику переменного тока с переменным чередованием фаз. При подключении к источнику переменного тока спиральные пружины 3 совершают переменное крутильно-вращательное движение вала. Особенностью функционирования предложенного НСГК является суммирование одновременно механического крутильного момента самой спиральной пружины, электромагнитного момента от взаимодействия переменного тока спирали и магнитной индукции в воздушном зазоре от постоянных магнитов НСГК.

Используя расчётную модель (рис. 2) с установленными силами, составим уравнение механики и электродинамики с учётом граничных условий. Для упрощения задачи введём особенную модель НСГК со спиральным лепестковым элементом датчика и двигателя [2].

Работа НСГК со сложной геометрией вторичного элемента [3] может быть описана системой уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \cdot \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}; \\ & \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2n\zeta \cdot \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w = -2\pi A_{\text{вх}} \sin \omega t \cdot s_w(1) + \\ & + \left\{ \frac{i^2}{2} \left(\left[\frac{dL_{0w}}{dL_{0w}} + 2\sum_1^N \sum_1^N \frac{dM_{0w,n}}{dr_{0w}} \right] + \right. \right. \\ & + \left. \left. \left[\sum_1^N K_{Lw} + 2\sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \right] + B_0 il \right\} s_w; \\ & e_w = B_0 l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} + iR + \\ & + \frac{di}{dr} \left(\sum_1^N L_{0w} + 2\sum_1^N \sum_1^N M_{0w,n} \right) + \\ & + \frac{di}{dt} \left(\sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) + \\ & + i \left(\sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2\sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right); \\ & s_w|_{r_w=r_0} = 0; s_w=N|_{r_w=R_0} = 1, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где s_w — радиальное перемещение w -го витка спирали; E — модуль упругости первого рода; μ — коэффициент Пуассона; η, ξ — коэффициенты трения и демпфирования; ω_0 — частота собственных колебаний; ω — частота вынужденных колебаний; r_w — радиус w -го витка; l_w — длина участка витка; B_0 — индукция магнитного поля; $s_w(1)$ — форма колебаний спирали; R — активное сопротивление спирали; $e(t)$ — подводимое напряжение; L_{0w} и M_{0w} — индуктивность и взаимоиנדуктивность спирали в статическом состоянии; K_{L0w} , $K_{Mw,n}$ — некоторые конструктивные постоянные [4].

Учитывая соотношение (1), окончательно систему уравнений электромеханического спирального вибрационного преобразователя (ЭМВП) вибродвигателя (НСГК) запишем следующим образом [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} & e(t) = iR + \frac{di}{dr} (\sum L_{0w} + 2\sum \sum M_{0w,n}) + \\ & + \frac{di}{dt} (\sum K_{Lw} s_w + \sum \sum K_{Mw,n} s_w) + \\ & + i \left(\sum K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2\sum \sum K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right); \\ & \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}; \\ & s_w / r_w=r_0 = 0; \\ & s_w / r_w=R_0 = 1; \\ & \ddot{X} + 2n\zeta \dot{X} + \omega_0^2 X = \\ & = \left\{ \frac{i^2}{2} \left(\left[\frac{dL_{0w}}{dL_{0w}} + 2\sum \sum \frac{dM_{0w,n}}{dr_{0w}} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left[\sum K_{Lw} + 2\sum \sum K_{Mw,n} \right] + B_0 il \right\} s_w(1). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

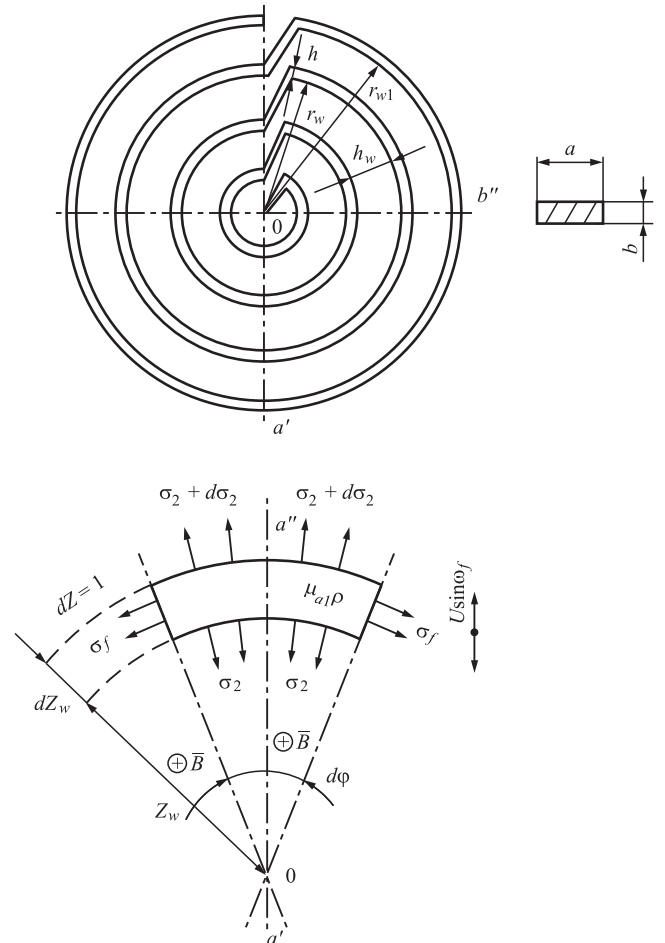


Рис. 2. Расчётная модель спирали

Определим общую формулу для расчёта характеристики НСГК [4]:

$$F_{\Sigma} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sum s_w(1) \times \left[\frac{4I_m^2 \left[\left(\sum \frac{dl_{0w}}{dr_{0w}} + 2\sum \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + (\sum K_{lw} + 2\sum \sum K_{Mw,n}) \right]}{\sqrt{(1-4q^2) + 16D^2q^2}} \times \cos(2\omega t + \varphi_3) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3) \right]. \quad (3)$$

С точки зрения требований систем управления и автоматики представляет интерес исследование механических характеристик НСГК — двухспирального генератора с замкнутым вторичным элементом, подключаемым к источнику переменного магнитного тока за пределами внешнего магнитного поля (рассматривается в данном случае).

Усилия, возникающие в НСГК, рассчитываются по формуле [4]

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m^2 \sum s_w(1) \frac{4q^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \times \left[\left(\sum \frac{dL_{0w}}{dR_{0w}} + 2\sum \sum \frac{dM_{0w,n}}{dR_{0w}} \right) + (\sum K_{Lw} + 2\sum \sum K_{0w,n} \sqrt{K_{Lw} K_{Ln}} \sqrt{\gamma_{w,n}}) \right]. \quad (4)$$

Форма колебания (заданная в виде соосных колец по форме Релея) упругой формы выглядит в действительной форме [5]:

$$s_{\omega}(\gamma) = \frac{\sum_{w=1}^N \gamma_w [J_1(l_0 \gamma_w) + AN_1(l_0 \gamma_w)]}{J_1\left(l_0 \frac{R_0}{R_1}\right) + AN_1\left(l_0 \frac{R_0}{R_1}\right)} = \sum_{w=1}^N \gamma_w s_{\omega}(1), \quad (5)$$

где $\gamma_w = r_w/R_1$ — относительный радиус; R_1 и R_0 — радиус первого и последнего витков соответственно; $l_0 = \omega_0 \sqrt{\rho/E_{\text{пр}}} R_1$ — некоторый витковый коэффициент; $J_1(l_0 \gamma_w)$, $N_1(l_0 \gamma_w)$ — функции Бесселя первого и второго родов; $A = -J_1(\omega_0 \sqrt{\rho/E_{\text{пр}}} r_0/R_1)/N_1(\omega_0 \sqrt{\rho/E_{\text{пр}}} R_0/R_1)$ — некоторая постоянная.

Определим общую формулу для расчёта характеристики НСГК:

$$F_{\Sigma} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sum s_w(1) \times$$

$$\left[\frac{4I_m^2 \left[\left(\sum \frac{dl_{0w}}{dr_{0w}} + 2\sum \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + (\sum K_{lw} + 2\sum \sum K_{Mw,n}) \right]}{\sqrt{(1-4q^2) + 16D^2q^2}} \times \cos(2\omega t + \varphi_3) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3) \right]. \quad (6)$$

Для инженерных расчётов можно определить расчётную формулу для НСГК исходя из следующих соотношений:

$$F_{zm} = \frac{2}{2} s_w(1) I_m^2 \frac{4q^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} A_w. \quad (7)$$

Здесь для круглого сечения спиральной пружины геометрический коэффициент при низкой частоте A_w имеет вид [6]

$$A_w = \mu_0 \sum_1^N \ln \left(\frac{8r_{w_0}}{d_n} - 0,75 \right) + 2\pi \sum_1^N \sum_1^N \left[\frac{10^{-7} K_{w,n}}{\sqrt{\gamma_{w,n_0}}} \times \left(2K - \frac{2 - K_{w,n}^2}{1 - K_{w,n}^2} E - \frac{K_{w,n}^2 \gamma_{w,n_0}}{1 - K_{w,n}^2} E \right) \right], \quad (8)$$

где прямоугольное сечение при низкой частоте A_w имеет вид [6]

$$A_w = \mu_0 \sum \ln \left(\frac{8r_{w_0}}{a+b} + 0,5 \right) + 2\pi \sum_1^N \sum_1^N \left[\frac{10^{-7} K_{w,n}}{\sqrt{\gamma_{w,n_0}}} \times \left(2K - \frac{2 - K_{w,n}^2}{1 - K_{w,n}^2} E - \frac{K_{w,n}^2 \gamma_{w,n_0}}{1 - K_{w,n}^2} E \right) \right], \quad (9)$$

где $K_{w,n} = \frac{2\sqrt{r_{w_0} r_{n_0}}}{r_{w_0} + r_{n_0}}$ — модуль лежандровых интегралов; K , E — полные эллиптические интегралы первого и второго ряда соответственно; $\gamma_{w,n_0} = r_{w_0}/r_{n_0}$ — отношение радиусов предполагаемых витков.

В частности, интерес представляет конструкция низкочастотного механического генератора, когда короткозамкнутая лепестковая плоская электропроводящая пружина помещена в переменное магнитное поле $B = B_0(\sin \omega t)$. Для приведенной круговой модели в этом случае, исходя из закона Био—Савара—Лапласа

$$I_m = \frac{\mu_0 B_0}{2\sqrt{r_{w_0}^2 + \omega^2(L_{w_0} + 2M_{w,n_0})^2}}, \quad (10)$$

выходная характеристика НСГК — генератора субгармонических механических колебаний определяется из соотношения [7]

$$F_{\Sigma M} = \frac{\sqrt{2}}{8} s_w(1) \times \frac{\mu_0^2 B_0^2}{\sum r_{w_0}^2 + \omega^2 (\sum L_{w_0} + 2 \sum \sum M_{w,n_0})^2} \times (11) \times \frac{4q^2}{\sqrt{(1 - 4q^2) + 16D^2q^2}} A_w.$$

Анализ полученных выражений (6)—(11) проводился численным методом с использованием ПЭВМ. На рис. 3 показана зависимость отношений равного усилия короткозамкнутого НСГК от относительной частоты внешнего возмущающего тока (магнитного поля).

Кроме рассмотренного режима работы НСГК с короткозамкнутым элементом представляет интерес неустановившийся режим работы. Так, уравнение электрического равновесия подвижной лепестковой пружины в общем виде имеет вид

$$iR_w + \frac{di}{dt} \left(\sum_1^N L_w + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{w,n} \right) + i \frac{d}{dt} \left(\sum_1^N L_w + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{w,n} \right) = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид: $i = I_{m_0} e^{-t/T}$, где постоянная времени плоского лепесткового элемента (период затухающего колебания) [6]

$$T = \frac{\sum r_w}{\sum L_w + 2 \sum \sum M_{w,n}} = \frac{\sum r_{w_0}}{\sum L_{w_0} + 2 \sum \sum M_{w,n_0}},$$

что определяет передаточную функцию НСГК.

Таким образом, получены аналитические соотношения НСГК с короткозамкнутым подвижным лепестковым элементом как в установившемся, так и переходном режимах.

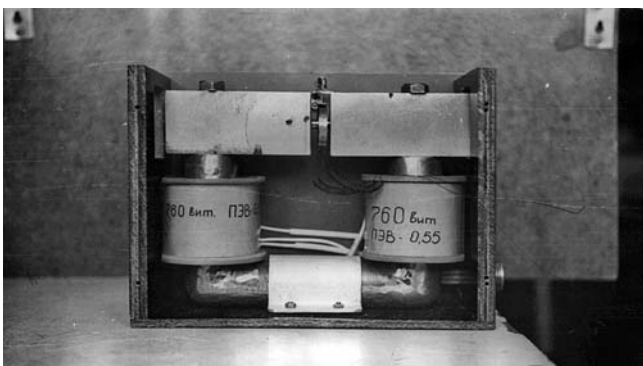


Рис. 3. Экспериментальная модель НСГК

Экспериментальные исследования. Возникающие силы изгибают упругий элемент с наклеенным на него тензорезистором типа 2ФКПА с сопротивлением 50 Ом и базой 5 мм. Далее сигнал с выхода усиливается аппаратурой для тензометрических измерений типа 4АНЧ-22 и фиксируется осциллографом типа С1-118. Масштаб деформации определяется камертонно-тарировочным устройством КТУ-2Ц и 4АНЧ-122 в комплекте с магазином сопротивления Р33. На рис. 4 и 5 показаны экспериментальные модели и стенд.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований НСГК показал, что рассчитанные значения механической харак-

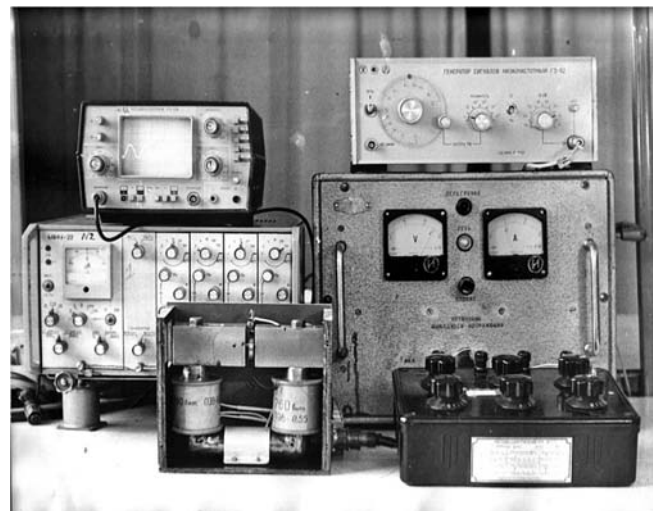


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

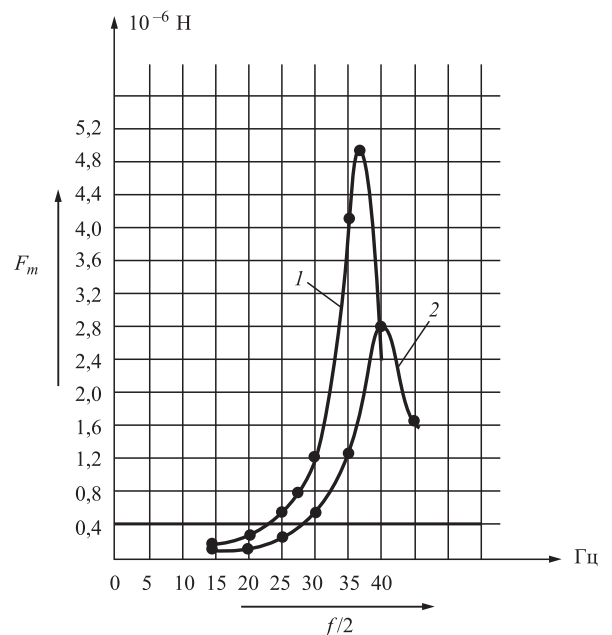


Рис. 5. Механическая характеристика НСГК: 1 — на постоянных магнитах; 2 — на переменном электромагните

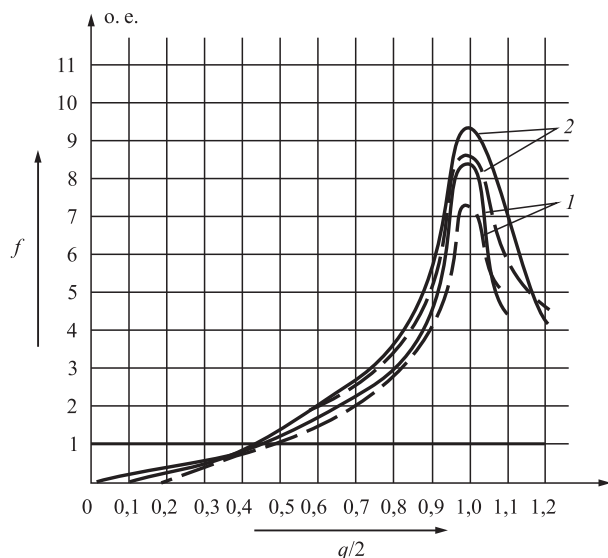


Рис. 6. Механическая характеристика НСГК (о. е.):
 — экспериментальная кривая;
 ---- теоретическая кривая

характеристики совпадают с опытными в пределах 6...7 % точности эксперимента (рис. 6).

