

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

Адрес редакции:

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 75

3
2021

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- Шалумов А.С., Чабриков С.В., Травкин Д.Н., Шалумов М.А.** АСОНИКА-ТМ: моделирование конструкций печатных узлов на тепловые и механические воздействия 99
- Эминов Р.А., Гусейнли Э.И., Рамазанов В.М.** Повышение точности оценки просадки грунта для безопасного функционирования трубопроводов 108
- Рагимов Ш.Р.** Определение и программирование эффективности функционирования активных элементов гибких производственных систем при структурном моделировании 112
- Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А.** Откачной пост и станок заштамповки 117
- Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А.** Исследование магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитной муфты 121

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

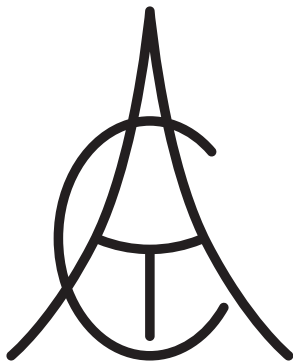
- Бабиченко А.В., Некрасов А.В., Бородаев Н.В., Бородаева О.А.** К вопросу обеспечения точности математического моделирования платформенных инерциальных систем 126
- Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Поклад М.Н.** Новые формулировки алгебраических критериев управляемости и наблюдаемости линейной МИМО-системы 135

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Волобуев С.В., Рябцев В.Г., Евсеев К.В.** Автоматизированная система верификации моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM 138

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

- По страницам журналов 144



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 $\frac{3}{2021}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Shalumov A.S., Chabrikov S.V., Travkin D.N., Shalumov M.A.** ASONIKA-TM: modeling of printed circuit board design for thermal and mechanical effects 99
- Eminov R.A., Guseynli E.I., Ramazanov V.M.** Improving the accuracy of the soil subsidence evaluation for the safe operation of pipelines 108
- Ragimov Sh.R.** Determination and programming of the active elements functioning efficiency of flexible production systems in structural modeling 112
- Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Dyukin A.A.** Exhaust unit and stamping machine 117
- Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A.** Study of the magnetic field in the air gap of an electromagnetic clutch 121

MODERN TECHNOLOGIES

- Babichenko A.V., Nekrasov A.V., Borodaev N.V., Borodaeva O.A.** On the issue of the accuracy ensuring of mathematical modeling of without platform inertial systems 126
- Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Poklad M.N.** New formulations of algebraic criteria for controllability and observability of a linear MIMO-system 135

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

- Volobuev S.V., Ryabtsev V.G., Evseev K.V.** Automated verification system of the DDR3 SDRAM memory chips 138

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

- On the journal pages 144



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

als@asonika-online.ru

АСОНИКА-ТМ: МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ НА ТЕПЛОВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассмотрен программный комплекс АСОНИКА-ТМ, предназначенный для расчёта тепловых и механических характеристик печатных узлов. Предусмотрен учёт следующих видов воздействий: гармонической и случайной вибраций, одиночного и многократного ударов, линейного ускорения, акустического шума, а также стационарного и нестационарного тепловых воздействий. Рассмотрены интерфейс программы и её функциональные возможности, примеры расчётов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; печатная плата; радиоэлектронная аппаратура; механические характеристики; тепловые характеристики; математическое моделирование.

The ASONIKA-TM software complex, suitable for calculating the thermal and mechanical characteristics of printed circuit boards is considered. The following types of effect are taken into account: harmonic and random vibrations, single and multiple shocks, linear acceleration, acoustic noise, as well as stationary and non-stationary thermal effects. The interface of the program and its functionality possibilities, examples of calculations are considered.

Keywords: radio engineering device; printed circuit board; radioelectronic equipment; mechanical characteristics; thermal characteristics; mathematical modeling.

Подсистема автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) АСОНИКА-ТМ предназначена для расчёта тепловых и механических характеристик печатных узлов (ПУ). АСОНИКА-ТМ позволяет провести расчёт на гармоническую (ГВ) и случайную (СВ) вибрации, одиночный и многократный удары, линейное ускорение, акустический шум, а также на стационарное и нестационарное тепловые воздействия. В системе реализован импорт данных, в том числе из систем PCAD, Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD по имеющемуся сборочному чертежу [1–3].

АСОНИКА-ТМ подключена к сетевой базе данных (СБД) АСОНИКА на основе Postgres 8.4. СБД содержит геометрические, теплофизические и физико-математические параметры электрорадиоизделий (ЭРИ) и конструкционных материалов, необходимых для расчёта тепловых и механических характеристик.

АСОНИКА-ТМ позволяет анализировать как конечно-разностные, так и конечно-элементные модели печатных узлов и печатных плат. Платы могут быть прямоугольными, круглыми, сложной формы, с вырезами. В программе много гибких настроек. Существует возможность формирования отчётов по результатам моделирования.

Рабочая область окна программы состоит из строки меню, панелей управления (ПУ), статусной строки — «панели постпроцессора», дерева проекта, закладки «Описание элемента», содержащей свойства выбранного элемента дерева, закладок «Вид на плоскости» и «Вид в пространстве», представляющих изображение ПУ на плоскости и в пространстве, график выбранного механического воздействия, карту механических или тепловых режимов работы ЭРИ, график амплитудно-частотных — АЧХ (амплитудно-временных характеристик — АВХ) в контрольной точке или в ЭРИ. Рассмотрим основные элементы интерфейса.

Панель управления дублирует команды из пунктов меню и состоит из следующих панелей инструментов: стандартная, редактирование, приложения, графические характеристики, моделирование, 3D-управление. Число используемых панелей инструментов в панели управления выбирает пользователь. Закладки «Воздействие», «Режимы» и «АЧХ (АВХ)» появляются после расчётов постпроцессора.

Рассмотрим отдельно основные пункты меню АСОНИКА-ТМ.

Пункт меню «Проект» представлен на рис. 1. Рассмотрим основные из его команд.

АСОНИКА-ТМ поддерживает девять вариантов импорта (команда «Импорт»):

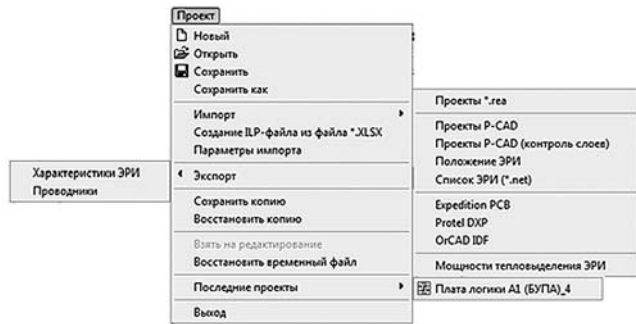


Рис. 1. Пункт меню «Проект»

1. Импорт\Проекты *.rea. Импорт структуры проекта из файла *.rea предыдущих версий АСОНИКА-ТМ.

2. Импорт\Проекты P-CAD. Импорт структуры проекта из файла *.pdf (*.pdif) (P-CAD Database interchange Format) системы P-CAD. По умолчанию предполагается выбор файлов из папки Import: C:\ASONIKADATA\Import\. После осуществления импорта необходимой платы её 2D- и 3D-изображения станут доступны в АСОНИКА-ТМ.

3. Импорт\Проекты P-CAD (контроль слоёв). Импорт структуры проекта из файла *.pdf (P-CAD Database interchange Format) системы P-CAD с обеспечением контроля слоёв. Импорт осуществляется аналогично Импорт\Проекты P-CAD. При осуществлении импорта выдаётся окно, где необходимо определить слои платы и компонентов, которые требуется отобразить в проекте.

4. Импорт\Положение ЭРИ. В подсистеме АСОНИКА-ТМ, когда проект открыт, производится импорт положений ЭРИ. Данная функция работает для проектов, импортированных из P-CAD, для файлов с расширением *.pdf (*.pdif). В импортированном файле прописаны положения ЭРИ на плате.

5. Импорт\Expedition PCB. Импорт структуры проекта из файлов формата IDF (Intermediate Data Format) системы Mentor Graphics (считывание файлов *.emn и *.emp). По умолчанию данные файлы расположены по адресу C:\ASONIKADATA\Import\IDF\MENTOR\.

6. Импорт\Protel DXF. Импорт структуры проекта из файлов формата IDF (Intermediate Data Format) системы Protel DXF/Altium Designer (считывание файлов *.pro и *.brd). По умолчанию данные файлы расположены по адресу C:\ASONIKADATA\Import\IDF\ALTIUM\.

7. Импорт\OrCAD IDF. Импорт структуры проекта из файлов формата IDF (Intermediate Data Format) системы Cadence OrCAD (считывание файлов *.ldf и *.bdf). По умолчанию данные файлы расположены по адресу C:\ASONIKADATA\Import\IDF\ORCAD\.

8. Импорт\Список ЭРИ (*.net).

9. Импорт\Мощности тепловыделения ЭРИ. Импорт мощностей тепловыделения ЭРИ осуществляется из текстового файла. Структура файла:

```
ERI1: P1
ERI2: P2
...
ERIK: PK
```

Здесь ERI_i — позиционное обозначение i -го ЭРИ, P_i — значение мощности тепловыделения в ваттах.

Команда «Создание ILP-файла из файла *.XLSX» позволяет сформировать на основе .xlsx-файла .ilp-файл. При выборе этого пункта в режиме импорта запускается редактор ILP-списков, в котором следует провести импорт файла .xlsx. Данный редактор является дополнительным инструментом к системе АСОНИКА. Инструкцию по данному приложению можно найти, нажав на кнопку справки в приложении.

Команда «Параметры импорта». Перед началом импорта стоит настроить его параметры для структуры проекта из файлов *.rea и *.pdf.

В диалоговом окне параметров импорта активная опция «Использовать ILP-файл» означает, что при импорте структуры проекта полная условная запись ЭРИ будет браться из ILP-файла по позиционному обозначению. Имя ILP-файла должно совпадать с именем импортируемого файла *.rea или *.pdf.

При импорте вариант установки ЭРИ будет выбрано согласно приоритету при его наличии в полной условной записи ЭРИ в БД.

Команда «Экспорт/Характеристики ЭРИ» даёт возможность сохранить в текстовом файле ускорения или температуры ЭРИ в зависимости от типа расчёта согласно текущей карте режимов. Данная функция доступна, когда АСОНИКА-ТМ переключена в режим просмотра результатов расчёта (постпроцессор).

Команда «Экспорт/Проводники». АСОНИКА-ТМ позволяет сохранять данные о проводниках ЭРИ в отдельном файле.

Команда «Взять на редактирование». После проведения расчёта все исходные данные и результаты моделирования сохраняются в отдельном файле. Поэтому структуры редактируемого и посчитанного проектов могут различаться. Данная команда предназначена для открытия в режиме препроцессора структуры проекта, находящейся в режиме постпроцессора.

Команда «Восстановить временный файл». При переходе в режим постпроцессора текущая структура проекта сохраняется во временном

файле. Пункт меню предназначен для загрузки в препроцессор этого файла.

Пункт меню «Правка» представлен на рис. 2. Рассмотрим его основные команды.

Команда «Добавить объект» — добавление выбранного объекта в дерево проекта путём его выбора из списка доступных объектов. Для печатного узла можно добавить цепи, крепления, контрольные точки, глобальное граничное условие. Для слоя можно добавить слой, левый, правый, передний или задний сток. Для первой или второй стороны можно добавить ЭРИ, рёбра жесткости, тепловые шины, тепловые граничные условия, группы ЭРИ, радиаторы. Для каждого ЭРИ можно добавить экспериментальные АЧХ (ГВ), АЧХ (СВ), АВХ. Можно добавить группы ЭРИ.

Команда «Редактировать» предназначена для редактирования выбранного объекта в дереве. Данной команде соответствует в контекстном меню пункт «Свойства».

Команда «Свойства печатного узла». В пункте меню «Правка» команда «Свойство печатного узла» открывает окно, в котором можно задать свойства ПУ: наименование, обозначение, размеры по осям X и Y, ориентацию в пространстве (возможность выбора).

Форму сечения можно изменять из вкладки «Описание элемента». От данного выбора зависит метод, используемый при моделировании механических процессов. При выборе «Прямоугольная МКЭ» или «Сложная» расчёт будет производиться методом конечных элементов (МКЭ). Печатная плата будет разбиваться на множество элементов треугольной формы. Результат будет несколько отличаться



Рис. 2. Пункт меню «Правка»



Рис. 3. Параметры материала

ся от полученного для формы сечения платы «Прямоугольная» методом конечных разностей (МКР). Рекомендуется выбирать форму сечения платы «Прямоугольная МКЭ» или «Сложная», так как форма «Прямоугольная» не гарантирует высокой точности расчётов на различные механические воздействия.

При выборе команды «Слой/Первая сторона» открывается диалоговое окно печатного узла, где указывается толщина и выбирается материал слоя. Материал слоя можно выбрать из базы данных. Пример параметров материала представлен на рис. 3. Параметры материала можно сохранить в текстовый файл или загрузить из файла.

Данная настройка слоя аналогична и для других слоёв (основание, вторая сторона).

Команда «Слой/Тепловые стоки». Существует возможность выбора материала и тепловых ограничений на внешней и внутренней сторонах для левого, правого стоков, стоков на внутренней и задней сторонах. Можно указать смещение стока, длину, толщину, высоту стока, выбрать материал и тепловые граничные условия на внешней и внутренней сторонах, задать варианты граничных условий.

Команда «Добавить электрорадиоизделие». В появившемся диалоговом окне указываются позиционное обозначение, класс, полное условное обозначение, приёмка, вариант установки, сторона, установочная шина, которые выбираются из базы данных.

Далее нажимается кнопка «Расчёт парам». Выдаётся диалоговое окно (вкладка «Параметры ЭРИ» — рис. 4, вкладка «Изображение ЭРИ» — рис. 5).

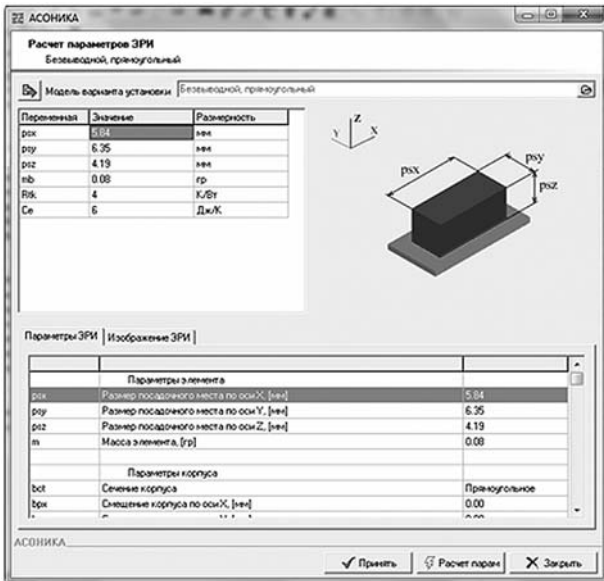


Рис. 4. Расчёт параметров ЭРИ (вкладка «Параметры ЭРИ»)

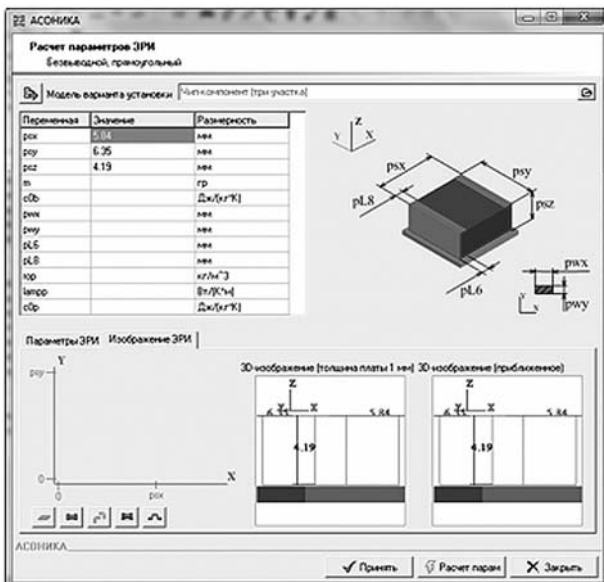


Рис. 5. Расчёт параметров ЭРИ после задания исходных данных (вкладка «Изображение ЭРИ»)

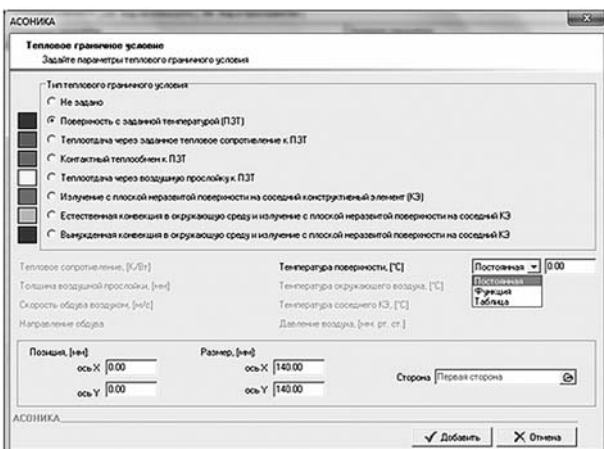


Рис. 6. Задание параметров теплового граничного условия

После ввода исходных данных в верхнюю таблицу параметров на рис. 4 и нажатия на кнопку «Расчёт парам» автоматически рассчитываются оставшиеся параметры ЭРИ и формируется его изображение.

Команды «Добавить ребро жёсткости» и «Добавить тепловую шину» интуитивно понятны.

Команда «Добавить тепловое граничное условие». Диалоговое окно задания теплового граничного условия представлено на рис. 6.

Для граничного условия типа «Поверхность с заданной температурой» указываются значения температуры поверхности. При выборе пункта «Теплоотдача через заданное тепловое сопротивление к ПЗТ» указываются значение температуры на поверхности и тепловое сопротивление в кельвинах на ватт. При выборе пункта «Контактный теплообмен к ПЗТ» указывается значение температуры на поверхности. При выборе пункта «Теплоотдача через воздушную прослойку к ПЗТ» указываются значение температуры на поверхности и толщина воздушной прослойки. При выборе пункта «Излучение с плоской неразвитой поверхности на соседний конструктивный элемент (КЭ)» указывается температура соседнего КЭ. При выборе пункта «Естественная конвекция в окружающую среду и излучение с плоской неразвитой поверхности на соседний КЭ» задаются температура соседнего КЭ и температура окружающего воздуха, а также давление воздуха. При выборе пункта «Вынужденная конвекция в окружающую среду и излучение с плоской неразвитой поверхности на соседний КЭ» задаются температура соседнего КЭ и температура окружающего воздуха, давление воздуха, скорость обдува воздухом и направление обдува (имеется возможность выбора направления оси).

Температура может задаваться как в виде постоянной величины, так и в виде функции или таблицы.

Функция может быть импульсной, синусоидальной, пилообразной и сложной. При задании температуры в виде функции для каждой функции открывается соответствующий график, на котором показан набор характерных точек именно для выбранной функции (рис. 7).

Существует также возможность задания температуры, зависящей от времени, в виде таблицы. Для этого в опциях меню «Приложение» нужно выбрать пункт «Таблица». Таблицу можно импортировать и из АСОНИКА-Т или заполнить с помощью контекстного меню. После создания таблицы её нужно подключить к граничному условию. Для этого в диа-

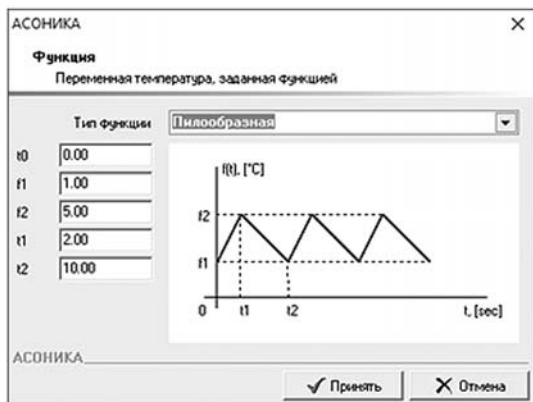


Рис. 7. Задание температуры, зависящей от времени, пилообразной функцией

логовом окне теплового граничного условия необходимо выбрать номер таблицы.

Команда «Добавить крепление». Для добавления крепления необходимо выбрать соответствующий пункт в меню «Правка». В открывшемся диалоговом окне необходимо указать форму крепления, его размеры и позицию, коэффициент жёсткости (1 — абсолютно жёсткое крепление; 0 — отсутствие жёсткости) и материал. Для того чтобы передать амплитуду воздействия непосредственно на крепление, необходимо в дереве проекта выбрать интересующее крепление, с помощью правой кнопки мыши вызвать контекстное меню и нажать кнопку «Добавить». В открывшемся диалоговом окне можно выбрать вид воздействия: гармоническая вибрация, случайная вибрация, одиночный удар, многократный удар, линейное ускорение.

Команда «Добавить контрольную точку». Контрольные точки имитируют датчики и устанавливаются пользователем на печатную плату. С помощью данной функции возможно получить значения выходных характеристик в любой точке печатной платы. К точке можно задать экспериментальные АЧХ (ГВ и СВ) и АВХ. Графики данных величин позволяют сравнить результаты, полученные в ходе эксперимента (на стенде), с результатом, полученным в ходе моделирования. Чтобы графики отобразились в контрольной точке, необходимо импортировать данные из текстового файла, где указаны координаты точек. Для этого необходимо в контекстном меню к заданному графику воздействия в контрольной точке нажать кнопку «Импорт элемента» и выбрать текстовый файл. После этого для данного воздействия появится график АЧХ.

Команда «Добавить радиатор». Варианты типа радиатора: ребристый и штыревой. В открывшемся диалоговом окне указываются позиция радиатора и сторона печатного узла, на которой размещен радиатор.

Во вкладке «Тепломеханика» указываются геометрические размеры радиатора и его рёбер. Можно указать цилиндрическую жёсткость, степень черноты, массу радиатора. Если выбрать материал из базы данных и указать его параметры, то масса радиатора будет рассчитана автоматически. Значение теплопроводности также определится автоматически.

На вкладке «Окружающая среда» выбирается либо воздушная среда, либо вакуум. При выборе воздушной среды учитывается воздействие вентилятора. Соответственно, нужно ввести среднюю скорость потока воздуха в радиаторе. Существует возможность создания и редактирования цепей: добавления проводника, удаления проводника из цепи, редактирования проводника, редактирования последовательности проводников в цепи.


Команда «Группа ЭРИ» предусматривает выбор следующих функций:

1. **Добавить. Редактировать (свойства).** Диалоговое окно создания и редактирования групп ЭРИ показано на рис. 8. Оно предназначено для групповой обработки данных ЭРИ.

2. **Удалить.** Удаление выбранной в дереве проекта группы.

3. **Сформировать по полной условной записи.** Формирование групп ЭРИ по признаку полной условной записи. При этом все введённые ранее группы будут удалены. ЭРИ, для которых полная условная запись не задана, будут объединены в группу «Без записи».

4. **Назначить параметры.** Назначение параметров ЭРИ, входящих в группу.

5. **Задать соответствия.** Для выполнения этой функции необходимо нажать на кнопку .

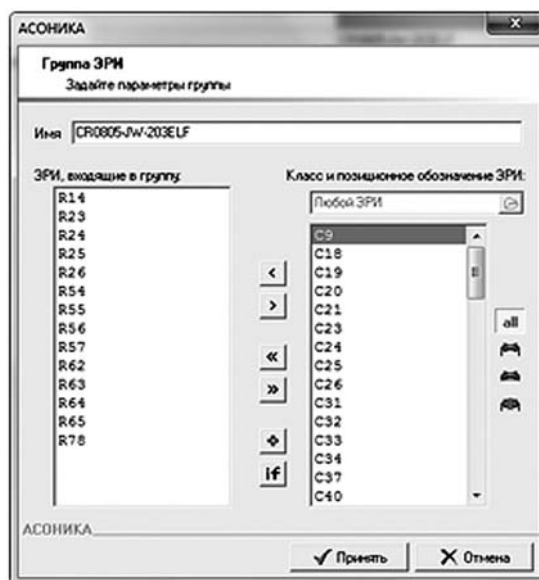


Рис. 8. Диалоговое окно создания и редактирования групп ЭРИ

Под соответствием понимается соответствие геометрических, теплофизических и допустимых параметров группы ЭРИ отдельному ЭРИ, выбранному из базы или заданному вручную. При этом данное отдельное ЭРИ не будет отображаться в дереве и не будет использоваться в расчёте. В данной функции можно изменять поворот, позицию группы ЭРИ, сторону ПУ, мощности тепловыделения и т. д.

6. *Изменить параметры.* Изменение параметров ЭРИ, входящих в группу. «Выбранный параметр» будет умножен на коэффициент, заданный в поле «Коэффициент изменения», и увеличен на число, заданное в поле «Значение изменения».

7. *Трансформировать посадочное место.* Трансформация посадочного места ЭРИ, входящих в группу. Размеры посадочного места ЭРИ по осям будут изменены на коэффициент, заданный в поле «Коэффициент трансформации». Позиционирование ЭРИ в этом случае рассматривается относительно геометрического центра.

8. *Синхронизировать.* Синхронизация групп первой и второй сторон. В процессе выполнения ЭРИ, входящих в группы с одинаковым названием одной стороны, назначаются соответствия параметров для групп ЭРИ другой стороны. Например, если в дереве выбрана первая сторона ПУ, то синхронизироваться будут ЭРИ второй стороны. После завершения синхронизации выдаётся сообщение об успешной синхронизации.

9. *Удалить ЭРИ, входящие в группу.* Удаление всех ЭРИ, входящих в группу, из дерева проекта.

Пункт меню «Вид» представлен на рис. 9. Он отвечает за изображение ПУ и дерева проекта. Первая часть меню «Вид» отвечает за отображение ПУ на плоскости. При выборе команды «Первая сторона» отображается первая сторона печатного узла. При выборе команды «Вторая сторона» отображается вторая сторона печатного узла.

Пункт меню «Настройка» показан на рис. 10.

Пункт меню «Анализ» показан на рис. 11.

Команда «Выбор расчёта» отвечает за настройку параметров механического и теплового расчётов.

Можно выбрать следующие механические воздействия: гармоническая вибрация, случайная вибрация, одиночный удар, многократный удар, линейное ускорение, акустический шум. Можно выполнить стационарный или нестационарный тепловой расчёт. При выборе одного из пунктов комплексного расчёта происходит расчёт на механические воздействия с учётом температуры.



Рис. 9. Пункт меню «Вид»

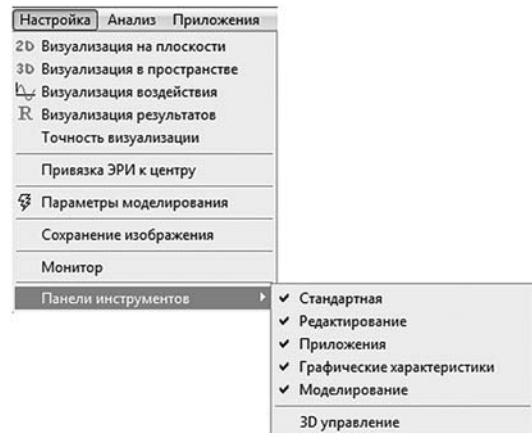


Рис. 10. Пункт меню «Настройка»



Рис. 11. Пункт меню «Анализ»

Пункт меню «Приложения». Рассмотрим его основные команды.

Команда «Препроцессор». Переход к пре-процессору (режиму ввода конструкции и воздействий) позволяет в проекте задавать параметры печатного узла, вводить конструктивные элементы, задавать их параметры, осуществлять настройки. Для анализа выбираются нужные воздействия и производится расчёт. В этом режиме доступны пункты меню «Приложения»: «Воздействия» и «Операции», которые позволяют подготовить данные по воздействиям к дальнейшим расчётам.

Команда «Воздействие» содержит следующие функции: по среднему значению, по максимальному значению, по минимальному значению, эквивалентное ускорение, прямое преобразование Фурье.

Формально данные функции можно разделить на три части. Первая часть отвечает за задание воздействия. Механическое воздействие

для ПУ можно сформировать по среднему, максимальному и минимальному значению относительно аналогичных воздействий в элементах ПУ. К примеру, имеется воздействие в ПУ — гармоническая вибрация. В креплениях конструкции тоже заданы свои воздействия гармонической вибрации, при этом диапазоны частот и ускорений совпадают. Чтобы сформировать гармоническое воздействие для ПУ по среднему (минимальному, максимальному) значению, необходимо удалить заданное гармоническое воздействие в списке воздействий и заново его добавить, не вводя график воздействия. Если данное воздействие изначально отсутствовало, то необходимо просто его добавить. Далее нажать на кнопку функции «По среднему значению» (минимальному, максимальному), и воздействие приобретёт нужный вид.

Эквивалентное ускорение — это среднеквадратическое ускорение, соответствующее заданному графиком воздействию случайной вибрации. Данное ускорение часто требуется для расчётов. Оно находится из графика воздействия случайной вибрации как для всего ПУ, так и для отдельных креплений или контрольных точек (т. е. для всех воздействий случайной вибрации). Чтобы его определить, достаточно выбрать воздействие случайной вибрации или график экспериментальной АЧХ (СВ) и нажать на кнопку пункта «Эквивалентное ускорение». Программа выдаст сообщение со значением эквивалентного ускорения.

Преобразование Фурье предназначено для перехода от временной области (графика ударного воздействия) к эквивалентной по величине частотной области (эквивалентному графику воздействия случайной вибрации), например, когда ударное воздействие нельзя воспроизвести на оборудовании из-за его ограничений. Для этого строится график ударного воздействия и создаётся воздействие на случайную вибрацию. Далее выбирается функция «Прямое преобразование Фурье».