Заключение. В работе впервые предлагается новая конструкция электропривода со сложной геометрией вторичного элемента, защищённая патентом России. Разработана математическая модель привода с экспериментальным подтверждением полученных основных теоретических положений. Установлено, что изменяя геометрические размеры спиральной пружины и материал, можно изменить собственную частоту колебаний

спиральной пружины, установить линейную часть механической характеристики электропривода и увязать с нагрузкой привода.

Библиографические ссылки

1. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Магнитоэлектрический преобразователь-электродвигатель // Машиностроитель. 1992. № 9. С. 14.
2. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Устройство для возбуждения крутильных колебаний // Машиностроитель. 1993. № 7, 8. С. 19.
3. Янгиров И.Ф., Ахметова Е.О. Математическая модель спирального преобразователя с учетом основных электромеханических параметров // Всеросс. НПК «Наукоёмкие технологии в машиностроении». Ишимбай, 2013. С. 59—61.
4. Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом / Электротехника. 2008. № 5. С. 14—18.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / под общ. ред. И.Г. Арамоновича. М.: Наука, 1984. 831 с.
6. Калантарев П.Л., Калантарев П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. М.: Энергия, 1985. 415 с.
7. Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом // Электротехника. 2008. № 5. С. 14—18.

Ссылка для цитирования

Янгиров И.Ф. Низкочастотный спиральный генератор крутильных колебаний // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 547—551. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-547-551.

УДК 004.4'22

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-551-554

В.В. Любчинова, А.Г. Янишевская, д-р техн. наук, доц.
 (Омский государственный технический университет)

vikachel3@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Описан алгоритм проектирования приёмопередающих устройств, позволяющий автоматизировать процесс проектирования и получения проектно-конструкторской документации.

Ключевые слова: проектирование приёмопередающих устройств; алгоритмы проектирования.

An algorithm for designing transceiver devices which makes it possible to automate the design process and obtain design documentation is described.

Keywords: design of transceiver devices; design algorithms.

Актуальность автоматизации процесса проектирования радиоприёмных устройств (РППУ) обусловлена тем, что процесс проектирования занимает длительное время,

а автоматизация на некоторых его этапах отсутствует. Предлагается создать алгоритм, который позволит автоматизировать данный процесс.

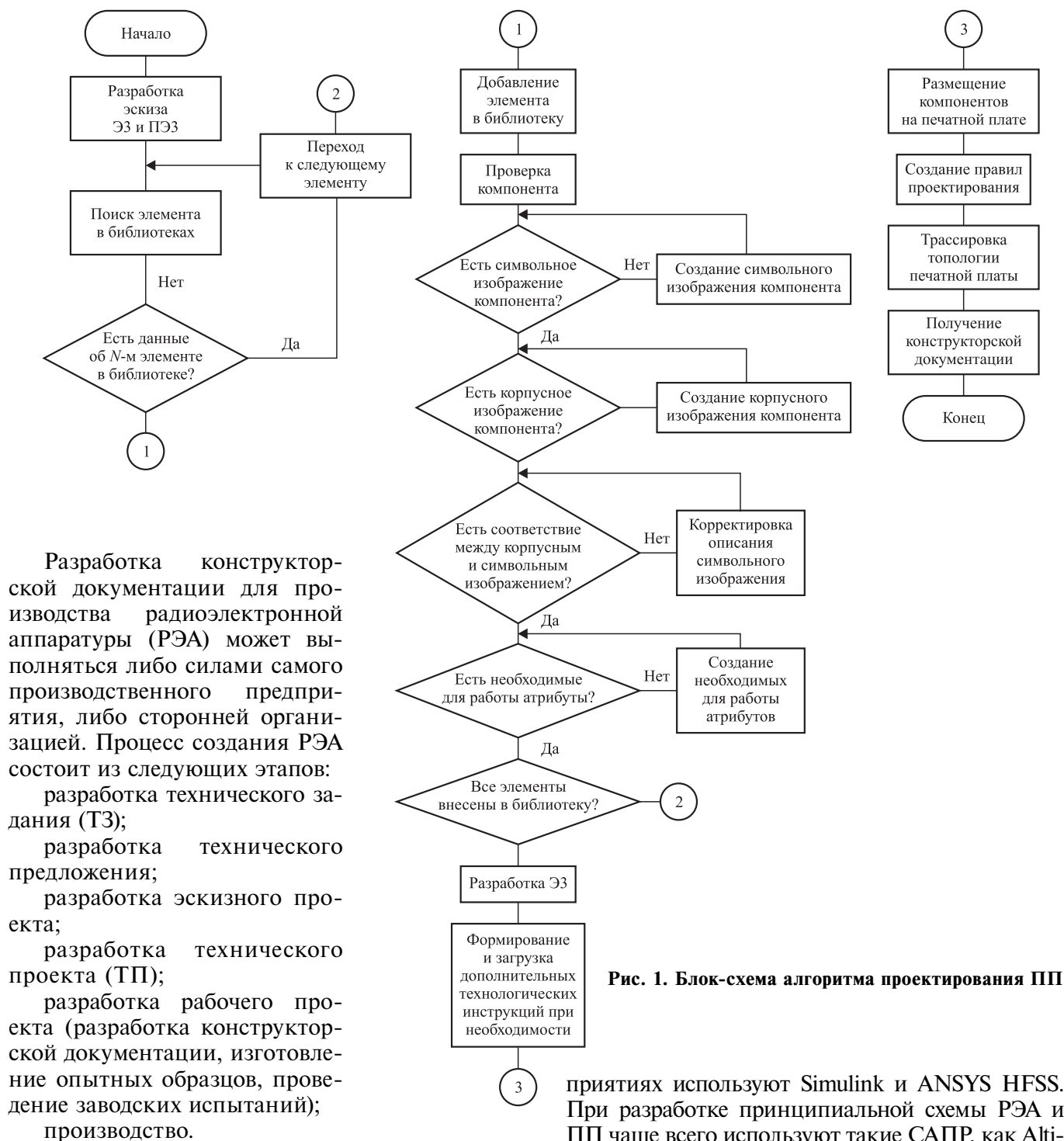


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектирования ПП

приятиях используют Simulink и ANSYS HFSS. При разработке принципиальной схемы РЭА и ПП чаще всего используют такие САПР, как Altium designer, P-CAD, КОМПАС, SolidWorks, T-Flex.

Выбор САПР как инструмента осуществляется предприятиями исходя из финансовых и других возможностей [1]. Вместе с тем независимо от применяемых САПР данный процесс должен быть универсальным. В связи с этим был разработан типовой универсальный алгоритм разработки ПП, включающий в себя и разработку её принципиальной электрической схемы (ЭЗ), перечня элементов (ПЭЗ) и других конструкторских документов (рис. 1).

Описание алгоритма проектирования печатной платы. На первом этапе необходимо разработать эскиз будущей принципиальной электрической схемы, получить перечень её элементов. Схема изначально не разрабатывается в САПР из-за возможного отсутствия в библиотеках элементов, применённых в разработке.

Исходя из перечня элементов ПП выполняется проверка наличия всех этих элементов в библиотеках, и если они отсутствуют, то следует создать их.

Проверяется наличие символьного изображения компонента. Если его нет, то необходимо создать.

Проверяется наличие корпусного изображения компонента. Если его нет, то необходимо создать.

Проверяется соответствие корпусного и символьного изображений компонента. В случае несоответствия оно устраняется.

Добавляются с библиотеку атрибуты, необходимые для работы с элементами: тип элемента, его наименование, технические условия и др.

В системе автоматизированного проектирования разрабатывается принципиальная электрическая схема.

Далее при необходимости создаются и загружаются в программу дополнительные технологические инструкции, после чего компоненты размещаются на плате.

Создаются правила проектирования, по которым выполняется трассировка топологии печатной платы, на основании которой получают конструкторскую документацию — спецификацию, сборочный чертёж, чертёж ПП.

Представленный алгоритм не привязан к какой-либо САПР, однако в качестве примеров можно привести удачные сочетания применяемых программных средств: P-CAD и Design DVx; Altium Designer и TDD.

Программный модуль для автоматизации разработки РППУ. В процессе проектирования технологической документации на устройство был разработан программный модуль, позволяющий автоматизировать процесс разработки приёмопередающего устройства. В данном программном модуле производятся расчёт элементов структурных блоков устройства и формирование конструкторской документации. Данные для расчёта берутся из программы для расчёта преселектора [2], в которой определяются границы частотных диапазонов и структура схемы преселектора. Обычно расчёт выполняется в рабочей среде

MATLAB. Это язык высокого уровня, а также среда разработки, в которой возможны программирование, численные расчёты, а также визуализация результатов. С его помощью можно проводить анализ данных и разработку алгоритмов и моделей.

Расчёт числа поддиапазонов частот и их границ проводят следующим образом [3]. Определяются:

коэффициент перекрытия диапазона:

$$k_d = \frac{f_{\max}}{f_{\min}},$$

где f_{\max}, f_{\min} — максимальная и минимальная частоты диапазона;

число поддиапазонов:

$$N_{\text{пд}} = \frac{\lg f_{\max} - \lg f_{\min}}{\lg k_d};$$

коэффициент перекрытия поддиапазона:

$$k_{\text{пд}} = N_{\text{пд}} \sqrt[k_d]{k_d};$$

границы диапазонов:

$$1\text{-й поддиапазон: } f_{\min} \div k_{\text{пд}} f_{\min};$$

$$2\text{-й поддиапазон: } k_{\text{пд}} f_{\min} \div k_{\text{пд}}^2 f_{\min};$$

...

$$N\text{-й поддиапазон: } k_{\text{пд}}^{(N-1)} f_{\min} \div f_{\max}.$$

После определения поддиапазонов определяется структура преселектора. Для этого рассчитывается промежуточная частота, после чего определяется расстройка зеркального канала, по значению которой можно сделать вывод о структурной схеме преселектора. Если промежуточная частота попадает в диапазон рабочих частот, необходимо увеличить число контуров преселектора. Тракт промежуточной частоты должен обеспечить избирательность по соседнему каналу.

Программа выполняет расчёты по приведённым выше формулам. Также программа берёт данные из программы расчёта усилителя.

Расчёт усилителя [2] начинается с выбора транзистора, который обеспечит наибольшее усиление полезного сигнала в рабочем диапазоне частот. Исходя из выбранного транзистора, выбирают схему соединения и рассчитывают значение коэффициента усиления [2]. На основе этих данных в программе производится расчёт каждого блока РППУ и формируются необходимые данные для таких

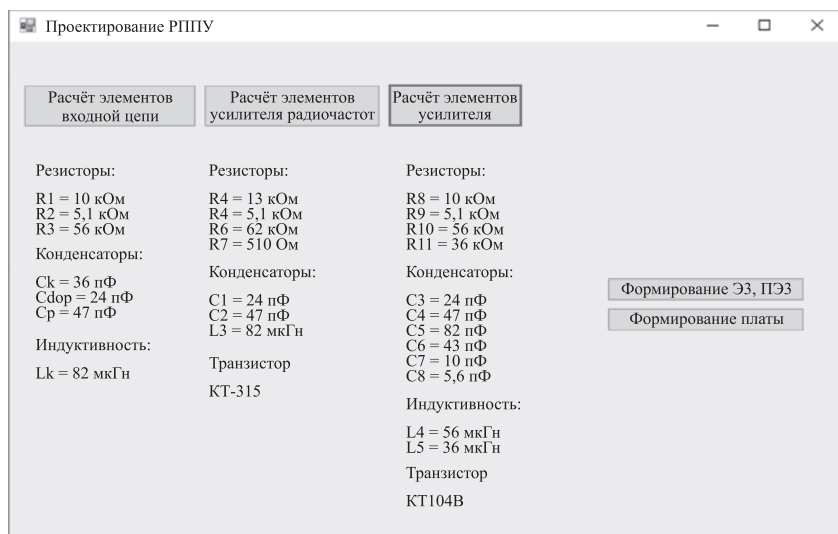


Рис. 2. Скриншот программы

документов, как принципиальная электрическая схема, перечень её элементов и печатная плата. Этот программный модуль можно использовать на этапе разработки эскизного

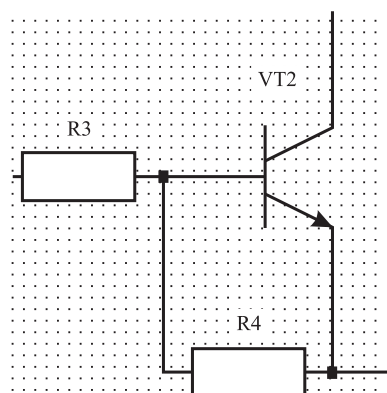


Рис. 3. Схема ЭЗ

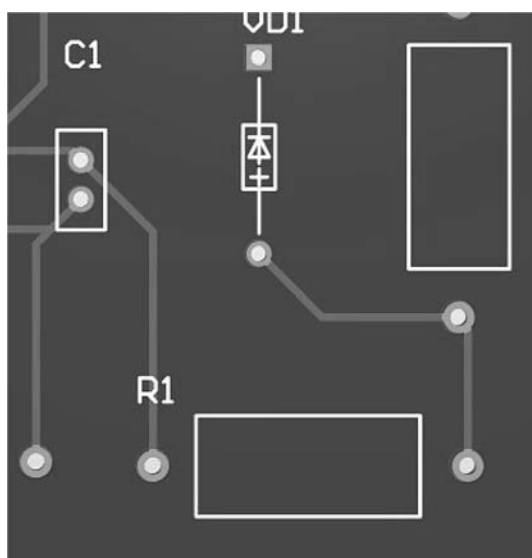


Рис. 4. Фрагмент печатной платы

проекта, а после моделирования в специальных САПР и на этапе разработки технического проекта.

Описание программы. После получения данных в программе отдельно выполняются расчёты каждого структурного блока РППУ (рис. 2). После всех расчётов формируются необходимые технологические инструкции, для того чтобы получить конструкторскую документацию. Документация формируется по алгоритму, приведённому на рис. 1.

На рис. 3 представлен фрагмент схемы, получаемый по предложенному алгоритму. Данную схему можно использовать на этапе эскизного проектирования приёмопередающего устройства.

По предложенному алгоритму также сформирована схема печатной платы, фрагмент которой приведён на рис. 4.

Заключение. Разработан универсальный алгоритм для формирования конструкторской документации и автоматизированного проектирования приёмопередающего устройства. Преимуществом данного алгоритма является его универсальность. Алгоритм не привязан к какой-либо САПР, что позволяет применить его в процессе разработки любой радиоэлектронной аппаратуры. Данный алгоритм внедряется на одном из Омских производственных предприятий.

Библиографические ссылки

1. Гриднев В.Н., Кондаков Н.А., Трошина Д.П., Фатхутдинов Т.М. Анализ проектирования многослойных печатных плат / Труды Междунар. симпозиума «Надёжность и качество». 2018. Т. 2.
2. Любчинова В.В., Соседко В.В., Янишевская А.Г., Крысова И.В. Алгоритмы и программное обеспечение для автоматизации проектирования радиоприёмного устройства // Автоматизация в промышленности. 2021. № 3. С. 46—48.
3. Гавра Т.Д., Макаров С.Б. Проектирование радиоприёмных устройств на микросхемах: учеб. пособие. Л.: ЛПИ, 1985. 74 с.

Ссылка для цитирования

Любчинова В.В., Янишевская А.Г. Автоматизация проектирования приёмопередающих устройств // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 551—554. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-551-554.