Команда «Операции» содержит функции, которые служат для манипуляции сигналами в контрольной точке. В контрольных точках задаются воздействия, например экспериментальные АЧХ (ГВ). Для этого для каждого воздействия загружаются его текстовые файлы с координатами.

Команда «Постпроцессор» позволяет перейти к режиму вывода результатов расчёта. В данном режиме появляется специальная панель инструментов. Здесь выбирается воздействие (например, гармоническая вибрация), характеристика (например, напряжение

участков ПУ), указывается частота или время, в зависимости от воздействия.

В данном режиме становятся доступными команды «Поля» и «ЭРИ».

В режиме постпроцессора появляются вкладки «Режимы» и «АЧХ (АВХ)».

Вкладка «Режимы» представляет собой таблицу, содержащую характеристики элементов: обозначения ЭРИ; номер стороны, на которой расположено ЭРИ; частоту (или температуру при тепловом воздействии); значение по нормативно-технической документации; полученное в результате расчёта значение коэффициента нагрузки; ускорение и перегрузку при механических воздействиях; перегрев при тепловом воздействии.

На данной вкладке находится панель инструментов, которая даёт возможность сохранить полученные характеристики в виде текстового файла, файла формата Word или Excel; отсортировать отображение ЭРИ по сторонам или вывести список всех ЭРИ; провести сортировку ЭРИ по максимальному значению, выбрать основной тип сортировки, перейти в режим отображения на плоскости или в пространстве.

Вкладка «АЧХ (АВХ)» содержит графики АЧХ (АВХ) в контрольной точке для определенного воздействия и выбранной характеристики. Здесь также имеется своя панель инструментов, с помощью которой можно сохранить график; настроить параметры визуализации результатов моделирования (стиль графика); просмотреть таблицу значений выбранной характеристики в зависимости от частоты (времени), отсортировать значения в таблице по максимальному (минимальному) значению; сохранить таблицу в формате Excel; перейти к 2D/3D-изображению; отобразить (скрыть) легенду.

Пункт меню «Отчёты» отвечает за формирование файлов с исходными данными в формате Excel, необходимыми для механического, теплового и комплексного (тепломеханического) анализа. В каждом отчёте имеются вкладки: «Печатный узел», «Слои», «ЭРИ», «Рёбра жесткости», «Тепловые шины», «Крепления». Перемещаясь по вкладкам отчёта, можно увидеть, какие именно данные, необходимые для конкретного анализа, не указаны. Они выделены в отчёте красным цветом. Необходимо запомнить эти данные и поправить значения в интерфейсе программы, после чего сделать отчёты заново. После проведения отчётов следует перейти к пункту меню «Диагностика». Отчёты перед расчётом можно не формировать, если пользователь полностью уверен в правильности задания исходных данных или если программа в процессе проведения рас-

чётов не выдаёт диагностических сообщений о неправильности исходных данных.

Пункт меню «Диагностика» позволяет определить, какие параметры ЭРИ не были введены для различных видов анализа. Данная функция работает только тогда, когда сформирован отчёт по исходным данным. Функция лишней раз позволяет проверить правильность подготовки исходных данных для расчётов.

Пункт меню «Сервисные приложения» содержит два приложения: «Преобразование ударного спектра во временное воздействие» и «Предварительная оценка коэффициента нагрузки». Рассмотрим каждое приложение подробно.

Приложение «Преобразование ударного спектра во временное воздействие» — это самостоятельная утилита, которая выполняет автоматическое преобразование ударного спектра во временной ударный импульс. Для этого используется таблица ударного спектра, представляющая зависимость значения ускорения ударного спектра от частоты вибрации. Таблица может задаваться в техническом задании на изделие. На выходе определяются длительность и амплитуда ударного импульса. Их значения потом можно завести в АСОНИКА-ТМ и АСОНИКА-М-3D для проведения расчёта на удар.

Приложение «Предварительная оценка коэффициента нагрузки» позволяет, не проводя расчёта, оценить, какой будет коэффициент нагрузки для ЭРИ, по предварительным запросам пользователя для каждого расчёта.

Пункт меню «Справочная база данных» (СБД) запускает СБД АСОНИКА в режиме просмотра или редактирования. Для запуска в режиме редактирования запрашивается доступ к СБД, далее загружается окно самой базы данных.

Панель инструментов позволяет просматривать и редактировать материалы, ЭРИ, радиаторы охлаждения, виброизоляторы, классы и группы ЭРИ. Можно работать со списком справочников и справочными таблицами. На панели имеются редактор вариантов установки ЭРИ, редактор параметров математических моделей ЭРИ, карты рабочих режимов (КРР), настройка и синхронизация СБД.

Рассмотрим функциональные возможности АСОНИКА-ТМ на примере создания проекта «Сложная плата».

Проведём конвертирование печатного узла сложной формы из системы Mentor Graphics. Имеются файлы take2.emp и take2.emn — входные файлы системы Mentor Graphics в формате IDF и take2.ilr — перечень электронных компонентов в схеме для выходного файла в системе Mentor Graphics. Перед ра-

ботой необходимо их сохранить в папке C:\ASONIKADATA\Import\IDF\MENTOR\03, где C:\ASONIKADATA\ — директория проектов АСОНИКА-ТМ; 03 — номер примера.

После запуска АСОНИКА-ТМ воспользуемся импортом файлов системы Mentor Graphics: выполняются команды меню Файл/Импорт/Expedition PCB, загрузится окно импорта, где необходимо выбрать файл IDF/MENTOR/03/take2.emn.

Далее происходит импорт файла take2.emn, при этом автоматически считываются параметры элементов из базы данных. Используется перечень элементов из файла take2.ilr. После завершения импорта можно увидеть 2D- и 3D-изображение платы.

Далее необходимо задать параметры материала. Для этого в дереве проектов выбирается пункт «Слой 1». Чтобы задать параметры материала платы, необходимо нажать курсором мыши на строку «Материал слоя», после чего появится возможность выбора материала из СБД.

После определения материала необходимо посчитать сложный контур платы. Для этого необходимо выбрать в дереве проекта пункт «Печатный узел», на вкладке «Описание элемента» нажать курсором мыши на графу «Форма сечения», выбрать «Прямоугольная», в открывшемся окне выбрать вариант «Сложная». Далее выдаётся сообщение о возможности загрузки контура печатной платы. После загрузки контура плата приобрела вид, показанный на рис. 12.

Далее необходимо задать крепления платы. В данном примере введено четыре крепления.

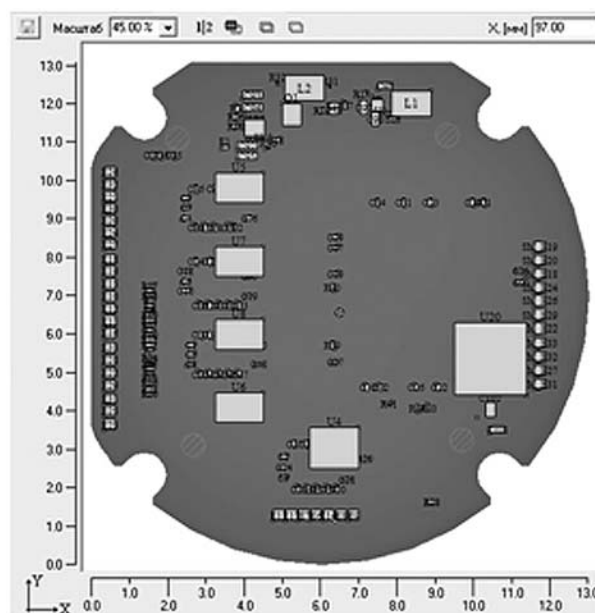


Рис. 12. Контур платы сложной формы, четыре крепления и контрольная точка

Далее вводится контрольная точка (точка снятия тепловых и механических характеристик). Крепления и контрольная точка показаны на рис. 12. Проект необходимо сохранить.

Следующий этап работы — ввод механических воздействий. Вводится график гармонической вибрации.

Задаются мощности тепловыделения для некоторых элементов. Мощности могут быть постоянными, а также задаваться функцией или таблицей. В примере заданы постоянные значения.

Далее вводятся тепловые граничные условия и параметры для нестационарного теплового режима. В данном примере для первой и второй сторон платы выбран пункт «Естественная конвекция в окружающую среду и излучение с плоской неразвитой поверхности на соседний КЭ». Для температуры окружающего воздуха и температуры соседнего КЭ указано значение 20 °С. Давление воздуха 760 мм рт. ст. После добавления тепловых граничных условий дерево проекта будет иметь вид, представленный на рис. 13.

Далее вводятся параметры для нестационарного теплового режима. В данном примере оставляются параметры для нестационарного теплового воздействия, заданные по умолчанию.

После задания всех параметров и условий производится расчёт печатного узла на механические и тепловые воздействия. Для вывода результатов нужно перейти в режим постпроцессора.

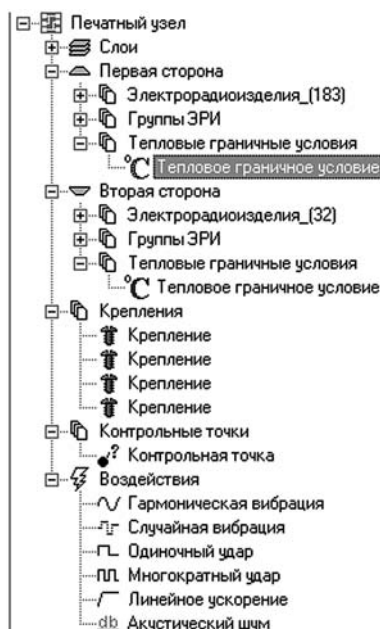


Рис. 13. Дерево проекта после добавления механических воздействий, креплений, контрольной точки и тепловых граничных условий

Можно провести расчёт случайной вибрации и вывести результаты расчётов таких характеристик, как среднеквадратические ускорения ЭРИ и ПУ на плоскости и в пространстве, ускорения на каждом элементе и возможные перегрузки в КРР, среднеквадратические прогибы участков ПУ, среднеквадратические перемещения участков ПУ, среднеквадратические напряжения участков ПУ, коэффициент механической нагрузки, перегрузка ЭРИ, график зависимости спектральной плотности от частоты, спектральная плотность ускорения по частоте в момент резонанса.

Для одиночного удара, многократного удара, линейного ускорения и акустического шума можно получить график зависимости ускорения от времени в контрольной точке, ускорения корпуса ЭРИ и участков ПУ на плоскости и в пространстве в определённый момент времени, КРР, прогибы участков ПУ в момент времени, когда на графике достигается максимальное ускорение, перемещения участков ПУ, напряжения участков ПУ, коэффициент механической нагрузки ЭРИ и перегрузки ЭРИ.

Аналогично можно проанализировать механические воздействия с учётом температуры.

Результаты расчётов при стационарном и нестационарном тепловых режимах аналогичны. Можно вывести КРР, температуру участков ПУ, коэффициент тепловой нагрузки, перегрев ПУ при нестационарном тепловом воздействии в момент времени, когда температура максимальна.

Библиографические ссылки

1. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.
2. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.
3. Шалумов М.А., Шалумов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Чабриков С.В., Травкин Д.Н., Шалумов М.А. АСОНИКА-ТМ: моделирование конструкций печатных узлов на тепловые и механические воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 99—107. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-3-99-107.

УДК 622.692.4

Р.А. Эминов, канд. техн. наук

(Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку),

Э.И. Гусейнли

(Азербайджанский государственный институт водных проблем, г. Баку),

В.М. Рамазанов, канд. экон. наук

(Азербайджанский государственный аграрный университет, г. Баку)

ramizeminov@mail.ru, elmir-huseynov_9@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПРОСАДКИ ГРУНТА ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Показано, что контроль просадки грунта в зонах прокладки трубопровода является необходимым мероприятием для обеспечения его безопасного функционирования и отмечено широкое использование в этих целях дифференциальных интерферометрических апертурных радаров (InSAR). Установлено, что такие компоненты задержки радиоволны InSAR, как гидростатическая ΔL_{hyd} и влажная ΔL_{wet} задержки, могут быть минимизированы при обеспечении определённой закономерности взаимосвязи высоты H и географической широты φ поверхности. Определено условие обеспечения совместной минимизации компонентов ΔL_{hyd} и ΔL_{wet} при обеспечении единой взаимосвязи между H и φ .

Ключевые слова: просадка грунта; грунтовые воды; трубопровод; погрешность; задержка сигнала.

It is shown that the control of soil subsidence in the laying areas of pipeline is a necessary measure for its safe operation ensuring. The widespread use of differential interferometric aperture radars (InSAR) for this purpose is noted. It is established that such components of the InSAR radio wave delay as hydrostatic ΔL_{hyd} and humid ΔL_{wet} delays can be minimized while providing a certain regularity of the relationship between the surface height H and the geographic wide φ . The condition for ensuring joint minimization of the ΔL_{hyd} and $\Delta L_{text{wet}}$ — components while ensuring a single relationship between H and φ is determined.

Keywords: soil subsidence; underground water; pipeline; error; signal delay.

Введение. Просадка грунта является глобальной проблемой. Например, в США в 45 штатах территории с площадью более $44 \cdot 10^3$ км² подвержены просадке [1]. Основными причинами просадки грунта [1] являются удаление подземных (грунтовых) вод, дренаж органической почвы, образование впадин, подземное шахтное производство, гидроуплотнение, таяние участков вечной мерзлоты, естественная консолидация (сжатие) грунта.

В работе [2] отмечается, что экстракция грунтовых вод с водоносного пласта в Шанхае (Китай) началась в 1860 г. На рис. 1 показана кривая просадки поверхности грунта начиная с 1921 г. Резкое уменьшение просадки грунта после 1965 г. объясняется резким уменьшением объёма выкачиваемых подземных вод [2].

Как было отмечено выше, одной из основных причин просадки грунта является проведение подземных земляных работ, например строительства станций метрополитена. В работе [3] показано, что измерения, проведённые радаром С- и L-диапазона в местечке Нобахреман (Иран) в 2005—2010 гг., позволили обнаружить просадку грунта на более чем 30 см на участке площадью 281 км².

Развитие городов также может стать причиной просадки грунта из-за увеличивающейся нагрузки на пласты [4]. Исследования показали, что в 2005—2010 гг. коэффициент корреляции между показателем развития городов и просадкой грунта достигал 0,64...0,8.