УДК 628.9

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-555-559

А.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц., **А.В. Зубов**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)
mikaeva@npo.lit.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТИЛЬНИКА ТИПА DOWNLIGHT СО СВЕТОДИОДНЫМ МОДУЛЕМ В ПРОГРАММЕ «КОМПАС-3D»

Рассмотрена конструкция светодиодных светильников типа DownLight. Показаны их основные преимущества перед традиционными светильниками с лампами накаливания и люминесцентными лампами. Проведено 3D-моделирование светильника типа DownLight и его элементов в программе «Компас-3D».

Ключевые слова: светильник со светодиодным модулем; «Компас-3D»; КСС светового прибора.

The design of LED lamps of the DownLight type is considered. Their main advantages over traditional lamps with incandescent and fluorescent lamps are shown. 3D-modeling of the DownLight type luminaire and its elements was carried out in the «Compass-3D» program.

Keywords: luminaire with LED module; Compass-3D; luminous intensity curve (LIC) of light device.

Современные светильники со светодиодным модулем (LED-светильники) пользуются наибольшим спросом на рынке осветительных приборов. Это обусловлено высокими энергосберегающими качествами и высоким уровнем светотдачи таких светильников. Наиболее часто в офисных, складских помещениях, для торговых площадей используют встраиваемые потолочные светильники DownLight. Они безопасны и легко монтируются. Затраты на приобретение таких светильников полностью оправдываются продолжительностью их эксплуатации, качеством и ярким равномерным светом [1—4].

Несмотря на то что стоимость ламп DownLight достаточно высока, в использовании они более чем в 6 раз экономичнее ламп накаливания или люминесцентных светильников. Наиболее мощные модели таких устройств обеспечивают световой поток в 2600 лм при потребляемой мощности 37 Вт.

Для того чтобы обеспечить такую выработку света традиционными источниками света (ИС), понадобится не менее трёх изделий мощностью 75 Вт [5].

Кроме того, осветительные приборы типа DownLight рассчитаны на 40 тыс. ч эксплуатации. Причём на ресурс такого устройства практически не влияют условия его применения. От перепадов напряжения в сети оно защищено специальным драйвером (выравнивателем), а от влажности и пыли — герметическим корпусом.

Для сравнения следует указать, что срок службы лампы накаливания в идеальных условиях составляет в среднем 1000 ч. Следовательно, за время службы LED-устройства выйдет из строя 40 обычных ИС. Поэтому стоимость светодиодной подсветки в итоге будет ниже. Светильники DownLight могут иметь разные конструкции в зависимости от условий их использования. Однако основные конструктивные решения имеют сходство. Основным материалом для корпуса подобных устройств в большинстве случаев является алюминий, из него также выполнены специальные выступы на корпусе, служащие для отвода тепла от диодов и электронной части. Светильник оснащён рефлектором, контролирующим концентрацию и направление светового потока, и рассеивателем (установлен в передней части светильника), смягчающим свет. Специальные клеммы позволяют быстро подсоединить светильник к электросети [1].

К основным особенностям рассматриваемого светодиодного светильника следует отнести небольшую массу и относительно малые габариты, что в значительной мере облегчает монтаж приборов в помещениях различного назначения (торговых, промышленных и др.). Кроме того, данный прибор характеризуется небольшой глубиной установки, поэтому для его монтажа не требуется большое межпотолочное пространство. К преимуществам конструкций DownLight следует также отнести возможность

изменения угла освещения до 30° за счёт поворотной оптической части. При этом подобные приборы способны функционировать с разными типами источников света [3].

Технологии светильника типа DownLight экономичны и обеспечивают оптимальные условия энергоконтроля.

Значительным преимуществом рассматриваемого светодиодного светильника для потребителей является их большое разнообразие на современном рынке. В настоящее время существует множество моделей, различающихся по форме, способу крепления, оформлению, что позволяет подобрать светильник необходимого дизайна, соответствующего имеющемуся интерьеру. LED-светильник DownLight часто используют для установки в потолки. Кроме того, светильники DownLight не представляют опасности не только для здоровья человека, но и для окружающей среды, так как в их конструкции отсутствуют вредные компоненты, в том числе ртуть.

Алюминиевый корпус светильника с мощным теплоотводом обеспечивает оптимальный тепловой режим работы светодиодов и электронных компонентов. Благодаря применению опалового рассеивателя отсутствует эффект ослепления и обеспечивается равномерное распределение светового потока. LED-светильники типа DownLight оснащены надёжными пружинными крепежами, способствующими быстрой фиксации их в потолке [2].

К преимуществам светильника можно также отнести достаточно высокий индекс цветопередачи, минимальный уровень пульсации яркости, отсутствие необходимости специального обслуживания и специальной утилизации, стойкость к перепадам напряжений в пределах 175...260 В, быстрое включение, отсутствие зависимости от частоты включения/выключения, большой срок службы, наличие удобных клеммников WAGO, позволяющих быстро и надёжно подключать светильник к рабочей сети.

Большая часть светильников DownLight являются ультратонкими. После встраивания в потолок или стену они практически не выступают над поверхностью.

Рассматриваемый тип диодного освещения получил высокую популярность благодаря широкому ряду достоинств, среди которых: почти полное отсутствие мерцания; не слепит глаза; безопасность и экологичность;

экономичность. При высоком качестве освещения светодиодный светильник DownLight потребляет минимум электроэнергии: во-первых, светодиодные светильники сами по себе экономичны, во-вторых, экономия энергии достигается за счёт узконаправленного светового потока;

простота в эксплуатации, уходе. Светильники разгораются практически мгновенно и не требуют особого ухода;

долговечность. Рабочий ресурс светильников типа Downlight достигает 50 000 ч.

В широком ассортименте светильников DownLight различных исполнений разобрать-

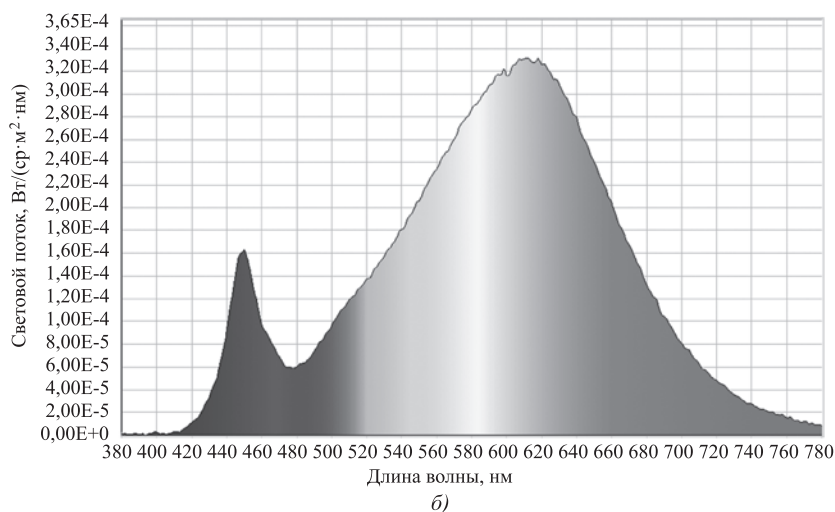
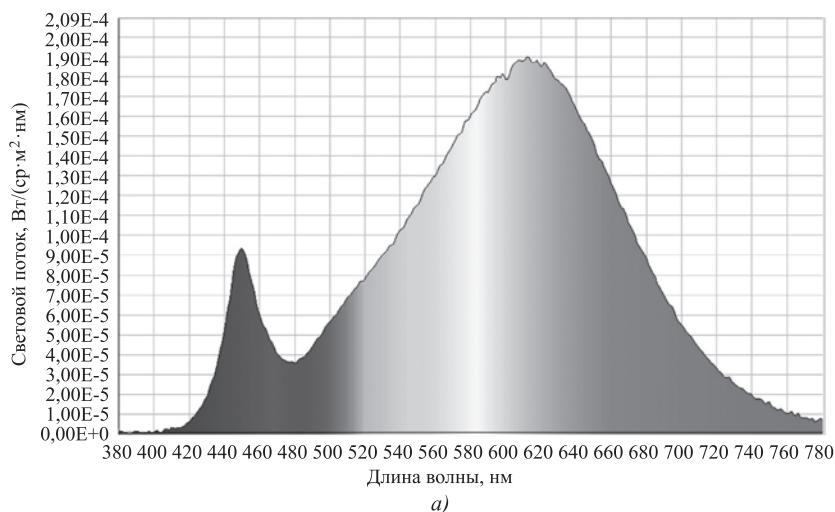


Рис. 1. Спектр излучения светодиодного светового прибора JazzWay типа DownLight в программе «Компас-3D»:

а — с рассеивателем; б — без рассеивателя

ся порой достаточно сложно. Такие устройства различаются по интенсивности светового потока, потребляемой мощности, габаритам и форм-факторам. Кроме того, различные варианты светильников предполагают собственные оттенки свечения. Так, для оформления основного освещения подойдут светильники с цветовой температурой, близкой к естественному солнечному свету. Также важной характеристикой является степень защиты, которая позволяет использовать некоторые модели в помещениях с повышенной влажностью.

Таким образом, конструкции светодиодных светильников DownLight позволяют устанавливать их не только внутри зданий, но и на улицах, заводах и фабриках, в офисах, на

рекламных экспозициях, в холлах и коридорах, на различных торговых площадках. Они могут также использоваться дизайнерами для придания индивидуальности и выделения отдельных частей помещений. При этом использование указанных светильников экономически целесообразно.

Для моделирования светодиодного светильника для низковольтных сетей использовали систему «Компас-3D», которая предназначена для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей (в том числе деталей, формируемых из листового материала путём его гибки) и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая

технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе спроектированного ранее прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

При создании 3D-модели разрабатываемого светильника за основу был взят корпус светильника JazzWay. Для обоснования целесообразности данного выбора были измерены спектр излучения, цветовая температура и индекс цветопередачи светильника с помощью спектрометра. Результаты представлены на рис. 1, 2.

Затем были сформированы 3D-модели корпуса разрабатываемого светильника (рис. 3) и радиатора разрабатываемого светильника (рис. 4). Далее в программе «Компас-3D» смоделировали модуль разрабатываемого светильника (рис. 5).

Сформированная в программе «Компас-3D» модель разрабатываемого светильника представлена на рис. 6.

Для определения целесообразности применения светильника были построены кривые силы света (КСС) светового прибора (с рассеивателем и без него) (рис. 7). Полученная КСС прибора с рассеивателем является косинусной, без рассеивателя — глубокой.

Таким образом, при помощи компьютерной программы «Компас-3D» удалось смоделировать светильник со светодиодным модулем.

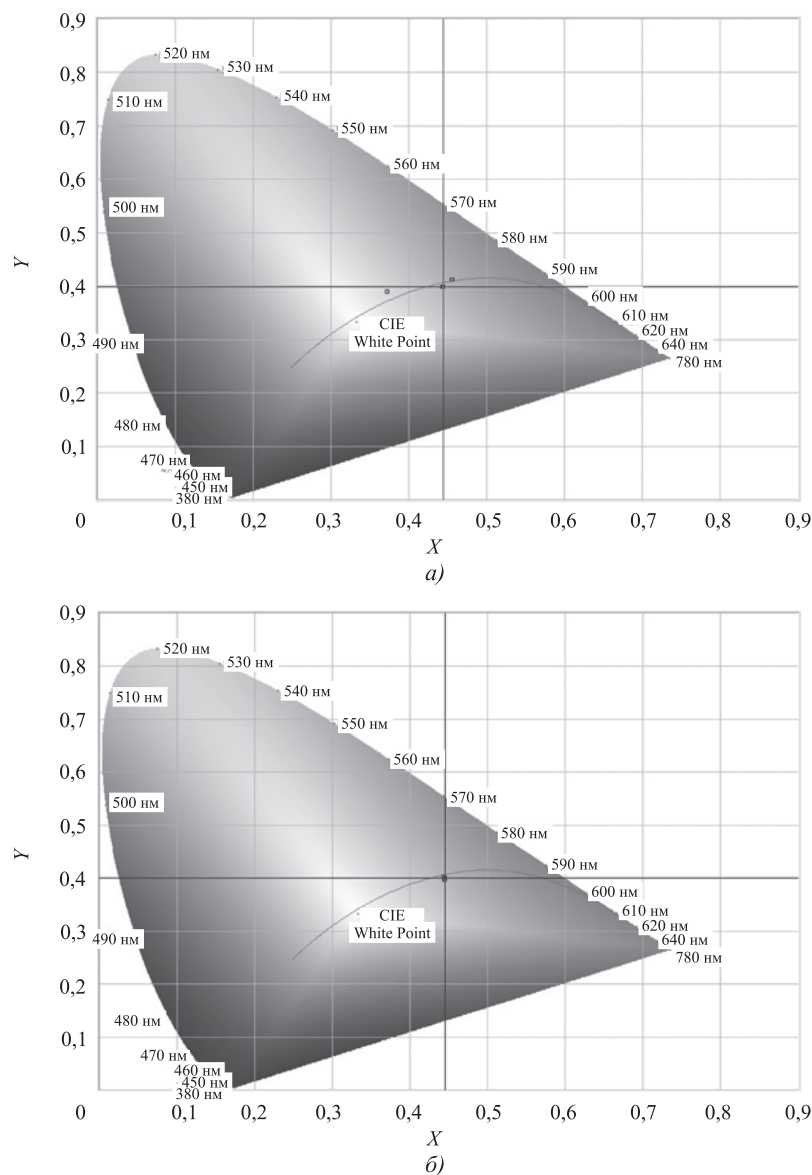


Рис. 2. Диаграмма цветности светодиодного светового прибора JazzWay типа DownLight в программе «Компас-3D»:

a — с рассеивателем; *б* — без рассеивателя

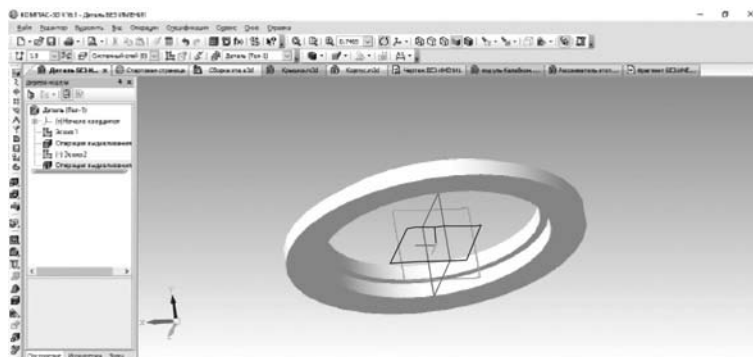


Рис. 3. 3D-модель корпуса разрабатываемого светильника в программе «Компас-3D»

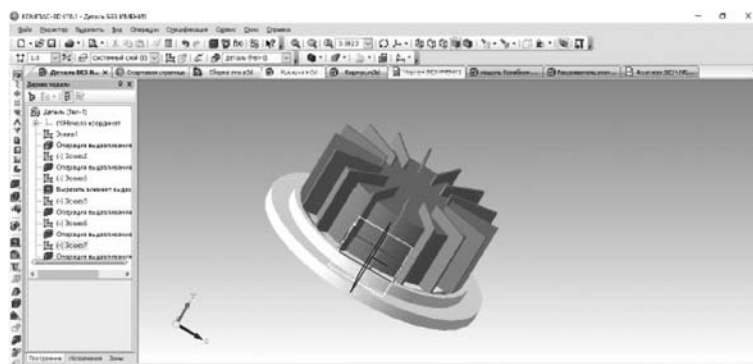


Рис. 4. 3D-модель радиатора разрабатываемого светильника в программе «Компас-3D»

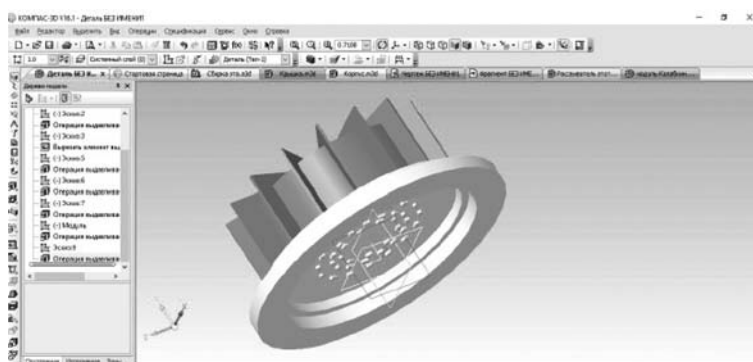


Рис. 5. 3D-модель модуля разрабатываемого светильника в программе «Компас-3D»