Как отмечается в работе [4], степень развития городов может быть проконтролирована спут-

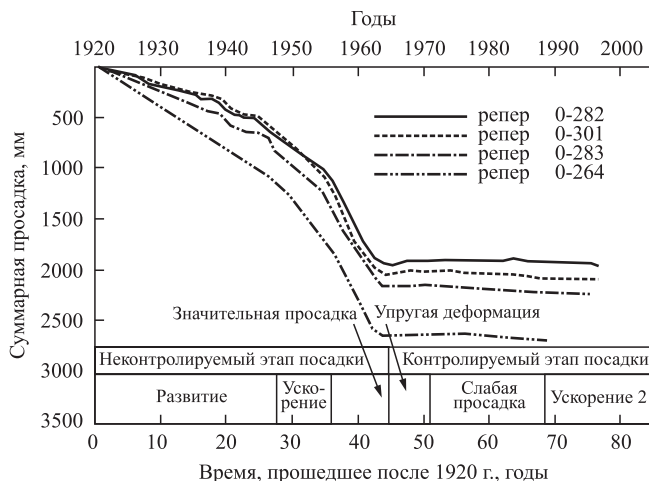


Рис. 1. Кривые просадки поверхности грунта в Шанхае начиная с 1920 г. по различным реперам

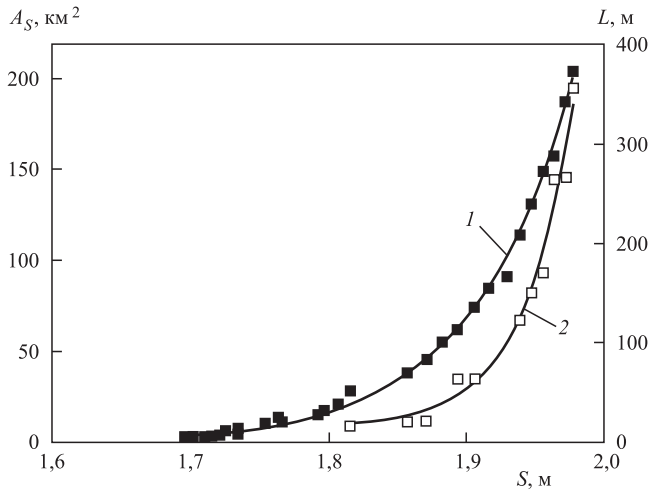


Рис. 2. Кривые регрессионных зависимостей между полезной площадью и суммарной просадкой (1) и между длиной путей и суммарной просадкой (2):

■ — A_s ; □ — L

никами DMSP (Оборонная программа метеорологических спутников, США). Исследования показали, что данные DMSP, соответствующие свечению городов в вечернее и ночное время, могут быть использованы для оценки морфологии больших городов, характеризуемой такими показателями, как население города, площадь застроенных участков, валовой национальный продукт (GDP), потребляемая электроэнергия. Однако очевидно, что такая оценка степени развития городов будет обладать значительной погрешностью из-за влияния изменчивого пропускания атмосферы, зависящего от степени загрязнения воздуха аэрозолями.

Были получены регрессионные уравнения зависимости между суммарной просадкой грунта S и полезной жилой площадью построенных домов A_s [5]

$$A_s = 1,32 \cdot 10^{-10} \exp S / 0,07 - 0,61, \quad (1)$$

а также между суммарной длиной дорог городского метрополитена L и S

$$L = 4,48 \cdot 10^{-23} \exp S / 0,03 + 15,74. \quad (2)$$

Кривые для регрессионных зависимостей (1) и (2) показаны на рис. 2.

Постановка задачи повышения точности оценки просадки грунта. Как было показано в работе [6], дифференциальные интерферометрические синтетические апертурные радары (InSAR) позволяют генерировать пространственные карты просадки грунта высокого разрешения с помощью временной серии формируемых SAR-изображений. Спутниковые синтетические апертурные радары (SAR) по-

зволяют формировать изображения участков с площадью несколько сот квадратных километров с достаточной для исследования просадки грунта точностью. В настоящее время такую функцию может выполнить успешно функционирующая пара спутников типа Sentinel-1, оснащённых SAR. Вместе с тем интерферограммы, получаемые в результате обработки данных этих спутников, могут содержать определённую погрешность, вызванную задержкой распространения радиоволн в атмосфере. В целом суммарная атмосферная задержка сигнала ΔL_{tot} может быть определена следующим образом [7]:

$$\Delta L_{\text{tot}} = \frac{1}{\cos \alpha} (\Delta L_{\text{hyd}} + \Delta L_{\text{wet}} + \Delta L_{\text{liq}}), \quad (3)$$

где ΔL_{hyd} — гидростатическая задержка; ΔL_{wet} — влажная задержка; ΔL_{liq} — жидкостная задержка.

При этом согласно [7] сухой воздух воздействует на гидростатическую задержку, а водяные пары являются причиной появления влажной компоненты задержки. Жидкостная компонента образуется из-за облаков и водяных капель и легко может быть учтена.

Гидростатическая компонента определяется по формуле

$$\Delta L_{\text{hyd}} = 10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m} P_h, \quad (4)$$

где k_1 — показатель рефракции воздуха; R_d — универсальная газовая постоянная; g_m — ускорение свободного падения; P_h — давление на высоте h .

Величина g_m определяется по формуле

$$g_m = 97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,000284H), \quad (5)$$

где φ — географическая широта; H — высота поверхности местности, км.

Влажная компонента атмосферной задержки определяется как [7]

$$\Delta L_{\text{wet}} = 10^{-6} \frac{(k_2 T_m + k_3) R_d e_a}{T_0 (g_m (\gamma + 1) - \beta R_d)} k_{\text{wet}}, \quad (6)$$

где k_2 , k_3 , β — постоянные величины; e_a — фактическое давление водяных паров; T_0 — температура земной поверхности, К; γ — сезонный коэффициент, изменяющийся в пределах 2,92...3,04;

$$T_m = T_0 \left(1 - \frac{\beta R_d}{g_m (\gamma + 1)} \right); \quad (7)$$

$$k_{\text{wet}} = \left(1 - \frac{10^4 \beta}{T_0} \right)^{\frac{g_m (\gamma + 1)}{\beta R_d} - 1}. \quad (8)$$

Из формул (3)...(8) следует, что существует некоторая возможность уменьшения погрешностей ΔL_{hyd} и ΔL_{wet} измерения расстояний в некотором множестве точек, формируемом функциональной зависимостью

$$H = H(\varphi) \quad (9)$$

при введении некоторого ограничения на эту функцию в виде

$$\int_0^{\varphi_{\max}} H(\varphi) d\varphi = c; \quad c = \text{const.} \quad (10)$$

Таким образом, сформулирована задача учёта погрешностей в определении просадки грунта, обусловленных задержками, определяемыми уравнениями (4) и (6) с учётом выражения (5).

Решение задачи. Анализ возможности уменьшения погрешности ΔL_{hyd} . С учётом выражений (4) и (5) гидростатическую задержку выразим следующим образом:

$$\Delta L_{\text{hyd}} = \frac{10^{-6} k_2 R_d P_h}{97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0028H)}. \quad (11)$$

С учётом формул (9) и (10) составим целевой интеграл оптимизации

$$F_1 = \int_0^{2\varphi_{\max}} \frac{a_1}{a_2[1 - a_3 \cos 2\varphi - a_4 H(\varphi)]} d\varphi, \quad (12)$$

где $a_1, \dots, a_4 = \text{const.}$

С учётом выражений (10) и (12) сформируем целевой интеграл безусловной вариационной оптимизации

$$F_2 = \int_0^{2\varphi_{\max}} \frac{a_1}{a_2[1 - a_3 \cos 2\varphi - a_4 H(\varphi)]} d\varphi - \lambda \left[\int_0^{2\varphi_{\max}} H(\varphi) d\varphi - c \right], \quad (13)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Следует отметить, что аналогичная задача была решена в работе [8] согласно уравнению Эйлера — Лагранжа. Решение оптимизационной задачи (13) должно удовлетворить условию

$$d \left\{ \frac{a_1}{a_2[1 - a_3 \cos 2\varphi - a_4 H(\varphi)]} - \lambda H(\varphi) \right\} / dH(\varphi) = 0. \quad (14)$$

Решение оптимизационной задачи, обеспечивающей минимум F_2 , получено в виде

$$H(\varphi) = 1 - a_3 \cos 2\varphi - \sqrt{\frac{a_1 a_4}{\lambda_0 a_2}}, \quad (15)$$

где λ_0 — вычисленное значение λ с учётом выражений (10) и (14).

Можно показать, что при решении (15) F_2 достигает минимальной величины, т. е. интегрированная гидростатическая задержка достигает минимальной величины.

Анализ возможности уменьшения погрешности ΔL_{wet} . С учётом выражений (5) и (6) получим

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{wet}} &= 10^{-6} \left(\frac{(k_2 T_m + k_3) R_d e_a}{T_0 (g_m (\gamma + 1) - \beta R_d)} \right) k_{\text{wet}} = \\ &= 10^{-6} (k_2 T_m + k_3) R_d e_a / \{ T_0 [97,84(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0028H)(\gamma + 1) - \beta R_d] \} k_{\text{wet}} = \\ &= \frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi - b_5}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $b_1 = 10^{-6} k_{\text{wet}} (k_2 T_m + k_3) R_d e_a$;

$$b_2 = T_0 \cdot 97,84(\gamma + 1);$$

$$b_3 = T_0 \cdot 97,84 \cdot 0,0026(\gamma + 1);$$

$$b_4 = T_0 \cdot 97,84 \cdot 0,0028(\gamma + 1);$$

$$b_5 = T_0 \cdot 97,84\beta R_d.$$

Целевой функционал оптимизации F_3 , аналогичный (12), имеет вид

$$F_3 = \int_0^{2\varphi_{\max}} \left[\frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi - b_5} \right] d\varphi. \quad (17)$$

Целевой функционал безусловной вариационной оптимизации F_4 имеет вид

$$F_4 = \int_0^{2\varphi_{\max}} \left[\frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi} \right] d\varphi - \lambda \int_0^{2\varphi_{\max}} [H(\varphi) d\varphi]. \quad (18)$$

Аналогично (14) решение рассматриваемой оптимизационной задачи минимизации функционала (18) должно удовлетворить условию

$$d \left\{ \frac{b_1}{b_2 - b_3 \cos 2\varphi - b_4 H\varphi} - \lambda H(\varphi) \right\} / dH(\varphi) = 0. \quad (19)$$

Решение оптимизационной задачи получено в виде

$$H(\varphi) = \frac{b_2}{b_4} - \frac{b_3 \cos 2\varphi}{b_4} - \sqrt{\frac{b_1}{b_4 \lambda_0}}, \quad (20)$$

где λ_0 — значение λ , вычисленное с учётом (10) и (19).

Также можно показать, что при решении (20) функционал цели (18) достигает минимума.

Анализ результатов исследований. Анализ показывает, что для обеспечения безопасности функционирования трубопроводов необходимо контролировать просадку грунта в зонах их прокладки. Для такого контроля в настоящее время широко используются интерферометрические радары с синтетической апертурой. Погрешность функционирования этих устройств связана с общей задержкой распространения радиосигнала, имеющей в частности такие компоненты, как гидростатическая задержка и влажная задержка. В результате проведённого исследования получены выражения для оптимальной взаимосвязи показателей H и φ в исследуемой зоне, при реализации которых обеспечивается минимальное значение соответствующей компоненты общей задержки.

С учётом выражений (15) и (20) можно заключить, что при выполнении условий

$$\frac{b_2}{b_4} = 1, \quad (21)$$

$$\frac{b_3}{b_4} = a_3, \quad (22)$$

$$\frac{b_1}{b_4} = \frac{a_1 a_4}{a_2} \quad (23)$$

может быть достигнута совместная минимизация компонентов ΔL_{hyd} и ΔL_{wet} .

В заключение сформулируем основные выводы проведённого исследования:

1. Контроль просадки грунта в зонах прокладки трубопроводов является необходимым мероприятием для обеспечения их безопасного функционирования.

2. Компоненты задержки радиоволны InSAR ΔL_{hyd} и ΔL_{wet} могут быть минимизирова-

ны при обеспечении определённой закономерности взаимосвязи между величинами H и φ .

3. Может быть обеспечена совместная минимизация компонентов ΔL_{hyd} и ΔL_{wet} при обеспечении определённой взаимосвязи показателей H и φ .

Библиографические ссылки

1. Galloway D.L., Bawden G.W., Leake S.A., Honegger D.G. Land subsidence hazards. Chap. 2. Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines // U.S. Geological Survey Open — File Report. 2008. Vol. 1164. P. 32—105.
2. Shen S.L., Xu Y.S. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai // Canadian Geotechnical J. 1 September 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1139/t11-049> (дата обращения: 01.09.2020).
3. Mahdavian A.A., Hassanshahia J. Quantifying geotechnical changes in the Rafsanjan plain in times series and finding out their causes using radar remote sensing techniques // EJGE. 2019. Vol. 24. Bundo 4.
4. Jiao S., Yu J., Wang Y., Zhu L., Zhou Q. Estimating the impact of urban expansion on land subsidence using time series of DMSP night-time satellite imagery. The Intern Archives of the Photogrammetry // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS TC III Mid-term Symposium Developments. Technologies and Application in Remote Sensing. 7—10 May. 2018. Beijing, China. Vol. XLII-3.
5. Xu Y.S., Shen S.L., Ren D.J., Wu H.N. Analysis of factors in land subsidence in Shanghai: A view based on a strategic environmental assessment // Sustainability. 2016. Vol. 573. No. 8.
6. Maasonet D., Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface // Reviews of Geophysic. 1998. Vol. 36(4). P. 441—500.
7. Ahmad W., Choi M., Kim S., Kim D. Detection of land subsidence and its relationship with land covers types using ESA Sentinel satellite data: a case study of Quetta Valley, Pakistan // Intern of Remote Sensing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1633704> (дата обращения: 01.09.2020).
8. Mehdiyev A.Sh., Eminov R.A., Ismayilov N.Y., Asadov H.H. Research of impact of geographical latitude and residual ionospheric noises on in formativeness of measuring of zenith wet delay GPS signals // Positioning. 2015. Vol. 6. P. 44—48.

Ссылка для цитирования

Эминов Р.А., Гусейнли Э.И., Рамазанов В.М. Повышение точности оценки просадки грунта для безопасного функционирования трубопроводов // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 108—111.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:

«Пресса России» — индекс 27838.

УДК 681.513

Ш.Р. Рагимов, канд. техн. наук, доц.
(Сумгаитский государственный университет, Азербайджанская Республика)
shafahat_61@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ПРИ СТРУКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Исследованы кинематические схемы активных элементов и приведена методика синтеза структур гибких производственных систем с помощью графического моделирования и выбора наилучшего варианта в результате компьютерных экспериментов на этапе предварительного проектирования. Представлена разработанная с использованием программного языка C# система для целенаправленного управления активными элементами в автоматическом и диалоговом режимах.

Ключевые слова: активный элемент; трёхмерное пространство; звено; структурное моделирование; шарнир; система управления; кинематическая схема.

The kinematic diagrams of active elements are investigated and the synthesis methodology of the flexible production systems structures by using graphic modeling and selection of the best option as a result of computer experiments at the stage of preliminary design is presented. The system for targeted control of active elements in automatic and interactive modes developed through the use of the C# programming language for targeted control of active elements in automatic and interactive modes is considered.

Keywords: active element; three-dimensional space; link; structural modeling; hinge; control system; kinematic diagram.

Введение. Исследование поведения активных элементов гибких производственных систем (ГПС) показало, что мы сталкиваемся с рядом трудно формализуемых задач [1]. Это связано с тем, что спроектированные ГПС, основанные на использовании опыта и интуиции конструкторов различных направлений, не совсем совпадают с реализованными в производственных условиях.

Кроме того, при выполнении любой технологической операции активные элементы ГПС имеют общие рабочие зоны и взаимодействуют для достижения поставленной цели [2].

Невозможность комплексного исследования всей системы приводит к обнаружению существенных неполадок лишь на этапе внедрения, и требуются дополнительные ресурсы времени для их устранения.

Перспективным решением проблемы является создание методики синтеза структур ГПС с помощью графического моделирования и выбора наилучшего варианта в результате компьютерных экспериментов на этапе предварительного проектирования. Преимущество такого подхода заключается в том, что он позволяет экспертам определить нормальное поведение активных элементов при общих рабочих зонах и в их взаимодействии,

исследовать как разрабатываемые, так и уже существующие ГПС.

Математическая модель активных элементов ГПС. Исследование функционирования механических узлов активных элементов ГПС показало, что математические модели механических функциональных узлов компонентов таких систем имеют одинаковые структуры и отличаются в каждом конкретном случае лишь значениями постоянных параметров. А кинематическая схема этих узлов, например механических рук манипуляционного робота в производстве испарителей, представляет собой разомкнутую кинематическую цепь [3, 4]. При этом в качестве обобщающего базового функционального механического узла (в частности в системах производства испарителей) выбирается механизм, имеющий следующие основные свойства [3, 5, 6]:

кинематическая схема механизма, образованная системой твёрдых тел, соединённых шарнирами, имеет структуру дерева и является разомкнутой кинематической цепью с разветвлениями;

соседние тела (звенья) являются кинематическими парами и связаны шарнирами с одной степенью свободы (либо поступательной, либо вращательной);

оси шарниров, связанные с одним звеном, либо параллельны, либо перпендикулярны друг другу.

На рис. 1 представлена кинематическая цепь со структурой дерева, которая принята в качестве кинематической схемы базового механического узла — руки манипуляционно-го робота для моделирования активных элементов системы производства испарителей.

Особенность кинематической цепи со структурой дерева заключается в том, что звенья можно пронумеровать начиная с основания таким образом, чтобы номер последующего звена дерева всегда был больше номера предшествующего звена, равного ji . Это даёт возможность представить порядок соединения звеньев механизма матрицей параметров размера $2 \times n$. В первой строке этой матрицы приводятся номера звеньев в порядке их возрастания ($\forall i > k, a_i > a_k$), обычно от единицы до n . Во второй строке матрицы приводятся номера звеньев, предшествующих звеньям первой строки.

Видно, что для описания конкретного механического узла в рамках базового механизма необходимо определить значения всех параметров, характеризующих базовый механизм.

Матрица, определяющая порядок соединения звеньев n -звенного механизма, представленного на рис. 1, в общем случае имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_i & \dots & a_n \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{ji} & \dots & a_{jn} \end{bmatrix},$$

где $1 \leq i \leq n; 1 \leq ji \leq n; a_i > a_{ji}; n$ — число звеньев; a_i — номера звеньев механического узла; a_{ji} — номера звеньев, предшествующих звеньям первой строки, с которыми они связаны.

С учётом ограничений, назначаемых для базового механического узла, определим остальные параметры для описания математической модели активных элементов системы и введём следующие правила, связанные с каждым из n звеньев механизма.

В трёхмерном пространстве начало координат системы O_i , определяющей порядок соединения двух соседних звеньев a_i и a_{ji} , выбираем так, чтобы оно совпало с центром масс

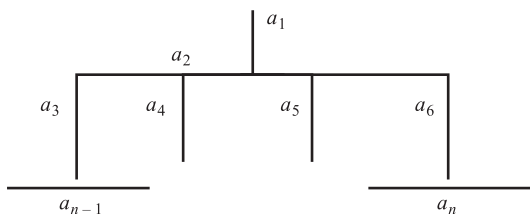


Рис. 1. Кинематическая цепь n -звенного механического узла

звена a_i . При этом ось i -го шарнира, связывающего звено a_i с предшествующим звеном a_{ji} , должна быть направлена так, чтобы она совпала с одной из трёх осей системы координат O_i [7]. Очевидно, что орты i -го шарнира, определённые в системе координат O_i , равны:

$$e_i = e_{ik} = e_{jk},$$

где k — ось координат звена $a_i, k = \{1; 2; 3\}; e_{ik}, e_{jk}$ — орты, совпадающие с k -ми осями систем координат O_i и O_{ji} , O_{ji} — система координат, определяющая порядок соединения звена a_{ji} с предшествующим, аналогично O_i .

На рис. 2 представлено соединение двух соседних звеньев a_i и a_{ji} .

Фрагменты ABC и ADE соответственно определяют звенья a_{ji} и a_i , которые соединены между собой шарниром q_i в точке A . Если опора шарнира A прикреплена к звену a_{ji} (рис. 3), то относительная координата точки A , обозначенная S_i , по системе координат O_{ji} , расположена на AD ($S_i \in AD$). Если же опора шарнира A прикреплена к звену a_i (рис. 4), то относительные координаты точки A , обозначенной S_i , в системе координат O_i расположены на AB ($S_i \in AB$).

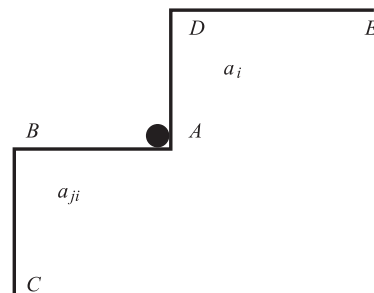


Рис. 2. Вид соединения двух соседних звеньев

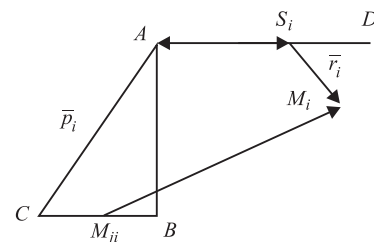


Рис. 3. Вид соединения с шарниром, прикреплённым к предыдущему звену

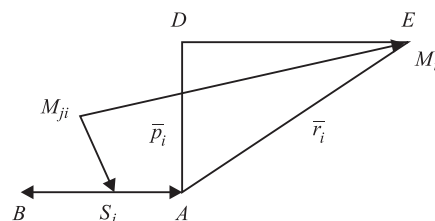


Рис. 4. Вид соединения с шарниром, прикреплённым к последующему звену

Понятно, что для описания типа шарнира используется n параметров q_i . При проектировании элементов системы для производства испарителей используются три типа связи с шарниром:

$$q_i = \begin{cases} 1, & \text{если используется} \\ & \text{шарнир с вращением;} \\ 0, & \text{если используется} \\ & \text{шарнир скольжения;} \\ -1, & \text{если используется} \\ & \text{шарнир основания.} \end{cases}$$

Обозначим через M_i координату центра масс звена a_i и через M_{ji} — координату центра масс предыдущего звена a_{ji} . Поскольку шарнир с обобщённой координатой g_i соединяет звено M_i со звеном M_{ji} , то вектор $M_{ji}M_i$, соединяющий точку M_{ji} с точкой M_i , определит положение центра масс звена a_i относительно центра масс звена a_{ji} .

Определим скаляр b_i :

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{если опора шарнира } A \\ & \text{прикреплена к предыдущему} \\ & \text{звену } a_{ji}; \\ 1, & \text{если опора шарнира } A \\ & \text{прикреплена к последующему} \\ & \text{звену } a_i. \end{cases}$$

Понятно, что $\overline{AS_i} = g_i \overline{e_i}$, $\overline{S_iA} = g_i \overline{e_{ji}}$.
Если $g_i = 0$, тогда $S_i = A$.
Значит

$$\overline{AS_i} = (1 - |q_i|)(1 - b_i) g_i \overline{e_i}$$

$$\text{или } \overline{S_iA} = (1 - |q_i|) b_i g_i \overline{e_{ji}}.$$

Определим вектор $\overline{p_i}$, представляющий положение центра шарнира A в системе координат a_{ji} -го звена (в системе координат O_{ji}):

$$\overline{p_i} = \overline{M_{ji}A}(1 - b_i) + \overline{M_{ji}S_i}b_i$$

и вектор $\overline{r_i}$, представляющий положение центра шарнира A в системе координат a_i -го звена (в системе координат O_i):

$$\overline{r_i} = \overline{S_iM_i}(1 - b_i) + \overline{AM_i}b_i,$$

где $\overline{S_iM_i}$ — вектор, соединяющий точку S_i с точкой M_i ; $\overline{AM_i}$ — вектор, соединяющий точку A с точкой M_i .

Тогда, используя рис. 3 и 4, получаем

$$\overline{M_{ji}M_i} = \overline{p_i} + \overline{AS_i}(1 - b_i) + \overline{S_iAb_i} + \overline{r_i},$$

где $\overline{AS_i}$ — вектор, соединяющий точку A с точкой S_i ; $\overline{S_iA}$ — вектор, соединяющий точку S_i с точкой A .

Учитывая, что $\overline{AS_i} = \overline{S_iA}$, получаем

$$\overline{M_{ji}M_i} = \overline{p_i} + \overline{r_i} + \overline{AS_i}(2b_i - 1),$$

где $\overline{M_{ji}M_i}$ — вектор положения центра масс a_i -го звена относительно центра масс a_{ji} -го звена; S_i — положение точки A с координатой g_i .

Таким образом, для описания конкретного механического узла, кинематическая схема которого входит в класс кинематических схем робота, необходимо определить значения следующих типов параметров: матрицу $B(2 \times n)$, определяющую порядок соединения звеньев механизма; q_i — скаляр, определяющий тип шарнира; $\overline{p_i}$, $\overline{r_i}$ — трёхмерные векторы, представляющие положения центров шарниров; g_i — обобщённые координаты механизма.

Определение эффективности функционирования активных элементов системы. Разработанная архитектура структурного моделирования ГПС на основе параметров — $B(2 \times n)$, q_i , $\overline{p_i}$, $\overline{r_i}$, g_i позволяет создать базу данных и базу знаний [8, 9] для проектирования и проведения имитационных экспериментов для активных элементов ГПС [10, 11].

Эффективность функционирования активных элементов E , зависящая от способа обработки данных, описывается формулой

$$E = \frac{F(n, p)}{t(k, n, p)},$$

где k — число операций, которые необходимо выполнить для обмена информацией с базой данных; n — число параллельных действий активных элементов; p — число последовательных действий активных элементов; $t(k, n, p)$ — время, затрачиваемое на реализацию обмена информацией между активными элементами при каждом принятии решения; $F(n, p)$ — время, расходуемое системой на управление активными элементами в количестве $n + p$.

Если в результате структурного моделирования определено, что

$$\forall (n, p), n + p = \text{const}, F(n, p) = t(k, n, p),$$

то проектирование прошло нормально.

Неравенство $F(n, p) < t(k, n, p)$ означает, что имеется возможность улучшения эффективности функционирования активных элементов. Коэффициент улучшения J определяется выражением:

$$J = \frac{t(k, n, p) - F(n, p)}{F(n, p)}.$$

Если $F(n, p) > t(k, n, p)$, то рекомендуется оптимизировать расположение активных элементов в ситуационном пространстве.

Обозначим через H множество активных элементов, используемых в проектируемой системе; через L множество M активных элементов, используемых в конкретной части системы,

$$H = \{ae_1; ae_2; \dots; ae_n\};$$

$$L = \{ae_{j_1}; ae_{j_2}; \dots; ae_{j_m}\}.$$

Будем считать, что эта часть системы находится в состоянии $L \subset H$, если $\forall k \leq M, \exists j \leq N, ae_{jk} = ae_i$, где ae_i — i -й активный элемент; ae_{jk} — k -й активный элемент, используемый в j -м участке.

Производительность участка системы, в котором имеются эти M активных элементов, определяется формулой

$$P_m = \sum_{i \in m} Q_i Z_i.$$

Здесь Z_i — показатель конкретного ae_i -го активного элемента; Q_i — коэффициент, определяемый условием

$$Q_i = \begin{cases} 1, & \text{если в участке только один} \\ & \text{активный элемент } ae_i; \\ < 1, & \text{если активный элемент } ae_i \\ & \text{взаимодействует с другими} \\ & \text{активными элементами.} \end{cases}$$

Большое значение имеет создание базы знаний. Процесс создания базы знаний для управления активными элементами ГПС разбивается на следующие этапы:

1. Эксперт-технолог, анализируя функционально-технологическую структуру ГПС, определяет все значимые параметры как $B(2 \times n)$, q_i , p_i , r_i , g_i и функциональные отношения между активными элементами.

2. Создаются правила целенаправленного управления активными элементами. Эффективным в таких случаях является следующий подход: формализовать функционирование ГПС с использованием продукционной системы на основе опыта и знаний эксперта в каждом конкретном применении. Фрагмент базы знаний приведён на рис. 5. В диалоговом режиме вводятся продукции, представленные в виде $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ [8], для функционирования конкретной ГПС и создаётся структура базы знаний для проведения имитационных экспериментов для активных элементов ГПС (рис. 6). Здесь X_1, X_2, \dots, X_n — послылки, а P — правила.

В качестве правил может выступать одна или несколько посылок, соединённых символами «&» (& — логическая операция «и»). Например, цель «движение вперёд рук робота» выглядит следующим образом:

$$X_2 \& X_3 \& X_5 \& X_8.$$

```
private void ПРОДУКЦИЙЛАРИ_ОУР(DataGridView Cadvalin_ADI)
{
    // =====СОЗДАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ=====
    int prds_sayi = Cadvalin_ADI.RowCount - 1; // Продукции
    int oturucu_sayi = Cadvalin_ADI.ColumnCount - 1; // Датчики

    sec_produksiyalari.Items.Clear();

    string Prds_yz1 = "";
    string brlsv_smv = "";

    for (int i = 1; i < prds_sayi; i++)
    {
        brlsv_smv = "";
        Prds_yz1 = "P_" + i.ToString() + " ==> ";
        int j = 0;
        for (int k = 1; k <= oturucu_sayi; k++)
        {
            string otrc_qymt="";
            if (
                (Cadvalin_ADI[k, i].Value == null)
                ||
                ((otrc_qymt = Cadvalin_ADI[k, i].Value.ToString().Trim()) == "")
            ) continue;

            if (j > 0) brlsv_smv = " & ";
            if (otrc_qymt == "1") Prds_yz1 += brlsv_smv + "(" + k.ToString() + ")";
            if (otrc_qymt == "0") Prds_yz1 += brlsv_smv + "(~" + k.ToString() + ")";
            j++;
        }

        if (j == 0) Prds_yz1 += "( Не определено! )";
        sec_produksiyalari.Items.Add(Prds_yz1);
        bzdnx(Prds_yz1);
    }
    rang_va_srift();
}
```

Рис. 5. Фрагмент базы знаний

The screenshot shows a software interface for knowledge base management. It consists of three main parts:

- ПРОДУКЦИИ (Products):** A table with columns X1 through X10 and rows P1 through P4. The cells contain binary values (0 or 1).
- ROBOT_№_3:** A list of five rules (P_№1 to P_№5) with logical expressions involving variables X1 through X8. For example, P_№1 is $(X1) \& (\sim X3) \& (\sim X5) \& (X6) \& (X7)$.
- Truth Table:** A table with columns P/X and X1 through X8, and rows P1 through P5. The cells contain binary values (0 or 1).