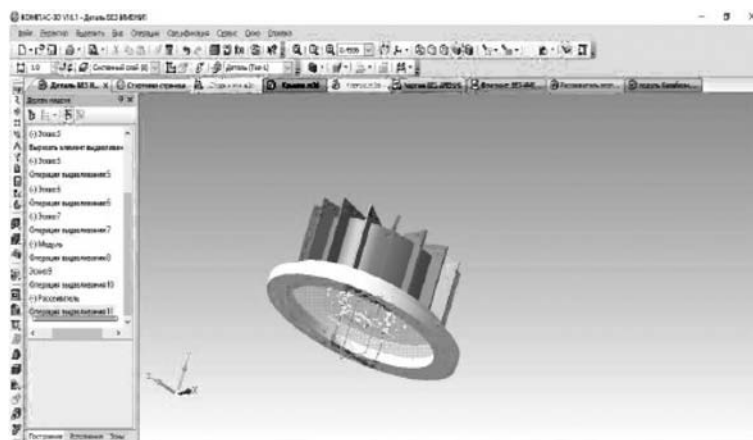


Рис. 6. 3D-модель разрабатываемого светильника в программе «Компас-3D»

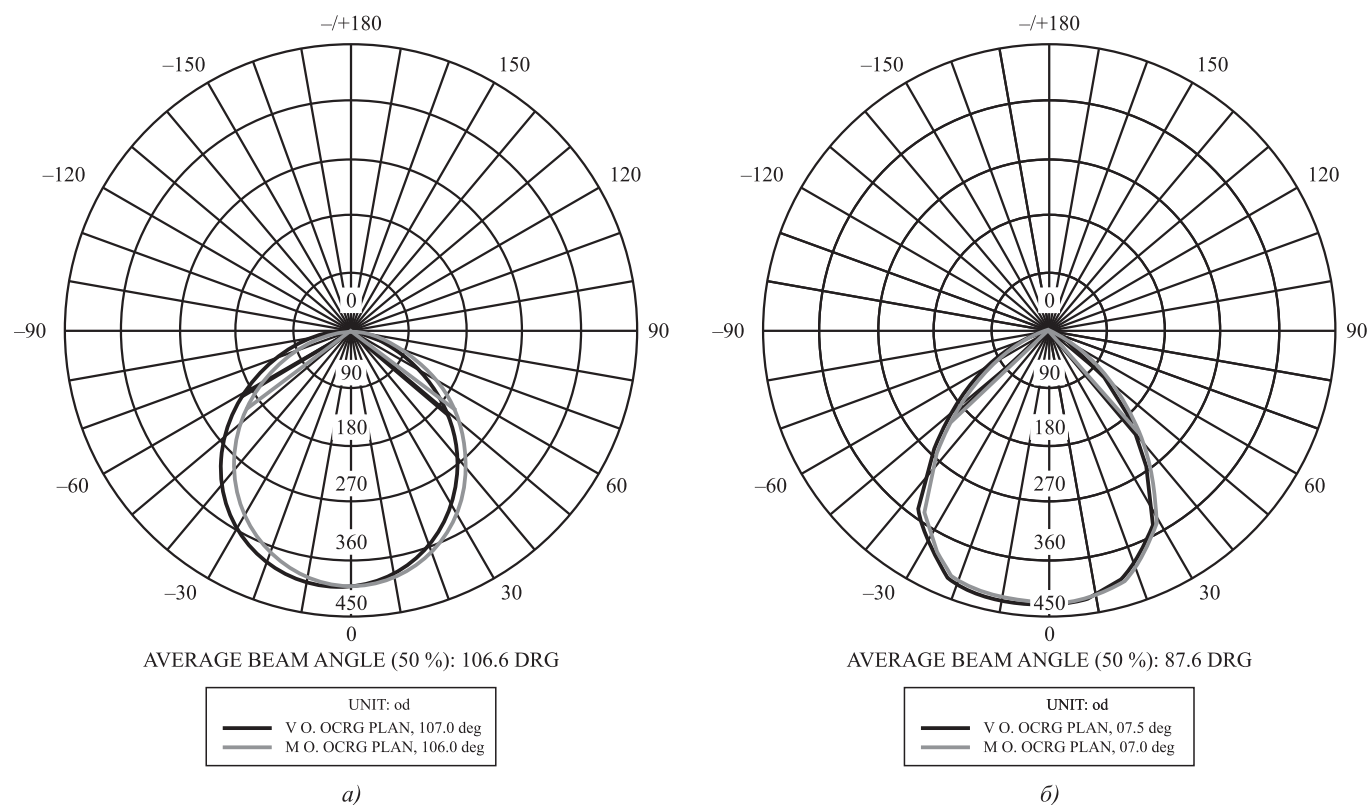


Рис. 7. КСС разрабатываемого светодиодного низковольтного светового прибора:

а — с рассеивателем; *б* — без рассеивателя

В целях определения целесообразности применения светильника построили КСС светового прибора. Их совпадение с требованиями ГОСТа свидетельствует о правильности построения светильника.

Библиографические ссылки

1. **Бугров В.Е., Виноградова К.А.** Оптоэлектроника светодиодов: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 174.

2. **Светильник DownLight** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ledeffect.ru/ledeffect-downlight/led-effect-le-0508-svetilnik-down-light.html> (дата обращения: 10.11.2020).

3. **Изучаем** особенности светодиодных светильников DownLight [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cdelect.ru/brand/downlight.html> html (дата обращения: 10.11.2020).

4. **Преимущества LED** светильников DownLight [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mirdiodov.ru/news/preimushchestva-led-svetilnikov-downlight/> html (дата обращения: 10.11.2020).

5. **Светодиодные** светильники DownLight [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eltechbook.ru/svetodiod_downlight.html html (дата обращения: 10.11.2020).

6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 135 с.

7. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 135 с.

8. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. 186 с.

9. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы. М.: Русайнс, 2020. 172 с.

Ссылка для цитирования

Горбунов А.А., Зубов А.В., Микаева С.А. Моделирование светильника типа DownLight со светодиодным модулем в программе «Компас-3D» // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 555—559. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-555-559.

Уважаемые читатели!

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



К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **М.В. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **С.С. Тотунов**,
С.А. Гаврильев, **Д.А. Лаухин**, **А.А. Лушкин**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

ars.lushkin@mail.ru

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены проблемы избыточного шума и доброкачественности специальных композитных материалов как важных аспектов проектирования изделий. Предложен алгоритм измерений и вычислений, с помощью которого можно вычислить важные акустические параметры: коэффициент передачи и характеристический импеданс материала, а также потери при прохождении звуковой волны через материал.

Ключевые слова: акустика; коэффициент звукопоглощения; коэффициент потери при передаче; метод переходной матрицы.

The problems of excessive noise and good quality of special composite materials as important aspects of product design are considered. An algorithm for measurements and calculations, which can be used to calculate important acoustic parameters: the transmission coefficient and characteristic impedance of the material, as well as losses during the passage of a sound wave through the material is proposed.

Keywords: acoustics; sound absorption coefficient; transmission loss ratio; transition matrix method.

Введение. В настоящее время ввиду ужесточения правового регулирования уровня шума, воздействующего на человека, проводятся различные мероприятия, разрабатываются новые технологии и материалы для защиты от него. В основном конструкции по борьбе с шумом состоят из комбинации тяжёлых звукоизоляционных и звукопоглощающих материалов.

Особенно это важно стало в сфере самолётостроения, где, с одной стороны, необходимо обеспечить комфорт для пассажиров и экипажа, а с другой — выполнить требование по снижению веса конструкции, что зачастую способствует повышению уровня шума.

Звукопоглощающие материалы также применяются при строительстве испытательных помещений и установок, например, безэховых камер [1]. Такие помещения и установки используются для решения широкого спектра задач: от проведения испытаний по определению шумовых характеристик и до исследований акустических аспектов различных процессов [2, 3].

В настоящее время наряду с традиционными звукопоглощающими материалами применяются композитные материалы [4]. Основной акустической характеристикой таких материалов является коэффициент звукопоглощения. Он определяется как отноше-

ние неотражённого потока звуковой энергии к потоку звуковой энергии падающего на материал звука. Существует метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере [5, 6]. Принцип этого метода заключается в определении среднего времени реверберации в камере с образцом и без него. Затем по зависимостям, связывающим среднее время реверберации, параметры камеры и образца, вычисляется коэффициент звукопоглощения. К недостаткам метода можно отнести относительно большие временные затраты, обусловленные подготовительными работами, и необходимость использования довольно мощных источников ненаправленного шума.

Более эффективным как по скорости проведения измерений, так и по габаритам установки является метод определения коэффициента звукопоглощения в импедансной трубе [7]. С его помощью, в отличие от метода измерений в реверберационной камере, можно определить не только коэффициент звукопоглощения, но и характеристический импеданс, т. е. сопротивление материала и волновое число. Рабочий диапазон частот ограничен габаритами трубы и расположением микрофонов относительно друг друга. Недостатками данного метода являются высокая стоимость

установки и возможность измерения материалов только небольшого размера. В данной работе рассмотрен метод измерений в двухсекционной импедансной трубе с применением дополнительных микрофонов, позволяющий определить потери при передаче, т. е. отношение энергии звука после прохождения через материал к первоначальной.

Метод переходной матрицы. Рассмотрим систему, состоящую из трубы конечной длины с жёсткими стенками и однородным внутренним поперечным сечением (рис. 1). На одном конце трубы установлен громкоговоритель, обеспечивающий широкополосное стационарное случайное возбуждение системы. Громкоговоритель подключен через усилитель к генератору. На другом конце трубы установлена съёмная крышка. Внутренний объём трубы разделён исследуемым материалом (далее образцом) на две секции: секцию до образца с микрофонами 1, 2 и секцию после образца с микрофонами 3, 4. Образец имеет цилиндрическую форму.

Звуковое излучение в трубе можно описать как плоскую волну, движущуюся по каналу. Это верно, если предположить, что длина волны самой высокой частоты больше поперечного диаметра трубки, поскольку моды будут соответствовать поперечному сечению трубки, вызывая нежелательные неплоскостные волновые моды. По этой причине стандарт ISO 10534-2:1998 [4] устанавливает верхний предел частот для трубки следующим образом:

$$f_u < 0,58 \frac{c_0}{d_0},$$

где c_0 — скорость звука; d_0 — внутренний диаметр трубы.

Верхний предел частот также ограничен расстоянием между точками измерения вдоль трубки, так как необходимо обеспечить определённую разность фаз не менее половины длины волны:

$$f_u < 0,45 \frac{c_0}{s},$$

где s — расстояние между микрофонами.

Нижний предел частот ограничен длиной волны, которая настолько велика, что давление на микрофонах очень похоже и чёткая

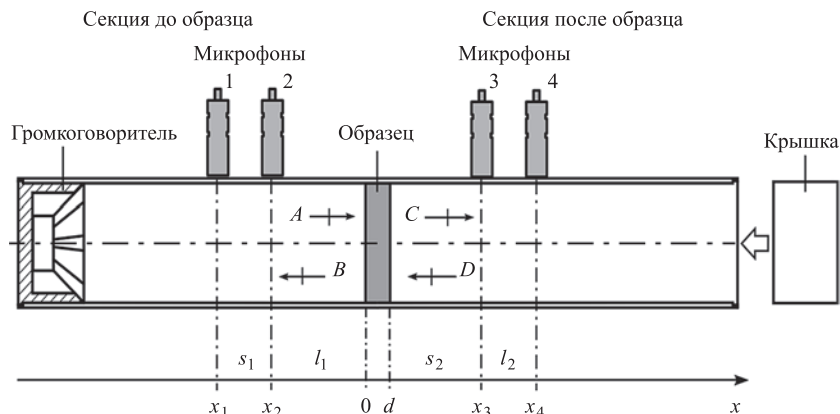


Рис. 1. Схема ТЛ-трубы:

l_1 — расстояние от образца до микрофона 2; l_2 — расстояние от образца до микрофона 3; s_1 — расстояние между микрофонами 1 и 2; s_2 — расстояние между микрофонами 3 и 4; d — толщина образца

разница давления не может быть измерена, поэтому она определяется выражением

$$f_l > 0,05 \frac{c_0}{s}.$$

Тогда звуковое поле в восходящем и нисходящем сегментах трубки стоячей волны может быть хорошо аппроксимировано суперпозициями положительно и отрицательно направленных плоских волн.

Уравнение звуковой волны можно записать как

$$P_{up} = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \text{ для волны до образца;}$$

$$P_{down} = Ce^{-jkx} + De^{jkx} \text{ для волны после образца,}$$

где k — волновое число; P_{up} и P_{down} — комплексные звуковые давления; A – D — коэффициенты комплексных амплитуд.

Комплексное звуковое давление на четырёх микрофонах можно записать следующим образом:

$$P_1 = Ae^{-jk(l_1+s_1)} + Be^{jk(l_1+s_1)};$$

$$P_2 = Ae^{-jk(l_1)} + Be^{jk(l_1)};$$

$$P_3 = Ce^{-jk(l_2)} + De^{jk(l_2)};$$

$$P_4 = Ce^{-jk(l_2+s_2)} + De^{jk(l_2+s_2)}.$$

Введём передаточные функции для каждого микрофона как отношение преобразования Фурье сигналов каждого микрофона к первому микрофону:

$$H_{11} = \frac{G_1}{G_1}; H_{21} = \frac{G_2}{G_1}; H_{31} = \frac{G_3}{G_1}; H_{41} = \frac{G_4}{G_1},$$

где G_i — преобразование Фурье соответствующего микрофона.

Тогда выраженные через передаточные функции комплексные амплитуды вычисляются по формулам

$$A = -j \frac{H_{11} e^{-jk(l_1)} - H_{21} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin(ks_1)} \sqrt{G_{11}};$$

$$B = -j \frac{H_{21} e^{jk(l_1+s_1)} - H_{11} e^{jk(l_1)}}{2 \sin(ks_1)} \sqrt{G_{11}};$$

$$C = -j \frac{H_{31} e^{jk(l_2+s_2)} - H_{41} e^{jk(l_2)}}{2 \sin(ks_1)} \sqrt{G_{11}};$$

$$D = -j \frac{H_{41} e^{-jk(l_2)} - H_{31} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin(ks_1)} \sqrt{G_{11}}.$$

Комплексные коэффициенты A – D могут быть использованы для расчёта звуковых давлений и скоростей частиц на двух поверхностях образца:

$$\begin{aligned} P_{x=0} &= p_0 = A + B; \\ V_{x=0} &= p_d = C e^{-jk(d)} + D e^{jk(d)}; \\ P_{x=d} &= u_0 = \frac{A - B}{\rho_0 c}; \\ V_{x=d} &= u_d = \frac{C e^{-jk(d)} + D e^{jk(d)}}{\rho_0 c}, \end{aligned}$$

где ρ_0 и c — плотность воздуха и скорость звука.

Последние величины затем могут быть связаны переходной матрицей T :

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d},$$

где P — внешнее звуковое давление; V — внешняя нормальная скорость акустических частиц.

Ввиду того, что решение представляет собой два уравнения с четырьмя неизвестными, необходимо провести дополнительное измерение при ином окончании трубы. Тогда матричное уравнение примет вид

$$\begin{bmatrix} P_a & P_b \\ V_a & V_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a & P_b \\ V_a & V_b \end{bmatrix}_{x=d},$$

где a соответствует измерениям с поглотителем на конце трубы, а b — измерениям без поглотителя.