Рис. 6. Структура продукционной системы, используемая при проведении имитационных экспериментов для активных элементов

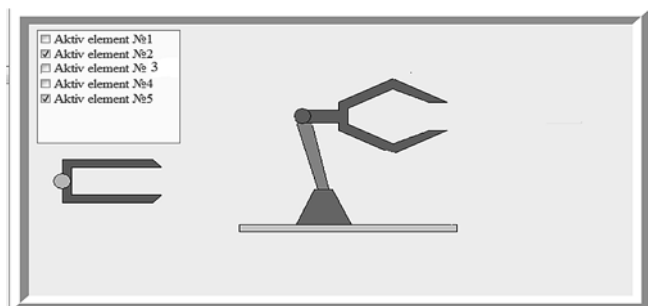


Рис. 7. Фрагмент имитационно-графического представления активных элементов

3. Программист выбирает символные обозначения характеристики и функционально-технологических параметров активных элементов и программно-модульных отношений между ними. В результате формируется имитационно-графическое представление активных элементов (рис. 7). К этим данным происходит постоянное обращение в ходе функционирования системы, что позволяет непрерывно следить за перемещениями активных элементов.

Заключение. Опыт эксплуатации гибких производственных систем показал, что множество неполадок и допущений при создании системы управления, при идентификации текущих ситуаций, обработке информации и выработке управляющих воздействий легко обнаруживается при визуальном наблюдении функционирования систем. С помощью математических моделей активных элементов разработана система структурного моделирования ГПС, которая позволяет контролировать возможные аварийные ситуации активных элементов в процессе их функционирования.

Для автоматизации процесса формирования модели конкретного механического узла разработан алгоритм и написана программа на языке C#. С её помощью в режиме диалога в компьютер вводятся значения всех параметров базового механизма и формируется структура данных, соответствующая модельным уравнениям механизма.

Библиографические ссылки

1. Сольнищев Р.И., Кононюк А.Е., Кулаков Ф.М. Автоматизация проектирования ГПС / под ред. Р.И. Сольнищева. Л.: Машиностроение, 1990. 414 с.
2. Рагимов Ш.Р. Разработка структуры программного обеспечения для определения эффективности функционирования активных элементов гибких производственных систем // Тр. II Республиканской науч. конф. «Современные проблемы информации, кибер-

нетики и информационных технологий». Баку, 26—28 октября 2004 г. Т. I. С. 80—82.

3. Рагимов Ш.Р. Структурное моделирование активных элементов гибких производственных систем и определение эффективности их функционирования // Автоматика и вычислительная техника. Рига. 2000. № 5. С. 65—70.

4. Ахмедов М.А., Гусейнов А.Г., Рагимов Ш.Р. Разработка системы управления активных элементов в гибких автоматизированных участках (ГАУ) выпрямления, резки и укладки на отжиг в производстве испарителей // Ученые записки. Т. IX. № 1. Баку: АзТУ, 2000. С. 49—52.

5. Рагимов Ш.Р., Абдуллаев Г.С. Алгоритм функционирования автоматизированной системы для маркировки труб в гибком автоматизированном производстве // Автоматизация и современные технологии. 1999. № 9. С. 15—17.

6. Гейдаров Х.М., Гусейнов А.Г., Рагимов Ш.Р. Структурное моделирование ГПС и его реализации в различных режимах работы / Интеллектуальные системы управления и принятия решений. Тематический сб. науч. трудов. Баку: АГНА, 1999. С. 25—32.

7. Рагимов Ш.Р., Исмаилов Н.С. Графическое моделирование траектории активных элементов ГПС в трехмерном пространстве // Изв. национальной Академии наук Азербайджана. Сер.: Физико-технические и математические науки. 2004. Т. XXIV. № 2. С. 142—145.

8. Рагимов Ш.Р., Гусейнов А.Г. Структурное моделирование базы данных и базы знаний активных элементов гибких производственных систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. № 7. С. 15—23.

9. Гусейнов А.Г. Разработка методологической основы структурного моделирования ГПС с использованием базы знаний // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 2(154). С. 63—68.

10. Рагимов Ш.Р. Разработка программного обеспечения системы структурного моделирования гибких производственных систем для проведения компьютерного эксперимента // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 9. С. 13—16.

11. Рагимов Ш.Р. Планирование целенаправленного поведения активных элементов гибких производственных систем при машинном эксперименте // Автоматизация и современные технологии. 1999. № 8. С. 37—40.

Ссылка для цитирования

Рагимов Ш.Р. Определение и программирование эффективности функционирования активных элементов гибких производственных систем при структурном моделировании // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 112—116.

УДК 628.9:614.7

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-3-117-120

С.А. Микаева, д-р техн. наук, А.С. Микаева, канд. экон. наук, А.А. Дюкин
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

ОТКАЧНОЙ ПОСТ И СТАНОК ЗАШТАМПОВКИ

Описаны пятиламповый откачной пост и станок полуавтоматической заштамповки для производства бактерицидных ультрафиолетовых ламп. Исследования показали, что внедрение данного оборудования позволяет повысить эффективность производства бактерицидных ультрафиолетовых ламп, которые обеспечивают выполнение санитарно-эпидемиологических требований по воде и воздуху в помещениях, многократно уменьшая концентрацию микроорганизмов в воздушной среде. Это обуславливает актуальность данной тематики, особенно в условиях пандемии коронавируса COVID-2019.

Ключевые слова: сборка; откачной пост; электрод; наполнение; амальгама; отпайка; заштамповка; станок.

A five-lamp exhaust unit and a semi-automatic stamping machine for the production of germicidal ultraviolet lamps are described. Studies have shown that the introduction of this equipment makes it possible to increase the efficiency of the production of bactericidal ultraviolet lamps. These lamps ensure the fulfillment of sanitary and epidemiological requirements for water and air in rooms, multiple reducing the concentration of microorganisms in the air environment. It leads to the relevance of this topic, especially in the context of the COVID-2019 coronavirus pandemic.

Keywords: assembly; exhaust unit; electrode; filling; amalgam; tapping; stamping, machine.

Технология ультрафиолетового (УФ) обеззараживания, воды, воздуха и твёрдой поверхности основана на бактерицидном действии УФ-излучения. УФ-излучение — электромагнитное излучение, занимающее диапазон длин волн между рентгеновским и видимым излучением (от 100 до 400 нм). Различают несколько участков спектра УФ-излучения, имеющих разное биологическое воздействие: УФ-А — 315...400 нм; УФ-В — 280...315 нм; УФ-С — 200...280 нм; вакуумный УФ — 100...200 нм. Диапазон УФ-С часто называют бактерицидным из-за его высокой обеззараживающей эффективности по отношению к бактериям и вирусам. Наибольшим антибактерицидным эффектом обладает излучение в интервале длин волн от 205 до 280 нм, а максимум бактерицидной чувствительности микроорганизмов приходится на длину волны 265 нм [1—4]. Поэтому производство оборудования и установок для изготовления источников света на основе УФ-излучения выходит на новый уровень [5, 6]. В число основных установок для изготовления ультрафиолетовых источников света входят откачной пост и станок заштамповки.

Откачной пост предназначен для одновременной обработки пяти изделий — будущих бактерицидных УФ-ламп и осуществляет обезгаживание изделий, оксидировку электродов, наполнение изделий газовой смесью до рабочего давления, загрузку амальгамы и отпайку.

Основные технические характеристики откачного поста

Габаритные размеры, мм:	
длина	4000
ширина	3000
высота	2000
Масса, кг	400
Потребляемая электрическая мощность, кВт	4,5
Давление природного газа, МПа	0,2
Расход природного газа, м ³ /ч	0,336
Давление кислорода, МПа	0,2
Расход кислорода, м ³ /ч	1,09
Подача воды, природного газа и кислорода	От общей сети
Давление газовой смеси Ne—Ar, МПа	0,3
Подача газовой смеси Ne—Ar	Баллон
Давление воды, МПа	0,4

Комплектация и принципиальная схема пятилампового откачного поста приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Описание откачного поста для производства источников УФ-излучения. На станину установлены держатели изделий и направляющая для перемещения газовых горелок для обезгаживания изделия. На этапе обезгаживания применяется автотрансформатор. Для проверки изделия на отсутствие натекания используется искровой течеискатель. Для последовательной подачи газовой смеси пропан—бутан и кислорода при поджиге газовой горелки, применяемой для обезгаживания изделия, используется контроллер поджига. Для подачи охлаждающей жидкости в газовую го-

Таблица 1

Комплектация пятилампового откачного поста

Наименование	Число
Форвакуумный мембранный насос Pfeiffer MVP 055-3	1
Насосная станция Pfeiffer TSH 521	1
Клапан форвакуумного насоса	1
Клапан высоковакуумного насоса	1
Вакуумный трубопровод	1
Натекатель Inficon VHD 016-X	2
Вакуумметр Pfeiffer TPG 261	1
Вакуумметр ВМБ-14	2
Вакуумметрический датчик Pfeiffer CMR 262	1
Вакуумметрический датчик ПММ-32-1	2
Вилка кварцевая	1
Станина	1
Компьютер	1
Автотрансформатор АОСН-20-220-75 УХЛ4	1
Шкаф с электронной пускорегулирующей аппаратурой (ЭПРА)	1
Блок управления обработкой изделия	1
Программируемый блок питания	1
Цифровой индикатор	4
Искровой течеискатель	1
Газовая горелка для напайки изделия	1
Газовая горелка для обезгаживания изделия	2
Баллон с газовой смесью Ne—Ar	2
Газовый редуктор	2
Вентиль системы охлаждения газовой горелки для обезгаживания изделия	1
Контроллер поджига газовой горелки для обезгаживания изделия	1

релку, используемую для обезгаживания изделия, служит вентиль системы охлаждения. Подача смеси пропан—бутан и кислорода осуществляется с помощью газовых редукторов.

На фронтальной стороне станины крепятся панель управления режимами обработки изделия и панель управления вакуумной системой. Внутри станины размещается форвакуумный насос. Рядом со станиной находится насосная станция, состоящая из форвакуумного насоса и высоковакуумного турбомолекулярного насоса, применяемых для создания требуемого давления в процессе обработки изделия.

На отдельной стойке, расположенной рядом со станиной, установлены вакуумметры, показывающие давление на различных этапах обработки изделия. Для контроля электрических параметров в процессе обработки изделия применяются цифровые индикаторы и программируемые блоки питания, используемые на этапе обработки электродов. Управление программируемыми блоками питания осуществляет компьютер.

Шкаф с ЭПРА, используемой для зажигания изделия на финишном этапе обработки [7, 8], расположен отдельно.

В состав вакуумной системы входят также вакуумные трубопроводы и клапаны. К вакуумной системе присоединена кварцевая вилка, служащая для соединения (напайки) изделия с вакуумной системой. В кварцевой вилке выполнен шлиф для загрузки порции амальгамы. На станине крепится держатель, используемый для размещения газовых горелок для напайки изделия. С вакуумной системой соединена система газонапуска, состоящая из трубопровода, соединяющего баллон, содержащий газовую смесь Ne—Ar, с кварцевой вилкой, и натекателя, служащего для напуска газа в изделие.

К установке пятилампового откачного поста необходимо подключить производственную (цеховую) вентиляцию.

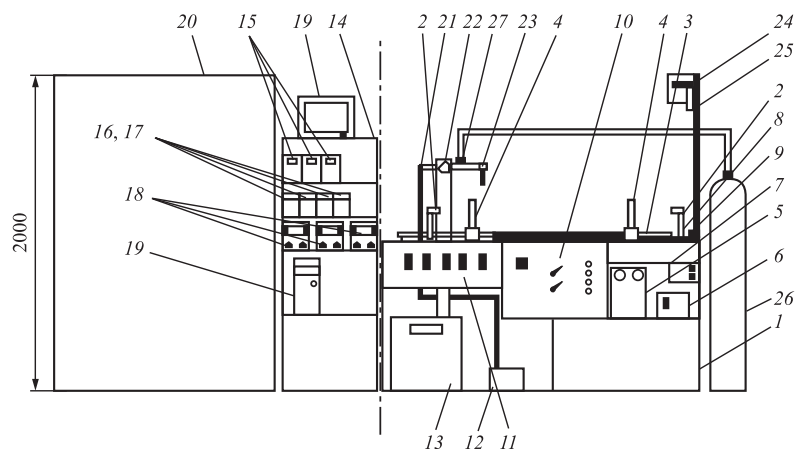


Рис. 1. Принципиальная схема пятилампового откачного поста:

1 — станина; 2 — держатель изделий; 3 — направляющая; 4 — обезгаживатель изделий; 5 — автотрансформатор; 6 — искровой течеискатель; 7 — контроллер поджига газовой горелки; 8 — вентиль системы охлаждения; 9 — газовые редукторы; 10 — панель управления; 11 — панель управления вакуумной системой; 12 — форвакуумный насос; 13 — насосная станция; 14 — отдельная стойка; 15 — вакуумметры; 16 — цифровые индикаторы напряжения; 17 — цифровые индикаторы тока; 18 — программируемые блоки питания; 19 — компьютер; 20 — ЭПРА; 21 — вакуумные трубопроводы; 22 — вакуумные клапаны; 23 — кварцевая вилка; 24 — держатель; 25 — газовые горелки; 26 — баллон; 27 — натекатель

К работе на установке допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие курс обучения откачника-вакуумщика и имеющие допуск к работе с газами. Лица, работающие на установке, должны применять светозащитные очки и хлопчатобумажные перчатки. При обнаружении утечки газа необходимо немедленно прекратить работу.

Работа на откачном посту осуществляется в следующей последовательности:

- включение вакуумных насосов;
- напайка изделий с помощью газовой горелки для напайки;
- откачка изделий до давления не выше 10^{-4} Па;
- обезгаживание изделий с помощью газовой горелки для обезгаживания;
- обработка электродов с помощью программируемых блоков питания, управляемых компьютером по программе, соответствующей типу изготавливаемого изделия;
- обезгаживание электродов с использованием автотрансформатора;
- зажигание изделий с помощью ЭПРА;
- наполнение изделий газовой смесью с помощью натекателя до давления, соответствующего типу выпускаемого изделия;
- загрузка амальгамы посредством вращения шлифа кварцевой вилки;
- отпайка изделий с помощью газовой горелки для напайки.

Станок полуавтоматической заштамповки предназначен для заштамповки электродных узлов в кварцевые колбы бактерицидных УФ-ламп.

Основные технические характеристики станка полуавтоматической заштамповки

Габаритные размеры, мм:	
длина	1500
ширина	900
высота	1900
Масса, кг	150
Потребляемая электрическая мощность, кВт	0,5
Давление природного газа, МПа	0,2
Расход природного газа, м ³ /ч	0,266
Давление кислорода, МПа	0,2
Расход кислорода, м ³ /ч	0,51
Давление азота, МПа	0,2
Расход азота, м ³ /ч	1,8
Подача природного газа, азота и кислорода	От общей сети
Давление воды, МПа	0,4
Подача воды	От общей сети

Комплектация станка полуавтоматической заштамповки приведена в табл. 2.

Описание станка полуавтоматической заштамповки (рис. 2). Корпус станка полуавтоматической заштамповки устанавливается на стол. На корпус станка крепятся контроллер,

Таблица 2

Комплектация станка полуавтоматической заштамповки

Наименование	Число
Стол	1
Корпус с блоком управления и регулирования	1
Контроллер	1
Горелка	1
Расколodka	2

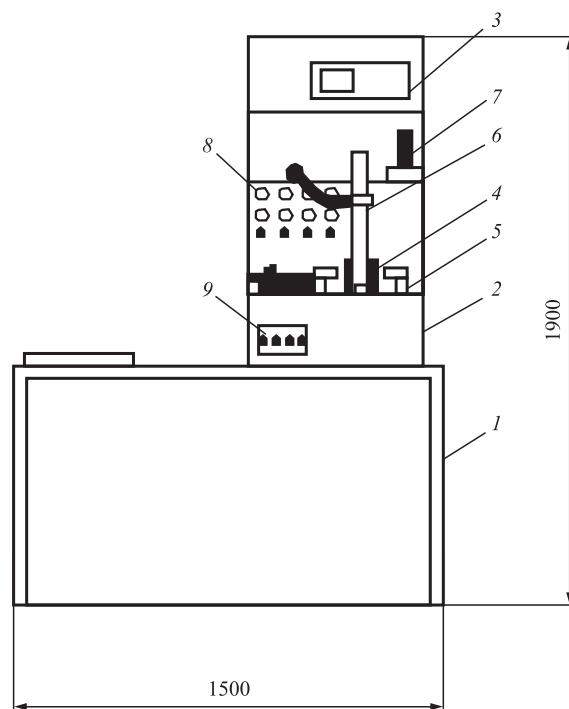


Рис. 2. Принципиальная схема станка полуавтоматической заштамповки:

1 — стол; 2 — корпус станка; 3 — контроллер; 4 — горелка; 5 — расколodka; 6 — держатель изделия; 7 — манометр; 8 — приборы контроля; 9 — пульт управления

служащий для программирования режимов заштамповки, горелка, применяемая для нагрева изделия; расколodka, служащие для сдавливания разогретого изделия в процессе заштамповки. Держатель изделия и манометр, показывающий давление азота, крепятся на лицевой панели корпуса. На лицевой панели корпуса станка также расположены приборы контроля и регулирования подачи кислорода и пропан-бутановой смеси, там же находится пульт управления процессом заштамповки.

Работа на станке полуавтоматической заштамповки осуществляется в следующей последовательности:

- включение станка;
- открытие газовых вентилях на корпусе станка. Показания манометров должны со-

ответствовать технологическим режимам заштамповки;

- открытие вентиля подачи воды;
- установка электрода;
- установка изделия в держатель;
- установка в изделие трубки подачи азота;
- нажатие на кнопку подачи азота на пульте управления;

отжатие кнопки подачи азота и нажатие на кнопку «START» на пульте управления. Затем проведение процесса заштамповки.

На рис. 3 и 4 представлены фото пятилампового откачного поста и станка полуавтоматической заштамповки для производства бактерицидных УФ-ламп, собранных в Научно-производственном объединении «Лаборатория импульсной техники» (НПО «ЛИТ»), г. Москва.

Данное оборудование обеспечивает высокую эффективность производства бактерицид-

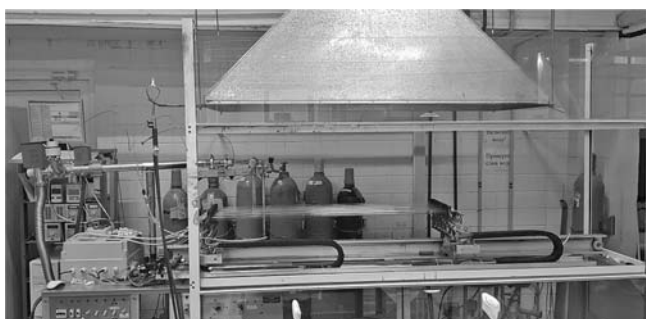


Рис. 3. Пятиламповый откачной пост для производства источников УФ-излучения



Рис. 4. Станок полуавтоматической заштамповки ламп

ных ламп. При проектировании и изготовлении электротехнического оборудования в НПО «ЛИТ» используются комплектующие ведущих мировых производителей. Применение высококачественных материалов на предприятии позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации оборудования. Новейшие технические решения в сочетании с продуманным дизайном позволяют успешно интегрировать данное оборудование в системы комплексного автоматизированного управления.

Исследования показали, что внедрение рассмотренного оборудования обеспечивает выполнение санитарно-эпидемиологических норм по воде и воздуху в помещениях, многократно уменьшая концентрацию микроорганизмов в воздушной среде. Это позволяет, прежде всего, существенно снизить заболеваемость людей, находящихся в помещениях, что актуально в условиях пандемии коронавируса COVID-2019, а также повысить качество выпускаемых ламп и их комплектующих, сократить количество химических препаратов, применяемых при традиционных способах дезинфекции помещений.

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. С. 150.
2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.
4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы. М.: Русайнс, 2020. С. 172.
5. **Ашрятов А.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Прибор для контроля сборки компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 23—26.
6. **Железникова О.Е., Амеликина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.
7. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. С. 228.
8. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. С. 250.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Откачной пост и станок заштамповки // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 117—120. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-3-117-120.

УДК 620.179.142

И.Ф. Янгиров, д-р техн. наук, **А.Р. Халиков**, канд. физ.-мат. наук
(Уфимский государственный авиационный технический университет),

Р.А. Сафиуллин, канд. физ.-мат. наук
(Башкирский государственный университет)

yangirov@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МУФТЫ

Рассмотрена математическая модель магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитной муфты в трёхмерном пространстве, которая позволяет рассчитывать тяговое усилие муфты и решать оптимизационные задачи по определению её геометрических размеров.

Ключевые слова: воздушный зазор; муфта; напряжённость.

A mathematical model of the magnetic field in the air gap of an electromagnetic clutch in three-dimensional space, which allows calculating the traction effort of the clutch and solving optimization problems to determine its geometric dimensions is considered.

Keywords: air gap; coupling; tension.

Введение. В современных условиях к точности расчёта параметров и характеристик электрических машин в электромашиностроении предъявляются высокие требования. Воздушный зазор может возникнуть в технологическом процессе электромашиностроения как негативный дефект, например, при сборке пакетов магнитопроводов дросселей, трансформаторов, а также как позитивный — при эксплуатации электрических машин, электромагнитных реле и т. д.

На современном этапе создания высокооборотных генераторов, электродвигателей и подшипников величина воздушного зазора оказывает существенное влияние при их проектировании [1].

Как показано в работе [2], эксплуатация вращающихся электрических машин неизбежно сопровождается вибрациями механического, аэродинамического и магнитного происхождения. Их причиной являются переменные магнитные силы, распространяющиеся в воздушном зазоре и влияющие на энергетические характеристики машин. Поэтому исследование распределения магнитного поля в данной зоне является актуальной задачей.

Как известно, электромагнитные муфты устраняют скачкообразное изменение вращающего момента в процессе разгона якоря машины и обеспечивают плавный интенсивный разгон, что открывает широкие возможности для их внедрения в электропривод лебёдки синхронных и асинхронных двигателей

с короткозамкнутым ротором. Относительная простота конструкции этих двигателей (особенно синхронных), их повышенная надёжность и энергетические показатели приводят к заметному увеличению технико-экономических показателей электропривода лебёдок. Электропривод лебёдки с электромагнитными муфтами позволяет значительно повысить надёжность электрооборудования, улучшить условия его эксплуатации, максимально использовать установленную мощность приводных двигателей и, соответственно, увеличить производительность, уменьшить износ механического оборудования, а также уменьшить силу тока и, следовательно, потерю напряжения в питающих линиях. Последнее особенно важно для мощных приводов лебёдки в установках тяжёлого типа в машиностроении. Например, в приводе буровых установок электромагнитные муфты применяются для оперативного соединения проводного вала лебёдки с двигателем, соединения двигателей с групповой трансмиссией, в качестве пусковой муфты в приводе лебёдки от постоянно вращающихся двигателей (синхронных или асинхронных с короткозамкнутым ротором) и т. д. [3].

Кроме того, электромагнитные муфты позволяют в наибольшей степени осуществить унификацию буровых установок с дизельным и электрическим приводом, относительно просто решить вопросы автоматизации управления приводом лебёдки с возможностью форсирования переходных процессов, что обеспе-

чивает повышение производительности подъёмных операций [4, 5].

Привод лебёдки пускают включением электромагнитной муфты путём подачи тока в обмотку возбуждения. При этом система управления может быть выполнена автоматической или полуавтоматической с возможностью оперативного вмешательства оператора. Формирование необходимых динамических характеристик в системе может быть получено регулированием тока возбуждения [6].

Привод с электромагнитными муфтами обеспечивает непрерывный переход от натяжки талевого системы к подъёму инструмента, остановку колонны бурильных труб на заданной высоте, полную загрузку приводных двигателей и равномерное распределение нагрузки между ними.

В настоящее время во всех областях жизнедеятельности людей или отраслях промышленности активно используется электрическая энергия, производство и преобразование которой практически полностью обеспечивается различными электрическими машинами [1].

Среди многообразия существующих классических электрических конструкций особое место занимают специальные электрические машины, которые нашли широкое применение в системах автоматики, телемеханике, вычислительной технике, вибрационной технике, приборостроении и т. д. К ним наряду с общими требованиями к классическим электрическим машинам предъявляются и специфические требования. Они требуют и особого подхода при их теоретическом и практическом исследованиях, а также при их разработке и проектировании.

Математическая модель. В данной работе аналитически исследуется распределение магнитного поля в воздушном зазоре электромеханического преобразователя со спиральным вторичным элементом при следующих допущениях [3]:

магнитная проницаемость стали равна бесконечности;

первичное магнитное поле задано только основной гармоникой;

электрическое поле рассеяния вне воздушного зазора отсутствует.

Принятые допущения могут дать некоторое искажение реальной картины электромагнитных явлений и вносить погрешности в результаты расчётов электромеханических

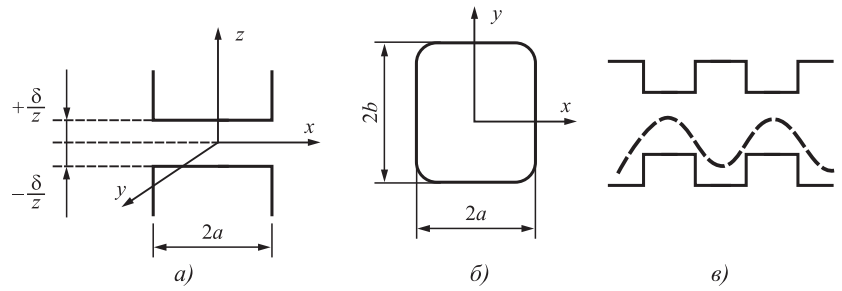


Рис. 1. Система координат для расчёта магнитного поля в воздушном зазоре зубчатого якоря электродвигателя:

a — система координат для исследования магнитного поля в зазоре; *b* — геометрические размеры воздушного зазора; *c* — распределение основной гармоники магнитного поля в зазоре

параметров. Влияние этих допущений может быть существенно ослаблено введением пояснительных поправочных коэффициентов.

На рис. 1 представлена расчётная схема электромеханического преобразователя энергии.

Распределение напряжённости магнитного поля в воздушном зазоре может быть представлено в виде [1, 4]

$$\begin{cases} H_x = H_{xm} e^{-j\alpha_1 x}; \\ H_y = H_{ym} e^{-j\alpha_2 y}; \\ H_z = H_{zm} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} = \\ = H_{xm} H_{ym} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha_1 = \pi/2a$; $\alpha_2 = \pi/2b$; *a* и *b* — длина и ширина воздушного зазора.

Так как в воздушном зазоре отсутствуют сторонние токи, то магнитное поле в данной зоне описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta \vec{H} = 0 \text{ или } \begin{cases} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решения исходных уравнений (2) с учётом формул (1) находим в виде [3, 4]

$$\begin{aligned} H_{xm} &= C_1 ch(\alpha_1 z) + C_2 ch(\alpha_2 z); \\ H_{ym} &= C_3 ch(\alpha_2 z) + C_4 ch(\alpha_1 z); \\ H_{zm} &= C_3 ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z + C_2 sh\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \frac{\pi}{2a}$; $\alpha_2 = \frac{\pi}{2b}$.

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий:

$$\begin{aligned} H_z \Big|_{z=\delta/2} = H_z \Big|_{z=-\delta/2} = H_{z0} = \frac{B_{z0}}{\mu_0}; \\ H_x \Big|_{z=\delta/2} = H_x \Big|_{z=-\delta/2} = 0; \\ H_x \Big|_{z=\delta/2} = H_x \Big|_{z=-\delta/2} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

так как $\mu_{ст} = \infty$.