Из данного матричного уравнения можно вывести элементы T_{ij} :

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{P_{0a} U_{db} - P_{0b} U_{da}}{P_{da} U_{db} - P_{db} U_{da}}; & T_{12} &= \frac{P_{0b} U_{da} - P_{0a} U_{db}}{P_{da} U_{db} - P_{db} U_{da}}; \\ T_{21} &= \frac{U_{0a} U_{db} - U_{0b} U_{da}}{P_{da} U_{db} - P_{db} U_{da}}; & T_{22} &= \frac{P_{da} U_{0b} - P_{db} U_{0a}}{P_{da} U_{db} - P_{db} U_{da}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда основные акустические величины определим по формулам:

коэффициент звукопоглощения —

$$\alpha = 1 - \left| \frac{T_{11} - \rho_0 c T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c T_{21}} \right|^2; \quad (2)$$

волновое число —

$$k^p = \frac{1}{d} \arccos(T_{11}); \quad (3)$$

коэффициент передачи —

$$t = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} + T_{22}}; \quad (4)$$

характеристический импеданс —

$$Z^p = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}}; \quad (5)$$

потери при передаче —

$$TL = 20 \lg \left| \frac{1}{t} \right|. \quad (6)$$

Таким образом, уравнения (1)–(6) описывают математическую модель, отражающую взаимосвязь элементов переходной матрицы с основными акустическими характеристиками. Общий алгоритм построения моделей приведён на рис. 2.

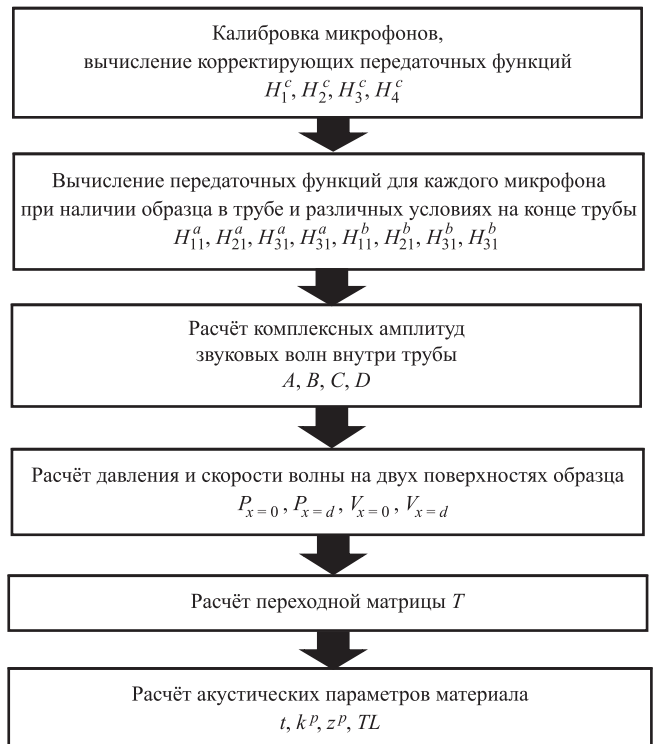


Рис. 2. Алгоритм построения моделей акустических характеристик материалов

Экспериментальная часть. Для верификации предложенного алгоритма проведена серия экспериментов на установке, схема которой представлена на рис. 3.

В качестве источника шума использовался генератор белого шума с рабочим диапазоном частот до 6,4 кГц, сигнал от которого подавался через усилитель на динамик. В качестве поглотителя на конце трубы использовалась минеральная вата. Измерения проводились с использованием аппаратуры фирмы Bruel&Kjaer: микрофоны 4948 с рабочим диапазоном частот от 70 Гц до 20 кГц, а также многоканальный анализатор LAN-XI 3056. Рабочий диапазон измерений для трубы: от 100 Гц до 2,4 кГц в зависимости от конструкции и расстояния между микрофонами.

В данном опыте использовались следующие геометрические параметры трубы: $s_1 = 0,060$ м, $s_2 = 0,060$ м, $l_1 = 0,20$ м, $l_2 = 0,387$ м. В качестве материала для исследования применён пенопласт М-55/15 Flexufoam в форме цилиндра с высотой 0,050 м и диаметром основания 0,088 м. За эталон были приняты результаты работы программного обеспечения Bruel&Kjaer PULSE Transmission Loss. Синтез алгоритма и обработка измерений проводились в среде MatLab. Для записи сигналов с микрофонов использовалась программа Bruel&Kjaer PULSE LabShop.

Расчёт некоторых акустических параметров композита. На рис. 4—6 представлены графики полученных акустических параметров материала: коэффициента поглощения α , характеристического импеданса материала Z^p и потерь при прохождении звуковой волны через материал TL .

Сравнение рассчитанных характеристик с теоретическими показало хорошую сходимость результатов, полученных предлагаемым алгоритмом, с результатами эталонного метода во всём рабочем диапазоне частот. Относительная погрешность измерения коэффициента звукопоглощения составила не более 8 %; потеря при передаче — не более 3 Дб; характеристического импеданса — не более 300 Па·с/м.

Как видно из рис. 4, коэффициент звукопоглощения сходится с теоретическим на низких частотах, при этом на высоких частотах имеются незначительные отклонения, обусловленные тем, что в математической мо-

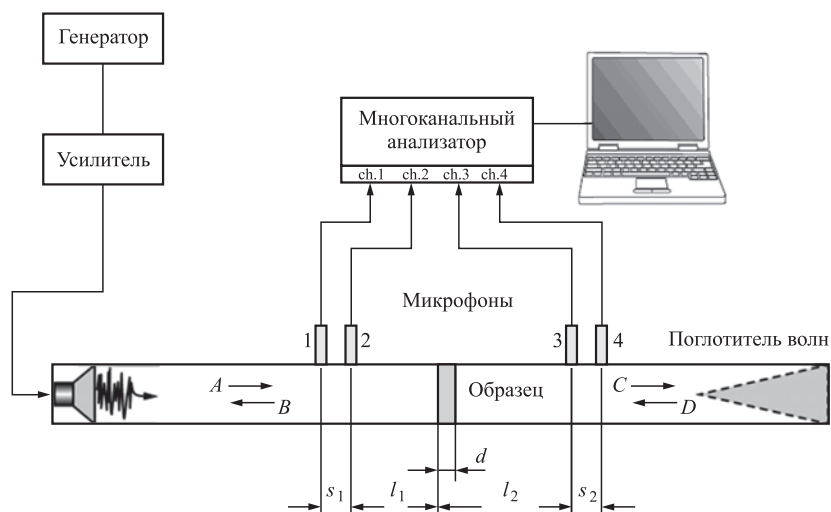


Рис. 3. Измерительная установка

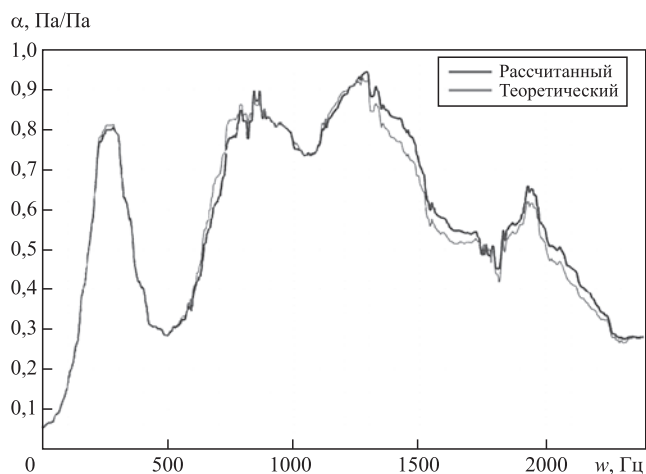


Рис. 4. Коэффициент звукопоглощения

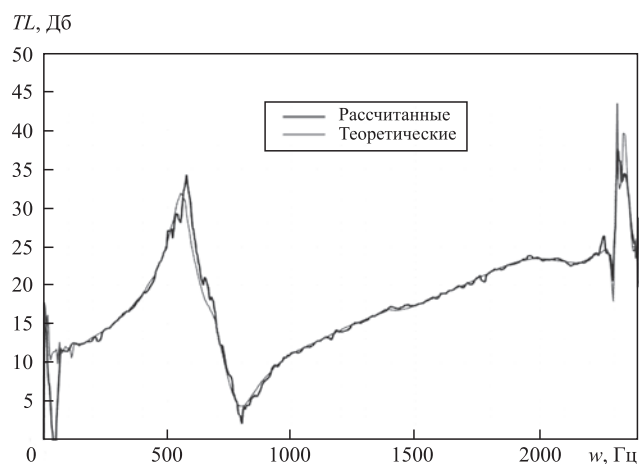


Рис. 5. Потери при передаче

дели коэффициента звукопоглощения не учитывается толщина образца.

Из рис. 5 и 6 видно, что характеристический импеданс и потери при прохождении практически полностью совпадают с теоре-

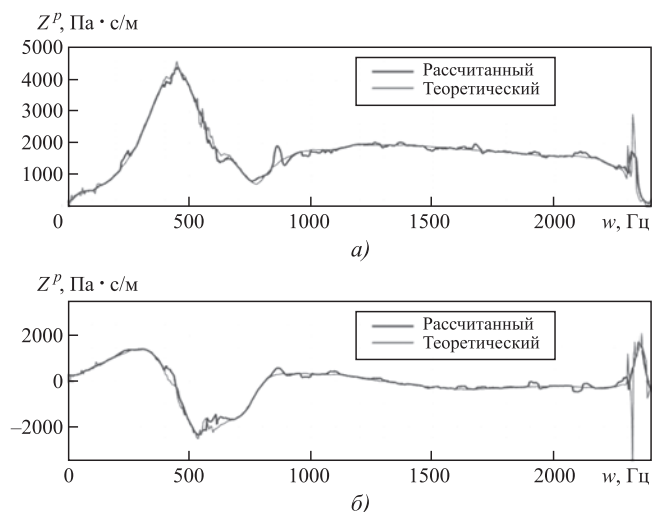


Рис. 6. Характеристический импеданс:
a — действительная часть; *б* — мнимая часть

тическими на всем рабочем диапазоне, отклонения же на низких частотах обусловлены погрешностями микрофонов. Для повышения точности вычислений использовалось усреднение по ансамблю данных с микрофонов, а также оконное преобразование Фурье для улучшения спектра сигналов.

Заключение. Для получения акустических характеристик образцов разработан алгоритм проведения измерений и последующих вычислений с помощью метода переходной матрицы. В результате получены акустические параметры исследуемого в данной работе композита.

Полученные характеристики совпадают с теоретическими, представленными в программе Bruel&Kjar PULSE Transmission Loss. Таким образом, итоговые результаты можно считать корректными и использовать в соот-

ветствующих отраслях, например, в области защиты от шума.

Библиографические ссылки

1. Трофимов С.А., Гаврильев С.А., Иванов М.В. Разработка акустической заглушенной камеры для Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана / Акустика среды обитания: сб. тр. Третьей всерос. конф. молодых учёных и специалистов, 2018. С. 221—227.
2. Redonnet S. Investigation of the acoustic installation effects of an open-jet anechoic wind tunnel using computational aeroacoustics // Applied Acoustics. 2020. Vol. 169. P. 107469.
3. Gavriliev S., Ivanova O., Decaen T. Independent component analysis of hydrodynamic bubbles' properties // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 492. P. 012014.
4. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 76—79.
5. Scamoni F., Pian E., Scrosatti C. Experimental evaluation of the sound absorption and insulation of an innovative coating through different testing methods // J. Building Acoustics. 2017. Vol. 24. No. 3. P. 173—191. DOI: 10.1177/1351010X17728596.
6. ГОСТ 31704—2011. Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере (EN ISO 354:2003).
7. Иванов М.В., Гаврильев С.А., Трофимов С.А., Ксенофонтов Б.С., Иванова О.А. Исследование гидроакустических свойств материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2018. № 4. С. 71—83. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-71-83.

Ссылка для цитирования

Неусыпин К.А., Иванов М.В., Тотунов С.С., Гаврильев С.А., Лаухин Д.А., Лушкин А.А. Алгоритм построения моделей акустических характеристик материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 560—564. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-560-564.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003, ГОСТ Р 7.0.5—2008 и ГОСТ Р 7.07—2021 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.

УДК 681.5

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-565-568

Л.Г. Тугашова, канд. техн. наук, доц.
(Альметьевский государственный нефтяной институт)

tugashova@yandex.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Рассмотрена возможность построения моделей виртуальных анализаторов показателей качества нефтепродуктов для атмосферной колонны нефтеперерабатывающего завода. Проведено сравнение линейных моделей. Установлено, что более точными и менее затратными являются авторегрессионные модели с распределённым лагом. Применение таких моделей на объекте способствует повышению оперативности получения информации о качестве нефтепродуктов.

Ключевые слова: виртуальные анализаторы; авторегрессионная модель; лаг; факторы; нефтепродукт; метод главных компонент; качество.

The possibility of the virtual analyzers models constructing of the petroleum products quality indicators for the atmospheric column of an oil refinery is considered. Comparison of linear models is carried out. It was found that more accurate and less costly are autoregressive models with a distributed lag. The use of such models at the facility improves the efficiency of obtaining information about the quality of petroleum products.

Keywords: virtual analyzers; autoregressive model; lag; factors; petroleum product; method of principal components; quality.

Введение. Оперативный мониторинг и контроль показателей качества нефтепродуктов необходимы для выполнения современных требований стандартов. Применяются следующие способы измерения показателей качества нефтепродуктов: лабораторный анализ, поточные анализаторы, виртуальные анализаторы (ВА).

ВА осуществляет косвенный расчёт показателей качества по параметрам технологического процесса. Преимуществами применения ВА являются: отсутствие необходимости калибровки приборов, сокращение временных задержек при расчёте показателей качества нефтепродуктов. При этом применение ВА на нефтеперерабатывающей установке не отменяет лабораторный анализ. Данные химико-аналитической лаборатории используются для периодической корректировки моделей ВА.

Обзор литературы. Существуют различные модели ВА. Первая группа основана на знании физико-химических закономерностей процесса. Вторая группа строится с применением экспериментальных значений технологических параметров. Чаще всего ВА второй группы построены на основе многофакторных регрессионных моделей или искусственных нейронных сетей (ИНС). Обзор литературы показал, что в ней предлагаются различные модификации этих методов.

В работе [1] построены модели ВА содержания ключевых компонентов для процесса изомеризации на нефтеперерабатывающем заводе.

Они получены для дистилляционной колонны-деизогексанизатора. Модели ВА основаны на методе машинной регрессии опорных векторов (*SVM, Support Vector Machine*) и динамической модели «Вход-выход» (*OE, Output-Error*).

В работе [2] разработаны виртуальные датчики содержания бензола в лёгком риформате. Использовались методы множественной линейной регрессии, многомерных адаптивных регрессионных сплайнов и ИНС. Наилучшие результаты получены с помощью нейросетевой модели.

В работе [3] предложена *GMDH*-сеть при управлении атмосферной колонной в условиях воздействия возмущений. В работе [4] рассмотрены ВА для оценки показателей качества продуктов ректификационной колонны на основе ИНС *LNN, RBF*. Применение ИНС требует больших массивов данных для обучения сети и затрат времени.

В работе [5] предложены ситуационные модели и методы предварительной обработки данных применительно к сложной ректификационной колонне. В статье [6] приведены авторегрессионные модели ВА для установки первичной переработки нефти. Показаны их преимущества по сравнению с регрессионными моделями.

При построении ВА возникает проблема мультиколлинеарности. Для её решения применяются, например, метод гребневой регрессии, метод главных компонент (*PCA, Principal Component Analysis*) [7], *LASSO* и др.

Модели ВА показателей качества применяются на установках первичной и деструктивной переработки нефти в задачах оперативного мониторинга и стабилизации параметров технологического процесса. Способами повышения точности моделей являются предварительная обработка исходных данных, корректный выбор влияющих параметров, учёт мультиколлинеарности, выбор вида модели и метода идентификации.

Материалы и методы. При получении моделей показателей качества нефтепродуктов предлагается применять эконометрический подход. Проверим возможность получения ВА показателей качества нефтепродуктов на основе линейных многофакторных регрессионных и авторегрессионных моделей.

Первым шагом является сбор и предварительная обработка данных. Исходными данными являются результаты лабораторного анализа (температурные точки фракционного состава нефтепродуктов), а также измеренные технологические параметры процесса (давление, температура, расход, уровень). Все параметры объекта разделены на группы. Входные параметры объединены в вектор x , а выходные параметры — в вектор y (показатели качества). Входными параметрами являются управляющие и возмущающие воздействия, промежуточные параметры.

Следующим шагом является отбор влияющих параметров и исключение их мультиколлинеарности. Затем осуществляется выбор метода идентификации параметров модели.

Рассмотрим возможность построения трёх видов моделей ВА: регрессия на главных компонентах (*PCR, Principal Component Regression*), авторегрессионная модель с внешним фактором (*ARX, Autoregressive with eXternal input*), авторегрессионная модель с распределённым лагом (*ARDL, Autoregressive Distributed Lags*).

Разработка модели *PRC* состоит в следующем. При выявлении мультиколлинеарности факторов осуществляется переход от преобразованных факторов к независимым друг от друга переменным (главным компонентам):

$$F = VZ^T, \quad (1)$$

где V — матрица стандартизованных значений собственных векторов; F — матрица значений главных компонент; Z — преобразованные факторы.

После нахождения значений главных компонент составляется уравнение многофакторной регрессии, связывающее выходной параметр и главные компоненты:

$$y(t) = k_0 + \sum_{i=1}^g k_i f_i(t) + e(t), \quad (2)$$

где f_i — главные компоненты; k_0, k_i — коэффициенты; g — количество главных компонент; t — время; $e(t)$ — остатки модели.

Коэффициенты k_0 и k_i находятся методом наименьших квадратов (МНК). Уравнение регрессии (2) сложно интерпретировать. Главные компоненты связаны с преобразованными факторами зависимостью (1). Чтобы получить зависимость выходного параметра от факторов, осуществляется замена главных компонент в уравнении (2) преобразованными факторами.

При получении авторегрессионных моделей сначала необходимо исследовать ряды данных на стационарность. Для оценки стационарности временных рядов используют *ADF*-тест или *KPSS*-тест. В случае выявления нестационарности можно применить следующие способы: логарифмирование, нахождение разностей первого или второго порядка, выделение тренда, метод скользящего окна.

ARX-модель имеет вид

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i y(t-i) + \sum_{j=1}^p b_j x_j(t) + e(t), \quad (3)$$

где m — количество лагов выходного параметра; a_0, a_i, b_j — коэффициенты; p — количество факторов.

В этих моделях участвуют факторы x_j с лагом нулевого порядка. Выходной параметр y с лаговым значением участвует в качестве фактора.

ARDL-модель имеет вид

$$y(t) = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i y(t-i) + \sum_{j=1}^p \sum_{l_j=0}^{q_j-1} d_{j,l_j} x_j(t-l_j) + e(t), \quad (4)$$

где q_j — количество лагов факторов; c_0, c_i, d_{j,l_j} — коэффициенты.

В этом случае факторы x_j участвуют в модели с лагом различного порядка.

Идентификация модели заключается в определении коэффициентов модели по МНК. Необходимо установить, улучшают ли предыдущие значения одного параметра качество прогнозирования значений другого параметра. Для этого применяется *F*-тест, который позволяет сравнить две линейные модели по их способности объяснить дисперсию зависимой переменной (выходного параметра).

Статистика F -теста определяется по формуле

$$F = \frac{(RSS_S - RSS_L)/q}{RSS_L/(n - k_L)}, \quad (5)$$

где RSS_S , RSS_L — сумма квадратов остатков модели без включения и с включением временного ряда фактора $x_j(t)$; n — объём выборки; k_S и k_L — количество параметров модели без включения и с включением временного ряда фактора $x_j(t)$ соответственно; $q = k_L - k_S$.

Если вычисленное по формуле (5) значение F превосходит критическое распределение Фишера при заданном уровне значимости с параметрами $F(q, n - k_L)$, то отвергаем нулевую гипотезу.

Отметим, что порядок лагов оказывает важное влияние на результат. Определение порядков лагов выполняется по информационному критерию AIC .

Заключительный шаг — оценка качества полученной модели. Принимаем, что критериями качества модели являются коэффициент детерминации R^2 и средняя относительная погрешность ε . Для определения автокорреляции остатков применяется тест Льюинга—Бокса.

Результаты. Приведён пример разработки моделей ВА для атмосферной колонны нефтеперерабатывающего завода. Исходные данные для построения моделей получены из оперативных листов технологических параметров и результатов лабораторных анализов фракционного состава нефтепродуктов действующей нефтеперерабатывающей установки.

Параметры объекта разделены на группы для удобства при реализации математических моделей. Управляющие воздействия объединены в вектор \mathbf{u} , возмущающие воздействия — в вектор \mathbf{d} , промежуточные параметры — в вектор \mathbf{x} , а выходные параметры — в вектор \mathbf{y} . Для атмосферной колонны выбраны следующие параметры: F_r — расход верхнего орошения, кг/с; F_f — расход сырья, кг/с; T_h — температура верха колонны, °С; T_b — температура конца кипения бензиновой фракции, °С:

$$\{F_r\} \in \mathbf{u}; \{F_f\} \in \mathbf{d}; \{T_h\} \in \mathbf{x}; \{T_b\} \in \mathbf{y}. \quad (6)$$

Коэффициенты парной корреляции между факторами и выходным параметром вычислены по известной формуле. Получены следующие значения коэффициентов корреляции: $R(T_h, T_b) = 0,88$; $R(F_r, T_b) = 0,61$; $R(F_f, T_b) = 0,78$.

Полученные результаты показывают влияние всех выбранных факторов на выходной параметр. При этом выявлена высокая парная корреляция между температурой верха колонны и расходом верхнего орошения: $R(T_h, F_r) = 0,81$ (мультиколлинеарность).

Для получения качественной регрессионной модели нужно удалить из набора входных параметров один из коррелирующих факторов или применить метод для исключения мультиколлинеарности. Исключать факторы из модели не будем. По условиям технологического процесса температура верха колонны и расход верхнего орошения влияют на температуру конца кипения бензиновой фракции. Для устранения мультиколлинеарности выбран метод главных компонент (PCA). Метод позволяет преобразовать исходные факторы и получить совокупность некоррелированных факторов. При этом наличие мультиколлинеарности позволит ограничиться небольшим количеством главных компонент. Для решения проблемы интерпретации главных компонент применим выражения (1) и (2). Результаты, полученные для модели PCR , приведены ниже.

Связь главных компонент и преобразованных факторов можно записать по выражению (1). Первая главная компонента f_1 объясняет 71,89 % общей дисперсии преобразованных факторов [7]:

$$f_1 = -0,48z_1 + 0,61z_2 + 0,62z_3.$$

Зависимость выходного параметра от факторов получили из выражения (2) путём замены главной компоненты приведённым выражением:

$$\hat{T}_b(t) = k_0 - k_1F_r(t) + k_2F_f(t) + k_3T_h(t).$$

Следует отметить, что PCR позволяет исключить мультиколлинеарность, но является довольно трудоёмким методом.

В связи с этим рассмотрим возможность построения авторегрессионных моделей ВА по тем же исходным данным. Временные ряды параметров (6) исследованы на стационарность с помощью ADF -теста. Затем построена авторегрессионная модель ARX по выражению (3):

$$\hat{T}_b(t) = a_0 + a_1T_b(t-1) + a_2T_b(t-2) - b_1F_r(t) + b_2F_f(t) + b_3T_h(t).$$

Коэффициенты модели a_0 , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , b_3 определены по МНК.

В случае модели *ARDL* необходимо установить, улучшают ли предыдущие значения одного параметра (фактора) качество прогнозирования значений выходного параметра. Авторегрессионная модель *ARDL* построена по выражению (4):

$$\hat{T}_b(t) = c_0 + c_1 T_b(t-1) + c_2 T_b(t-2) - d_{1.0} F_r(t) + d_{2.0} F_s(t) + d_{2.1} F_s(t-1) + d_{3.1} T_h(t-1).$$

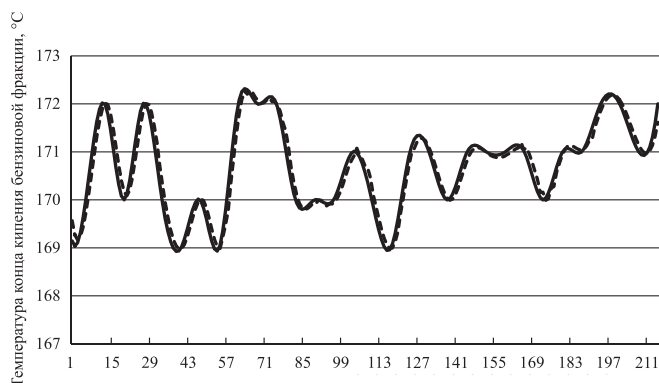
С помощью *F*-теста выполнено сравнение двух моделей: модели с включением температуры верха колонны T_h и без неё. Расчётное значение *F*-теста определено по формуле (5), $F = 633$. Критическое распределение Фишера при уровне значимости 0,05 составляет $F_k = F(1, 200) = 3,88$. Так как $F > F_k$, принята модель *ARDL* с включением фактора T_h . Установлено, что выбранные факторы (с лагом или без него) помогают в прогнозировании температуры конца кипения бензиновой фракции T_b .

Инструментом реализации моделей является программный пакет *MatLab*. Показатели качества предлагаемых моделей приведены в таблице.

На рисунке приведён график модели *ARDL*, имеющей лучшие показатели качества.

Показатели качества моделей

Модель	R^2	ε , %
<i>RCP</i>	0,73	5,32
<i>ARX</i>	0,82	2,39
<i>ARDL</i>	0,95	0,09



Температура конца кипения бензиновой фракции, °C:
 — исходные данные; ---- модель *ARDL*

Полученная модель *ARDL* имеет довольно высокую точность для применения в качестве ВА на технологической установке.

Заключение. Таким образом, исследована возможность построения моделей ВА показателей качества нефтепродуктов в случае мультиколлинеарности факторов. На примере атмосферной колонны нефтеперерабатывающего завода проведено сравнение моделей ВА температуры конца кипения бензиновой фракции. Наилучшие результаты получены для авторегрессионной модели с распределённым лагом: коэффициент детерминации составил 0,95, а средняя относительная погрешность — 0,09 %. Приведённые значения показателей свидетельствуют о возможности применения предложенных моделей ВА на установках для оперативного контроля качества нефтепродуктов.

Библиографические ссылки

1. Herceg S., Andrijić Z.U., Bolf N. Support Vector Machine-based Soft Sensors in the Isomerisation Process // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2020. Vol. 34. No 4. P. 243—255.
2. Andrijić Z.U., Cvetnic M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformate plant using small and bootstrapped data sets // Brazilian Journal Of Chemical Engineering. 2018. Vol. 35. Is. 2. P. 745—756.
3. Fujii K., Yamamoto T. Development of a Nonlinear Soft Sensor Using a GMDH Network for a Refinery Crude Distillation Tower // IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems. 2012. Vol. 132. No 6. P. 919—925.
4. Тугашова Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С. 97—103.
5. Верёвкин А.П., Денисов С.В., Муртазин Т.М., Устюжанин К.Ю. Подготовка данных для построения виртуальных анализаторов в задачах усовершенствованного управления // Автоматизация в промышленности. 2019. № 3. С. 12—17.
6. Тугашова Л.Г. Прогнозирование показателей качества нефтепродуктов на установках первичной переработки нефти // Учёные записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2015. Т. 14. С. 99—103.
7. Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Исследование качества нефтепродуктов с применением моделей // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. № 4. С. 551—564.

Ссылка для цитирования

Тугашова Л.Г. Прогнозирование показателей качества нефтепродуктов с применением статистических методов // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 565—568. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-565-568.



Д.Р. Джамалов, д-р фил. по техн., **Г.Г. Гурбанова**
(Азербайджанский технический университет, г. Баку, Азербайджан)

agarahim@rambler.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КЕПСТРАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИРИДОДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрены вопросы применения кепстрального метода для обработки иридодиагностических телевизионных сигналов. Предложен метод кепстральной обработки задержанного видеосигнала аэрокосмической телевизионной системы. Применение метода значительно облегчает определение задержки и расширяет динамический диапазон скорректированного сигнала. Получено выражение для определения кепстра мощности при различной апертуре считывающего луча и построена субоптимальная модель идеального корректора.

Ключевые слова: апертурная коррекция; цифровая коррекция; линейные и нелинейные корректоры; кепстральный метод; апертура; апертура Гаусса; экспоненциальная апертура; кепстр мощности сигнала.

The questions of the cepstrum method application for the processing of iridology television signals are considered. A cepstrum method for processing a delayed video signal of an aerospace television system is proposed. The application of the method greatly facilitates the determination of the delay and expands the dynamic range of the corrected signal. An expression for determining the power cepstrum at different apertures of the reading beam is received and a suboptimal model of an ideal corrector is designed.

Keywords: aperture correction; digital correction; linear and nonlinear correctors; cepstrum method; aperture; Gaussian aperture; exponential aperture; signal power cepstrum.

Введение. Улучшение качества телевизионного изображения является важной задачей телевизионной техники. Немаловажная роль в решении этой задачи отводится методам и устройствам апертурных искажений. Апертурные искажения сигнала изображения возникают в фотоэлектрических преобразователях из-за конечных размеров сечения электронного луча, неэффективности переноса зарядов в твёрдотельных датчиках изображения на приборах зарядовой связи (ПЗС), аберраций в оптических и электронных системах. Основной тенденцией в развитии техники телевизионного вещания является повышение качества воспроизводимого изображения, т. е. степени соответствия изображения оригиналу. Апертурные искажения приводят к уменьшению размаха высокочастотных составляющих сигнала, т. е. к размытию резких границ крупных деталей (уменьшению резкости) и к ухудшению контраста малых деталей (уменьшению чёткости). Апертурные искажения могут быть минимизированы с помощью различных апертурных корректоров. Известные методы апертурной коррекции имеют ряд существенных

недостатков, ограничивающих возможность их применения в реальных эксплуатационных условиях. В связи с этим вопросам повышения эффективности методов апертурной коррекции постоянно уделяется большое внимание.

Для коррекции чёткости применяются апертурные корректоры, в которых исходный видеосигнал (при горизонтальной апертурной коррекции) задерживается на один или два элемента изображения, а при вертикальной апертурной коррекции — на один или на два периода строки.

Обработку задержанного видеосигнала можно осуществлять различными способами. В данной работе рассматриваются улучшение телевизионных изображений с нелинейным преобразованием и обработка задержанного сигнала кепстральным методом. Метод основан на логарифмически-спектральном преобразовании и привёл к новому направлению в теории сигналов, получившему название кепстральный анализ.

Основная часть. Цифровой метод улучшения качества изображений с нелинейным преобразованием, основанный на вычислении логариф-

ма спектральных коэффициентов, называется кепстральной обработкой. Количественный результат такой обработки состоит в том, что динамический диапазон спектральных коэффициентов обычно сужается, а динамический диапазон восстановленного изображения расширяется. Процедура кепстральной обработки автоматически обеспечивает определённое подчёркивание границ изображения. Кепстральная обработка даёт возможность при сравнительно узком диапазоне регулирования задержки получить большой коэффициент коррекции или диапазон апертурной коррекции.

Апертура считывающего луча при перепадах в сигнале изображения вводит искажения, т. е. вертикальные перепады, искажаясь, повторяют форму переходной характеристики. Для компенсации апертурной коррекции применяется метод, заключающийся в задержке исходного сигнала и суммировании его с задержанным сигналом. Обработку задержанного сигнала можно осуществить методом кепстральной обработки. Кепстральная обработка позволяет существенно облегчить определение задержки тех сигналов, у которых спектр убывает с увеличением частоты. Далее рассмотрим применение кепстральной обработки при различной апертуре считывающего луча. Апертура считывающего луча приближается к экспоненциальной кривой. Апертурная характеристика при этом изменяется по закону

$$S_1(t) = e^{-at}, \quad (1)$$

где a — постоянный коэффициент.

Вертикальные перепады в сигнале при этом также выражаются формулой (1).

Дискретизируем этот сигнал, заменяя t на mT , где m — целое число, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, T — шаг дискретизации:

$$S_1(mT) = e^{-amT}. \quad (2)$$

Применяя Z -преобразование сигнала $S_1(mT)$ и заменяя оператор Z на $e^{-a\omega T}$, находим

$$\widehat{S}_1(e^{i\omega T}) = \sum_{m=0}^{N-1} e^{-amT} e^{-i\omega mT} = \sum_{m=0}^{N-1} e^{-(aT-i\omega T)m}. \quad (3)$$

Если верхний предел суммирования принять $N - 1 \rightarrow \infty$, то из формулы нетрудно определить

$$\widehat{S}_1(e^{i\omega T}) = 1/(1 - e^{-aT-i\omega T}). \quad (4)$$

Для компенсации апертурных искажений исходный сигнал задерживается на время $\tau = m_0T$. Из работы [1] известно, что Z -преобразование суммарного сигнала, состоящего из исходного и задержанного сигналов, выражается формулой

$$\widehat{S}(Z) = \widehat{S}_1(Z)(1 + \alpha Z^{-m_0}), \quad (5)$$

где α — коэффициент усиления (передачи) цепи задержки сигнала.

Подставляя в множитель $(1 + \alpha Z_0^{-m})$ вместо Z переменную $e^{-a\omega T}$, получим

$$\begin{aligned} |\widehat{S}_2(e^{i\omega T})|^2 &= |1 + \alpha e^{-i\omega m_0 T}|^2 = \\ &= |1 + \alpha e^{-i\omega m_0 T}| |1 + \alpha e^{i\omega m_0 T}| = \\ &= 1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\omega m_0 T). \end{aligned}$$

Таким образом выражение (4) позволяет составить следующее соотношение:

$$|\widehat{S}_2(e^{i\omega T})|^2 = |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 (1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\omega m_0 T)). \quad (6)$$

Для определения кепстра мощности прологарифмируем выражение (6):

$$\begin{aligned} \ln |\widehat{S}_2(e^{i\omega T})|^2 &= \ln |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 + \\ &+ \ln [1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\omega m_0 T)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Сначала находим модуль $|\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2$. Для этого выделяем действительную и мнимую части комплексного спектра $\widehat{S}_1(e^{i\omega T})$ путём умножения знаменателя и числителя (3) на множитель $1 - e^{-aT} e^{i\omega T}$:

$$\begin{aligned} \widehat{S}_1(e^{i\omega T}) &= 1/(1 - e^{-aT} e^{i\omega T}) = \\ &= (1 - e^{-aT} e^{i\omega T}) / [(1 - e^{-aT} e^{-i\omega T})(1 - e^{-aT} e^{i\omega T})] = \\ &= (1 - e^{-aT} \cos \omega T) / (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T) - \\ &- (ie^{-aT} \sin \omega T) / (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T). \end{aligned} \quad (8)$$

Далее, используя известный метод суммирования квадратов действительной и мнимой частей, имеем:

$$\begin{aligned} |S_1(e^{i\omega T})|^2 &= \\ &= [(1 - e^{-aT} \cos \omega T) / (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T)]^2 + \\ &+ [(e^{-aT} \sin \omega T) / (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T)]^2 = \\ &= (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T) / (1 + e^{-2aT} - \\ &- 2e^{-aT} \cos \omega T)^2 = 1 / (1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T). \end{aligned} \quad (9)$$

Определяем кепстр мощности:

$$\begin{aligned} C_S(m) &= \\ &= 1 / 2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln |S_1(e^{i\omega T})|^2 \cos(m\omega T) d(\omega T) + \\ &+ 1 / 2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln |1 - \alpha e^{-i\omega m_0 T}|^2 \cos(m\omega T) d(\omega T) = \\ &= C_{S1}(m) + C_{S2}(m), \end{aligned} \quad (10)$$

где $C_{S2}(m_0) = \alpha$,

$$C_{S1}(m) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 \cos(m\omega T) d(\omega T).$$

Учитывая выражение (8), получим

$$C_{S1}(m) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} [\ln(1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T)] \cos(m\omega T) d(\omega T). \quad (11)$$

Учитывая, что $\ln 1 = 0$ и производя интегрирования при $m = 0$, находим

$$C_{S1}(m) = -1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T) d(\omega T) = 0, \quad (12)$$

а при $m \neq 0$

$$C_{S1}(m) = -1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 + e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos \omega T) \cos(m\omega T) d(\omega T) = e^{-2amT}/m. \quad (13)$$

Распределение энергии в пятне подчиняется косинусквадратичному закону [2, 3]:

$$R_i(U') = R_1(0)(1 + \cos \pi U')/2 = R_1(0) \cos^2(\pi U'/2), \quad (14)$$

где $R_1(0)$ — максимальное значение энергии ($U = 0$).

Используя переходную характеристику при назначенном распределении энергии, можно определить форму видеосигнала при передаче вертикального скачка:

$$S(U) = U + 1/\pi \sin \pi U, \quad (15)$$

где $U = 2t/a\tau$; $a = 2r/\delta$; τ — длительность нарастания перепадов; a — относительный поперечник пятна; δ — шаг разложения.

Принимая обозначения $K = 2\pi/a\tau$, запишем

$$S(t) = Kt/\pi + \sin Kt/\pi, \quad (16)$$

где $K\tau = \pi/2$.

Учитывая цифровую обработку сигнала в выражении (15), необходимо перейти к дискретному времени:

$$S(mT) = KmT/\pi + \sin KmT/\pi. \quad (17)$$

Применяя преобразование Лапласа в выражении (16), находим изображённую функцию $S(mT)$:

$$\widehat{S}_1(e^{i\omega T}) = K/\pi \sum_{m=0}^N mTe^{-i\omega T} + 1/\pi \sum_{m=0}^N \sin KmTe^{-i\omega mT}, \quad (18)$$

где интервал $K\tau = \pi/2$ разбивается на m участков с шагом T .

Отсюда $NT = \pi/2$, $T = \pi/2N$.

Первое слагаемое в выражении (18)

$$\widehat{S}_1'(e^{i\omega T}) = K/\pi \sum_{m=0}^N mTe^{-i\omega T} \quad (19)$$

является арифметико-геометрической прогрессией и при $N \rightarrow \infty$ определяется следующим выражением:

$$\widehat{S}_1'(e^{i\omega T}) = [KT/\pi][e^{-i\omega T}/(1/e^{-i\omega T})^2]. \quad (20)$$

Для упрощения анализа во втором слагаемом выражения (18) применяем формулу Эйлера:

$$\sin KmT = [e^{ikmT} - e^{-ikmT}]/2i.$$

Тогда второе слагаемое можно представить в виде суммы двух рядов:

$$\widehat{S}_1''(e^{i\omega T}) = -[1/2\pi i] \sum_{m=0}^N e^{-i(\omega+k)mT} = -[1/2\pi i][1/(1 - e^{-i\omega T} e^{-ikT})], \quad (21)$$

$$\widehat{S}_1'''(e^{i\omega T}) = [1/2\pi i] \sum_{m=0}^N (e^{ikT} e^{-i\omega T})^m = [1/2\pi i][1/(1 - e^{-i\omega T} e^{ikT})]. \quad (22)$$

Суммируя $\widehat{S}_1''(e^{i\omega T})$ и $\widehat{S}_1'''(e^{i\omega T})$, находим

$$\widehat{S}_1''(e^{i\omega T}) + \widehat{S}_1'''(e^{i\omega T}) = [1/\pi] \times [e^{-i\omega T} \sin KT / (e^{-2i\omega T} - 2e^{-i\omega T} \cos KT + 1)]. \quad (23)$$

Учитывая формулы (20), (23) и заменяя в них $Z = e^{i\omega T}$, что соответствует переходу из преобразования Лапласа к Z -преобразованию, имеем

$$S_1(Z) = [KT/\pi][Z(1-Z)^2] + [1/\pi][Z \sin KT / (Z^2 - 2Z \cos KT + 1)] = Z/\pi[KT/(1 - 2Z + Z^2) + \sin KT/(1 - 2Z \cos KT + Z^2)]. \quad (24)$$

Необходимо выделить мнимую и действительную части выражения $S_1(e^{i\omega T})$ для дальнейшей обработки сигнала. С этой целью числитель и знаменатель дробей 1-го и 2-го слагаемых выражения (24) умножаем на комплексную сопряжённую знаменателя 1-й и 2-й дробей соответственно:

$$\widehat{S}_1'(e^{i\omega T}) = [KT/\pi][e^{-i\omega T}/(1/e^{-i\omega T})^2] = [KT/\pi][(2 \cos \omega T - 2)/(2 - 2 \cos \omega T)^2] = [KT/\pi][1/(2 \cos \omega T - 2)] = -[KT/2\pi][1/\sin^2(\omega T/2)]. \quad (25)$$

Проведём аналогичное преобразование со вторым слагаемым:

$$\begin{aligned} \widehat{S}_1''(e^{i\omega T}) + \widehat{S}_1'''(e^{i\omega T}) &= \\ &= [1/\pi][e^{i\omega T} \sin KT / (1 + \cos 2\omega T - \\ &- 2 \cos \omega T \cos KT - i \sin 2\omega T - 2 \cos KT \sin \omega T)] = \\ &= [2 \sin KT / 4\pi][(\cos \omega T - \cos KT) / (\cos \omega T - \cos KT)^2] = \\ &= [\sin KT / 2\pi][1 / \cos \omega T - \cos KT]. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, получим модуль преобразования функции $S(mT)$:

$$\widehat{S}_1(e^{i\omega T}) = [\sin KT / 2\pi][1 / \cos \omega T - \cos KT] + [KT / 2\pi][1 / (\cos \omega T - 1)]. \quad (27)$$

Квадрат модуля Z -преобразования $S(mT)$ составит

$$\begin{aligned} |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 &= \\ &= [(\sin^2 KT) / (4\pi^2)][1 / (\cos \omega T - \cos KT)^2] + \\ &+ [K^2 T^2 / 4\pi^2][1 / (\cos \omega T - 1)^2] + \\ &+ [(KT \sin KT) / (2\pi^2)][1 / (\cos \omega T - \\ &- \cos KT)(\cos \omega T - 1)]. \end{aligned} \quad (28)$$

Находим первое слагаемое кепстра мощности $C_{S_1}(m)$:

$$C_{S_1}(m) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 \cos m\omega T d(\omega T), \quad (29)$$

при $m = 0$

$$C_{S_1}(0) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln |\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 d(\omega T). \quad (30)$$

При небольших значениях углов KT принимаем, что $\sin KT \approx KT$, поэтому из формулы (27) находим

$$|\widehat{S}_1(e^{i\omega T})|^2 = [KT/\pi][1/\cos \omega T]. \quad (31)$$

Следовательно,

$$C_{S_1}(m) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln[(K^2 T^2) / (\pi^2 (1 - \cos \omega T)^2)] \cos m\omega T d(\omega T). \quad (32)$$

Выражение (32) перепишем в виде суммы интегралов $C_{S_1}(m) = A_1 + A_2$, где

$$\begin{aligned} A_1 &= 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln[(K^2 T^2 / \pi^2) \cos m\omega T d(\omega T) = \\ &= \ln[(K^2 T^2 / \pi^2)][\sin m\omega T / m\pi]; \end{aligned} \quad (33)$$

$$A_2 = -1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 - \cos \omega T)^2 \cos m\omega T d(\omega T). \quad (34)$$

Учитывая известное разложение

$$\ln(1 - X) = -[X + X^2/2 + X^3/3 + \dots],$$

из формулы (34) получим

$$\begin{aligned} A_2 &\approx +1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} \cos \omega T \cos m\omega T d(\omega T) + \\ &+ 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} (\cos^2 \omega T) / 2 \cos m\omega T d(\omega T). \end{aligned} \quad (35)$$

Из-за чётности подынтегрального выражения и симметричности границ интегрирования находим:

$$A_2 = A_1' + A_2'',$$

где

$$\begin{aligned} A_1' &= 2/\pi \int_0^{\pi} \cos \omega T \cos m\omega T d(\omega T) = \\ &= 1/\pi \int_0^{\pi} \cos[(m+1)\omega T] d(\omega T) + \\ &+ 1/\pi \int_0^{\pi} \cos[(m-1)\omega T] d(\omega T) = \\ &= \{\sin[(m+1)\omega T] / (m+1)\pi\}_0^{\pi(m+1)} + \\ &+ \{\sin[(m-1)\omega T] / (m-1)\pi\}_0^{\pi(m-1)} = \\ &= \{\sin[(m+1)\pi] / (m+1)\pi\} + \\ &+ \{\sin[(m-1)\pi] / (m-1)\pi\}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} A_2'' &= 1/4\pi \int_0^{\pi} \cos m\omega T d(\omega T) + \\ &+ 1/4\pi \int_0^{\pi} \cos(\omega T/2) \cos m\omega T d(\omega T) = \\ &= \sin m\pi / 4\pi m + 1/8\{\sin[(m+ \\ &+ 1/2)\pi] / ((m+1/2)\pi) + \\ &+ \sin[(m-1/2)\pi] / (m-1/2)\pi\}. \end{aligned} \quad (37)$$

Таким образом, первое слагаемое кепстра мощности составит

$$\begin{aligned} C_{S_1}(m) &= [1/4 + 2 \ln(K^2 T^2 / \pi^2)] \sin m\pi / (\pi m) + \\ &+ \sin[(m+1)\pi] / [(m+1)\pi] + \\ &+ \sin[(m-1)\pi] / [(m-1)\pi] + \\ &+ \sin[(m+1/2)\pi] / [8(m+1/2)\pi] + \\ &+ \sin[(m-1/2)\pi] / [8(m-1/2)\pi]. \end{aligned} \quad (38)$$

С помощью компьютера составлена программа на алгоритмическом языке Бейсик и получен график $C_{S_1}(m)$ (рис. 1 и 2). Субоптимальная модель идеального корректора показана на рис. 3.

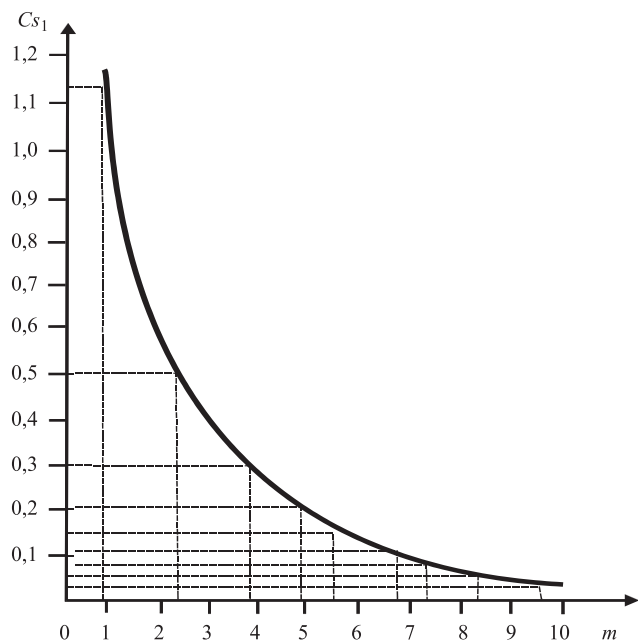


Рис. 1. Кепстр мощности для экспоненциальной апертуры

Из выражения (38) следует, что первое слагаемое кепстра мощности $C_{s_1}(m)$ в основном определяется первым слагаемым суммы этого выражения, так как остальные слагаемые имеют малые значения по сравнению с первым. Поэтому $C_{s_1}(m)$ изменяется по закону $\sin CX$ в зависимости от m . Выражения (13) и (38) позволяют сделать вывод о том, что первое слагаемое кепстра мощности убывает быстрее, чем второе. Эта особенность позволяет выделить $C_{s_1}(m)$ от $C_{s_2}(m)$ [4].

Выводы. Предложен метод кепстральной обработки задержанного видеосигнала аэрокосмической телевизионной системы. При-

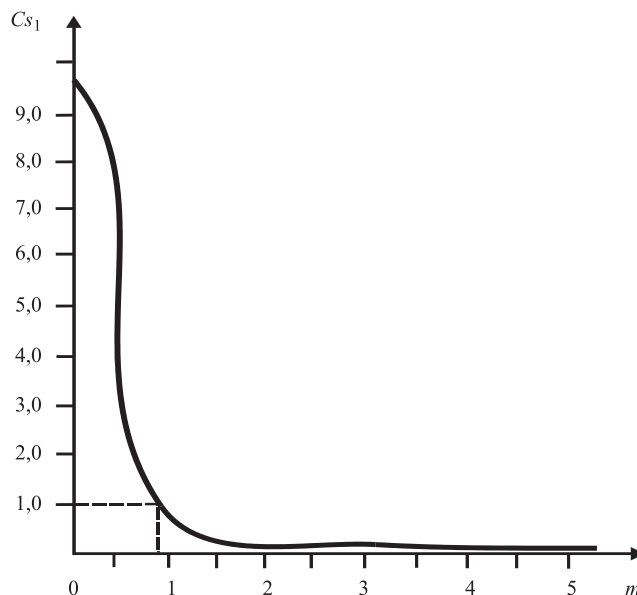


Рис. 2. Кепстр мощности для косинусквадратичной апертуры

менение этого метода значительно облегчает определение задержки и расширяет динамический диапазон скорректированного сигнала. Получено выражение для определения кепстра мощности при различной апертуре считывающего луча и построена субоптимальная модель идеального корректора.

Библиографические ссылки

1. Гоноровский Н.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
2. Рафтин Я.А. Телевизионная система. М.: Изд. Сов. радио, 1976. 245 с.
3. Рагимов А.Т. Требования к параметрам изображения иридодиагностических телевизионных систем (ИТС). Электроника и информатика: тезисы докладов. М., 2000. С. 435—436.
4. Рагимов А.Т. Основы теории и проектирования иридодиагностических телевизионных систем. Информатизация образования, СПб., 2001. 186 с.

Ссылка для цитирования

Джамалов Д.Р., Гурбанова Г.Г. Применение кепстрального метода для обработки иридодиагностических телевизионных сигналов // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 12. С. 569—573. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-12-569-573.

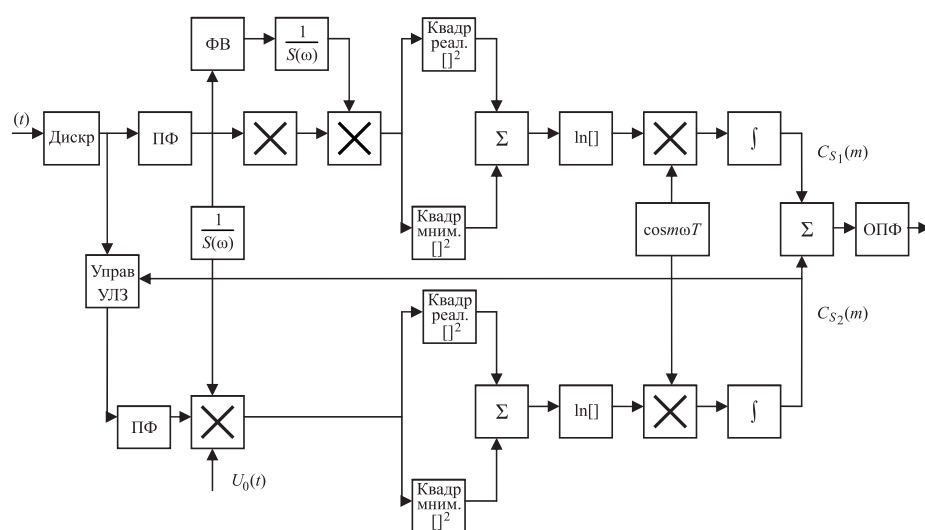


Рис. 3. Субоптимальная модель идеального корректора

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«АВТОМАТИЗАЦИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» в 2021 г.**

№ журнала Стр.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Агаев Ф.Г., Асадов И.Х. Методика оценки эффективности сжигания углеводородного попутного газа в факелах	8	350
Амелькина С.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А. Сопоставительный анализ актуальных нормативных документов в области энергоэффективного освещения	2	69
Амелькина С.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А. Разработка энергоэффективных проектов освещения с использованием автоматизированного проектирования	1	16
Арапов Д.В., Курицын В.А. Оптимизация режима реакторного блока пиролизных печей SRT-I для производства этилена	4	153
Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Условия зрительной плавности пространственных кривых при автоматизированном проектировании лесовозных автомобильных дорог	9	395
Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Автоматизированное проектирование продольного профиля лесовозных автомобильных дорог с учётом влияния зрительно плавных и изломанных линий	10	450
Волобуев С.В., Рябцев В.Г. Автоматизированное проектирование средств самотестирования модулей памяти	9	387
Гаврилов А.И., До М.Ч., Тун Н.Л. Применение лазерной профилометрии в задачах геометрической адаптации сварочного оборудования	7	296
Гаврилов А.И., До М.Ч., Тун Н.Л. Современные методы отслеживания сварных швов на основе лазерного зрения для роботизированной сварки	10	442
Горбунов А.А., Калабкин А.А., Микаева С.А. Светодиодный светильник для низковольтных сетей	4	163
Горбунов А.А., Зубов А.В., Микаева С.А. Моделирование светильника типа DownLight со светодиодным модулем в программе «Компас-3D»	12	555
Григорьев С.Н., Леонов А.А., Долгов В.А. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест	1	3
Григорьев С.Н., Долгов В.А., Умнов П.И., Фокин Н.Н., Прошкина О.С. Оценка станкоёмкости изготовления гражданской продукции на машиностроительных предприятиях ОПК	7	291
Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Анализ энергозатрат при проектировании автотранспортного средства	10	454
Дюкин А.А., Микаева А.С., Микаева С.А. Медицинский рециркулятор	8	357
Жаров М.В. Исследование перспектив применения программных сред имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения	12	531
Загидуллин Р.Р. Математическая модель задачи определения мощностей производства	8	339
Затонский А.В., Федосеева К.А. Модификация алгоритма синхронизации видеосъёмки флотационной машины с положением пеногона	10	458
Золкин А.Л., Василенко К.А., Тормозов В.С., Скибин Ю.В. Использование прикладной программно-информационной системы в среде разработки Delphi для диагностирования состояния тяговых электродвигателей	1	11
Ирзаев Г.Х. Направления проектирования радиоэлектронных средств с учётом показателей эксплуатационно-ремонтной и утилизационной технологичности	7	304
Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Сафиуллин Р.А. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор СВЧ-излучения для геологии	5	195
Кабалдин Ю.Г., Кузьминина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Нейронносетевое моделирование процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента	9	398
Карелин А.Н., Матигоров В.А., Карелин Е.Н. Управление режимами электроснабжения судоремонтного предприятия	8	342
Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А., Микаева С.А. Управление цветностью светотехнического прибора	5	204
Коваленко О.Ю., Мартынова Е.М., Микаева С.А., Журавлева Ю.А. Макетный образец лампы на основе светодиодной матрицы	9	391
Колыбенко Е.Н. Определение первой составляющей погрешностей в структуре поля допуска межпереходного размера на преобразования элементов геометрической формы в структуре исходных заготовок	12	537
Копытов А.А., Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Подсистема обучения оператора как компонент автоматизированной системы управления работой доменного воздушонагревателя конструкции Калугина	6	252
Кузнецов Е.А., Шавшаев Р.А., Нестеркина Н.П., Журавлева Ю.А. Разработка и исследование светодиодного осветительного прибора с плавным регулированием светового потока	5	200
Курносенко А.Е., Шахнов В.А. Цифровая трансформация при подготовке производства изделий электроники	2	51
Ларшина Э.Л., Микаева А.С., Микаева С.А. Лампа для подводного освещения	11	497
Лобусов Е.С., Юнесс С. Исследование функционирования сетевой полуактивной системы демпфирования колёсной машины	1	21
Любчинова В.В., Янишевская А.Г. Автоматизация проектирования приёмопередающих устройств	12	551
Микаева С.А., Горбунов А.А., Панкратов О.В. Моделирование аквариумного светильника	7	314
Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Откачной пост и станок заштамповки	3	117
Микаева С.А., Микаева А.С., Журавлева Ю.А., Дюкин А.А. Кварцевый стол и газовая горелка	10	462
Никифоров С.О., Мархадаев Б.Е., Никифоров Б.С., Шербатюк А.Д. Преимущества роторных и роторно-конвейерных систем в автоматизации производства	11	493

Рагимов Ш.Р. Определение и программирование эффективности функционирования активных элементов гибких производственных систем при структурном моделировании	3	112
Сентяков Б.А., Холов А.Д. Вихревой энергоразделитель потока	7	311
Силаев А.А., Сергеева О.Д. Современный уровень автоматизации производств пластмассовых изделий литём под давлением	2	56
Соловьев Д.Б., Шалумов А.С., Тихомиров М.В., Шалумова Н.А. АСОНИКА-БД: справочная база данных электрорадиоизделий и материалов по геометрическим, физико-механическим, теплофизическим, электрическим и надёжностным параметрам	6	243
Терещук В.С. Аномальная энергетика взаимодействия расплава алюминия в среде воды и водяного пара	11	483
Чирков Е.В., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Никитин В.В. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации	2	60
Чирков Е.В., Боровлев А.О., Проконев В.С., Высоцкая И.А. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги	1	29
Шалумов А.С., Малов А.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-В: моделирование конструкций электроники, установленных на виброизоляторах, на механические воздействия	4	147
Шалумов А.С., Чабриков С.В., Травкин Д.Н., Шалумов М.А. АСОНИКА-ТМ: моделирование конструкций печатных узлов на тепловые и механические воздействия	3	99
Шалумов А.С., Шалумова Н.А., Шалумов М.А. Цифровой двойник авиационной электроники: моделирование физических процессов при формировании электронной модели	9	403
Эминов Р.А., Гусейнли Э.И., Рамазанов В.М. Повышение точности оценки просадки грунта для безопасного функционирования трубопроводов	3	108
Янгиров И.Ф. Низкочастотный спиральный генератор крутильных колебаний	12	547
Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Оценка механической надёжности клиноремённой передачи двигателя станка- качалки для добычи нефти	4	160
Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Возможности использования технологий FACTS в энергосистеме и её приложения	10	435
Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитной муфты	3	121
Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Электрический линейный асинхронный путевой датчик	2	65
Янгиров И.Ф., Халиков А.Р. Линейный асинхронный дефектоскоп	8	354

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Алесин В.С., Павленко О.В., Раздобарин А.М., Сабадаш Е.Г. Особенности обтекания планера летательного аппарата «Чирок» при изменении углов атаки и скольжения	6	280
Алесов М.Б. Управление сопровождением наземных объектов с летательных аппаратов	8	364
Бабиченко А.В., Некрасов А.В., Бородаев Н.В., Бородаева О.А. К вопросу обеспечения точности математического моделирования бесплатформенных инерциальных систем	3	126
Баринов В.А., Курилов В.Б., Павленко О.В. Обтекание осесимметричной мотогондолы с центральным телом и дроссельными шайбами внутри канала	5	219
Веселовский А.А., Веселовская О.А., Терехов Д.Ф. Анализ возможности полной автоматизации оптического тракта при работе с кольцевым лазерным гироскопом	7	322
Гаврилов А.И., До М.Ч. Повышение качества слежения за стыком сварных швов с V-образной разделкой на основе фильтра Калмана и нейронной сети	11	500
Галактионов М.В., Николаев С.В. Построение области возможных атак воздушной цели при различных методах наведения на воздушную цель	9	416
Джавадов Н.Г., Асадов Х.Г., Казымлы Р.В. Исследование влияния метеорологических факторов на ослабление радиосигнала в атмосферных распределённых сетях передачи информации	10	477
Железникова О.Е., Журавлева Ю.А., Микаева С.А. Электронное устройство для трансляции текстовой информации	8	370
Зейтун А.М., Веселовская О.А. Анализ и моделирование системы перевёрнутого маятника	7	326
Зинченко Л.А., Казаков В.В., Миронов А.А. Иерархический дескриптор для отображения информации о многослойных радиационно стойких экранах защиты электронной аппаратуры	4	171
Зорченков А.М. Векторизация программного кода	5	211
Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Волочкова А.А., Поклад М.Н. Итерационная формула Ньютона для поиска решения уравнения как абстрактная задача теории модального синтеза	5	208
Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Лапин А.В. Аналитический синтез инвариантного по углу тангажа управления продольным движением вертолёта	10	467
Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Поклад М.Н. Новые формулировки алгебраических критериев управляемости и наблюдаемости линейной МИМО-системы	3	135
Исмаилов М.М., Асланова А.В. Оптимизация полёта беспилотных летательных аппаратов для гиперспектрального исследования морской поверхности в условиях аэрозольного загрязнения приводного слоя атмосферы	2	79
Кузнецов Е.А., Нестеркина Н.П., Журавлёва Ю.А. Разработка проекта архитектурного освещения фасада здания «Дворец культуры»	10	473
Куприянов А.О., Масленников А.Л., Кузнецов Д.А., Морозов Д.А. Исследование точности позиционирования интегрированной навигационной системы при прерывании измерительных сигналов	11	521
Лясковский В.Л., Мешеряков В.Д., Бреслер И.Б., Алашеев М.А. Алгоритм выбора системотехнических решений по созданию (развитию) иерархических информационно-телекоммуникационных систем	6	260
Найнг М.Т., Гаврилов А.И., Ньян Л.Т., Кхант К.З., Ньи Н.Х. Система распознавания лиц на основе метода глубокого обучения при слабой освещённости	9	421
Неусыпин К.А., Иванов М.В., Тотунов С.С., Гаврильев С.А., Лаухин Д.А., Лушкин А.А. Алгоритм построения моделей акустических характеристик материалов	12	560
Оболенский Ю.Г., Крошкина А.А. Способ повышения точности системы стабилизации нормальной перегрузки	5	227

Пименова М.Б., Парфентьев К.В. Обнаружение движущихся объектов в кадре по методу вычисления оптического потока Лукаса — Канаде	1	34
Прирева Н.М. Возвращение альтернативной энергии от городского транспортного средства	1	39
Подчерзев В.П., Топильская С.В. Выбор конфигурации и параметров системы виброзащиты гироскопических измерителей угловой скорости	4	187
Прокофьева Е.С., Цю-жен-цин Д.А., Мальцева С.В. Автоматизация управления ресурсами организации на основе имитационного моделирования с использованием прогнозирования входных потоков	6	272
Пупков К.А., Броварская Ю.К. Динамические и информационные свойства интеллектуальных систем управления	4	167
Рязанова Н.Ю., Осипова С.В., Михайлова Т.Ю. Метод построения классификатора сетевого трафика на основе глубокого обучения	4	177
Сазонова Т.В., Шелагурова М.С., Корнева Е.Г. Исследование режима экстремальной коррекции по полю рельефа методом математического моделирования с использованием результатов лётных испытаний	5	231
Сафаров А.М., Жураева К.К., Мирасадов М.Ж. Расчёт магнитных цепей преобразователей тока с учётом нелинейности зависимости удельного магнитного сопротивления от магнитной индукции	11	516
Синьёв Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Цыжуй В. Исследования коррекции интегрированной навигационной системы при отсутствии спутникового сигнала	11	510
Скрыпников А.В., Денисенко В.В., Высоцкая И.А., Демичев С.Е., Берестовой А.А. Программно-технические средства искусственного интеллекта в условиях онлайн-трансформации	8	373
Тимофеев А.Н., Дасеф Ф. Навигация автономного мобильного робота на основе адаптивного нейро-нечёткого контроллера	6	268
Тугашова Л.Г. Прогнозирование показателей качества нефтепродуктов с применением статистических методов	12	565
Ху Ц., Селезнева М.С., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Параметрическая идентификация модели погрешностей инерциальной навигационной системы летательного аппарата	7	317
Ху Цяоцзю. Исследование процедуры параметрической идентификации погрешностей инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата	4	183
Цибизова Т.Ю., Клычников В.В., Косовский А.В. Нелинейный фильтр Калмана с самоорганизующейся моделью	2	73

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Моргунов А.В., Астраков К.С. Оценка эффективности информационной системы управления документооборотом научно-образовательного учреждения	9	427
---	---	-----

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Волобуев С.В., Рябцев В.Г., Евсеев К.В. Автоматизированная система верификации моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM	3	138
Воробьёв Е.И., Дорофеев В.О., Михеев А.В. Алгоритмы полуавтоматического управления протезами рук	2	92
Воронов Е.М., Репкин А.Л., Хромов Ф.М., Куся А.М., Сычёв С.И., Хамаев Н.В. Модель конфликтного взаимодействия группировок с сетевым управлением строём управляемых объектов	2	82
Джамалов Д.Р., Гурбанова Г.Г. Применение кепстрального метода для обработки иридодиагностических телевизионных сигналов	12	569
Исмаилов М.М. Вопросы оптимального планирования контроля состояния трубопроводов с помощью средств дистанционного зондирования	6	285
Филатов С.Е. Разработка модели и методики учёта расходных материалов для производства электронных узлов компьютерных систем управления	7	331
Хоанг К.К., Авксентева Е.Ю., Федосов Ю.В., Нгуен В.Т. Адаптивное обучение автоматизированному проектированию печатных плат судовых интегрированных систем управления	1	44
Шахрай Е.А., Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Анализ чувствительности влияния параметров регулятора с аппроксимирующим управлением на показатели качества регулирования	8	377

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов	3, 7, 8, 11
Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2021 г.	12 574

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 28.09.2021.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 26.11.2021.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солишнз».
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