Уравнения для определения постоянных интегрирования примут следующий вид:

$$\begin{cases} C_1 sh_1 \delta / 2 + C_2 ch \alpha_1 \delta / 0; \\ -C_1 sh_1 \delta / 2 + C_2 ch \alpha_1 \delta / 0; \\ C_3 sh_2 \delta / 2 + C_4 ch \varepsilon_2 \delta / 0; \\ -C_3 sh_2 \delta / 2 + C_4 ch \varepsilon_2 \delta / 0; \\ C_5 sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2 + C_2 ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2 = H_{z0}; \\ -C_5 sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2 + C_2 ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2 = H_{z0}. \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений (5) видно, что постоянные константы $C_1 = C_2 = 0$, поэтому можно записать

$$\begin{cases} H_{xm} = C_2 sh \alpha_1 z; \\ H_{ym} = C_4 sh \alpha_2 z; \end{cases}$$

$$C_6 = \frac{H_{z0}}{1} \frac{1}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2};$$

$$C_5 = \frac{H_{z0}}{sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} - C_6 \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2}{sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} = 0.$$

Тогда окончательно составляющая магнитного поля будет иметь вид

$$H_{zm} = \frac{H_{z0}}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z; \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x}{\partial x} = -j \alpha_1 C_2 ch \alpha_1 z e^{-j \alpha_1 x}; \\ \frac{\partial H_y}{\partial y} = -j \alpha_2 C_4 ch \alpha_2 z e^{-j \alpha_2 x}; \\ \frac{\partial H_z}{\partial z} = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \frac{H_{z0}}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} \times \\ \times sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}. \end{cases} \quad (7)$$

Решим полученную систему относительно постоянных интегрирования C_2 и C_4 :

$$\begin{aligned} j \alpha_1 C_2 ch \alpha_1 z e^{-j \alpha_1 x} + j \alpha_2 C_4 ch \alpha_2 z e^{-j \alpha_2 y} = \\ = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \frac{H_{z0}}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \times \\ \times sh \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}. \end{aligned}$$

С учётом того, что $H_x = H_y = H_z$, т. е. изотропии H , получим

$$\left. \begin{aligned} C_2 C_4 ch \alpha_1 z ch \alpha_2 z e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} = \\ = \frac{H_{z0}}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z \\ C_2 C_4 = \frac{H_{z0}}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch_1 z ch_2 z} \\ H_z = H_x H_y. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Поверхностные токи в магнитной системе и в воздушном зазоре отсутствуют, что позволяет утверждать справедливость соотношения $rot \vec{H} = \vec{\delta} = 0$, тогда

$$\begin{cases} \delta_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = 0; \\ \delta_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

для $z = -\delta/2$.

Решение исходной системы относительно поверхностных токов имеет вид

$$\begin{cases} \delta_x = -j \alpha_2 H_{z0} \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} - \\ - \alpha_2 C_3 ch \alpha_2 \delta / 2 e^{-j \alpha_2 y} = 0; \\ \delta_y = \alpha_1 C_2 ch \alpha_1 \delta / 2 e^{-j \alpha_1 x} + \\ + j \alpha_1 H_{z0} \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Отсюда определяем соответствующие постоянные интегрирования:

$$\begin{aligned} C_2 = -j_1 H_{z0} \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{1}{ch \alpha_1 \delta / 2} e^{-j \alpha_2 y}; \\ C_2 = j H_{z0} \frac{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{1}{ch \alpha_1 \delta / 2} e^{-j \alpha_1 x}. \end{aligned} \quad (11)$$

После упрощений максимальные значения напряженности магнитного поля в воздушном зазоре исследуемого электромеха-

нического преобразователя определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 H_{xm} &= -j \frac{\alpha_2}{\alpha_1} H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 y} = \\
 &= -j \frac{\alpha_2}{\alpha_1} H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 y}; \\
 H_{ym} &= j H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 x} = \\
 &= j H_{z0} \frac{ch\alpha_2 z}{ch\alpha_2 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 x}; \\
 H_{zm} &= H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Распределение магнитного поля в воздушном зазоре электромеханического преобразователя определяется из следующих аналитических соотношений:

$$\begin{aligned}
 H_x &= -j \frac{\alpha_2}{\alpha_1} H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}; \\
 H_y &= j H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}; \quad (13) \\
 H_z &= H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2}.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим частные случаи решения поставленной задачи при определённых условиях параметров системы.

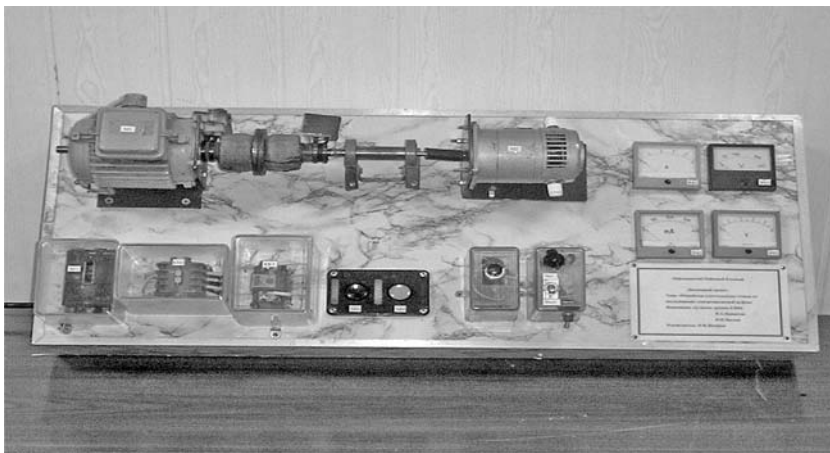


Рис. 2. Стенд по исследованию генератора постоянного тока и электромагнитной муфты

1. Электромеханический преобразователь имеет удлиненную форму, т. е. $\alpha_2 = \pi/2b = p/\infty = 0$. Тогда

$$\begin{cases} H_x = -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_1 y}; \\ H_x = j H_{z0} e^{-j\alpha_1 y}; \\ H_z = j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_1 y} \end{cases} \quad (14)$$

или

$$\begin{cases} H_x = -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_1 y}; \\ H_x = -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_1 y}. \end{cases}$$

2. Воздушный зазор имеет бесконечно большие размеры по длине и ширине: $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/2a = \pi/2b = 0$. Тогда имеем одномерную плоскопараллельную задачу

$$\begin{cases} H_{xm} = 0; \\ H_{ym} = 0; \\ H_{zm} = H_{z0} \frac{ch\sqrt{2}\alpha z}{ch\sqrt{\alpha}\delta/2}. \end{cases} \quad (15)$$

Данные размеры получены в частном виде из следующих упрощённых уравнений для магнитного поля в воздушном зазоре:

$$\begin{aligned}
 H_{xm} &= -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 y}; \\
 H_{ym} &= j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j\alpha_2 y}; \\
 \begin{cases} H_x = -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}; \\ H_y = -j H_{z0} \frac{ch\alpha_1 z}{ch\alpha_1 \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}; \\ H_z = H_{z0} \frac{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} z}{ch\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \delta / 2} e^{-j(\alpha_1 x + \alpha_2 y)}. \end{cases} \quad (16)
 \end{aligned}$$

Для исследования переходных процессов в работе электродвигателя с электрической муфтой была сконструирована экспериментальная установка, представленная на рис. 2.

Проведя экспериментальные исследования, получены следующие

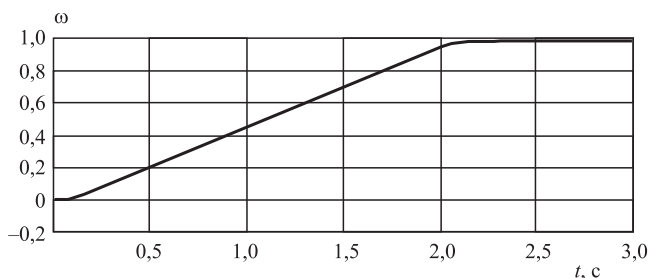


Рис. 3. Динамика вращения ротора на начальном этапе

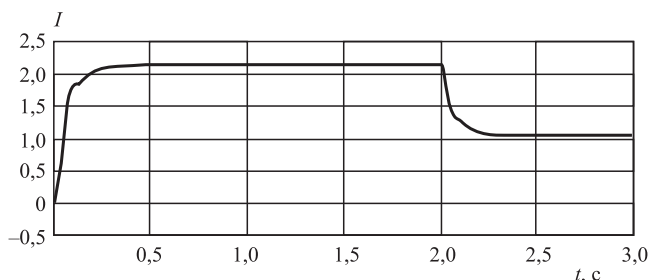


Рис. 4. Динамика силы тока во времени

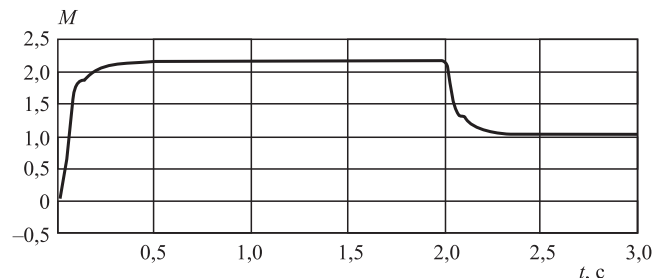


Рис. 5. Динамика электромагнитного момента во времени

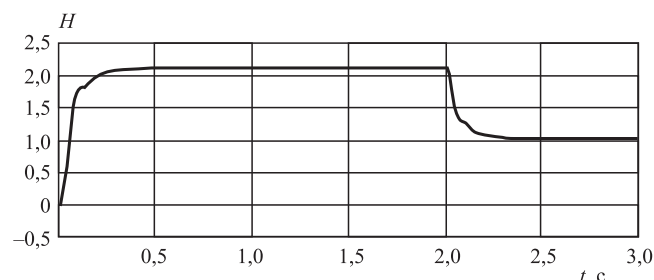


Рис. 6. Динамика напряжённости магнитного поля во времени на начальном этапе

графические данные изменения электротехнических параметров во времени (рис. 3—6).

Как видно из приведённых графиков, при подключении системы электрической муфты на электродвигатель всегда существует переходной процесс, в ходе которого происходит адаптация системы во времени как на начальном этапе, так и в ходе её эксплуатации.

Полученные аналитические зависимости позволяют оптимально проектировать и рассчитать магнитную систему электромеханических преобразователей с заложением необходимых технико-конструктивных и экономических электротехнических параметров и показателей.

Библиографические ссылки

1. Гольдберг О.Д., Свидиренко И.С. Инженерное проектирование и САПР электрических машин:

учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 560 с.

2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.

3. Янгиров И.Ф. Электромеханические преобразователи // Машиностроитель. 2005. № 8. С. 14—15.

4. Вольдек А.И. Индуктивные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.

6. Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Халиков А.Р. Спиральный вибрационный стенд для научных лабораторных исследований // Технология машиностроения. 2016. № 8. С. 43—45.

Ссылка для цитирования

Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитной муфты // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 121—125.

Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.



УДК 629.7.05

А.В. Бабиченко, д-р техн. наук, проф., **А.В. Некрасов**, канд. техн. наук, доц.,
Н.В. Бородаев, О.А. Бородаева
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
ababichenko@rpkb.ru

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены основные принципы математического моделирования работы бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и формирования эталонных значений кажущегося ускорения. Проанализированы выражения для расчёта гравитационного ускорения и потенциала поля тяжести, выведены соотношения для определения основных коэффициентов разложения в ряд по сферическим функциям.

Установлено влияние количества полиномов Лежандра, удерживаемых в расчётных формулах, на точность формирования эталонных значений ускорения.

Методом математического моделирования на суточном интервале наблюдения получены оценки погрешностей счисления при использовании разных расчётных моделей потенциала поля тяжести.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система; потенциал поля тяжести; гравитационное ускорение; кажущееся ускорение; погрешности счисления; математическое моделирование.

The mathematical modeling basic principles of the strapdown inertial navigation systems (SINS) operation and the reference values formation of the apparent acceleration are considered. Expressions for calculating the gravitational acceleration and the gravity field potential are analyzed; relations for determining the main coefficients of the expansion in a series according to spherical functions are derived.

The influence of the Legendre polynomials quantity retained in the calculation formulas on the formation accuracy of the acceleration reference values is established.

The calculation errors estimation at were obtained utilization of the different computational models for the gravity field potential are received through the use of mathematical modeling method on a daily observation interval.

Keywords: strapdown inertial navigation system; gravity field potential; gravitational acceleration; apparent acceleration; calculation errors; mathematical modeling.

Введение. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [1, 2] являются информационным ядром большинства современных и перспективных навигационных комплексов авиационных летательных аппаратов [3, 4]. Главными достоинствами систем являются скрытность и непрерывность работы, защищённость от внешних помех, возможность выдачи информации потребителям практически с любой необходимой частотой, формирование наиболее полной по сравнению с другими системами информации о параметрах движения объекта, а также прогнозируемость погрешностей счисления основных параметров. К достоинствам БИНС также относятся удобный цифровой интерфейс, компактность конструкции, отсутствие наружных датчиков и устройств приёма электромагнит-

ных волн. Недостатками БИНС являются накопление погрешностей счисления с течением времени, сложность начальной выставки, особенно на подвижном основании, а также случайный характер инструментальных погрешностей основных датчиков первичной информации — акселерометров и гироскопов.

Для определения составляющих скорости и координат объекта инерциальные системы реализуют метод счисления, суть которого состоит в последовательном двойном интегрировании измеряемых акселерометрами составляющих ускорения объекта. В самом общем векторном виде эти выражения записываются как

$$\vec{V}(t) = \int_0^t [\vec{a} + \vec{g}'(\vec{r})] dt, \quad (1)$$

$$\vec{r}(t) = \int_0^t \int \{ \vec{a} + \vec{g}'(\vec{r}) \} dt^2, \quad (2)$$

где $\vec{r}(t)$ — радиус-вектор объекта; $\vec{V}(t)$ — вектор абсолютной линейной скорости объекта; \vec{a} — вектор кажущегося ускорения объекта; \vec{g}' — вектор гравитационного ускорения в месте расположения объекта.

При этом координаты объекта, геометрически определяемые вектором \vec{r} , могут быть равноценно представлены тремя скалярными величинами (рис. 1): декартовыми координатами X, Y, Z — проекциями вектора \vec{r} на оси гринвичского трёхгранника $O'XYZ$; долготой λ , географической широтой ϕ , высотой H над земным эллипсоидом; долготой λ , геоцентрической широтой ϕ' , величиной r радиус-вектора. Однозначная связь между этими параметрами известна [1, 4].

При решении уравнений (1) и (2) возникает необходимость перепроецирования векторов из одного координатного базиса в другой. Для этого в БИНС непрерывно рассчитываются параметры взаимной угловой ориентации координатных трёхгранников [1] (см. рис. 1): связанного с местной вертикалью $OENH$, связанного с Землей гринвичского $O'XYZ$, а также связанного с объектом $Oxyz$ (на рис. 1 не показан). Расчёт осуществляется путём численного интегрирования дифференциальных уравнений вида

$$p(t) = \int_0^t \dot{p}(\vec{\omega}) dt, \quad (3)$$

где $p(t)$ — параметр ориентации (тройка углов, направляющие косинусы, кватернион [1]); $\vec{\omega}$ — угловая скорость трёхгранника, которая в зависимости от его типа измеряется гироскопическими датчиками или рассчитывается в вычислителе БИНС.

В современных БИНС авиационного применения в качестве первичных датчиков ускорения используются, как правило, одноосные маятниковые акселерометры различной точности, а в качестве гироскопических измерителей — микромеханические датчики, лазерные и волоконно-оптические гироскопы, твёрдотельные волновые гироскопы (также различной точности). Измерительные оси датчиков неизменно ориентированы относительно строительных осей объекта, поэтому можно считать, что входными сигналами для датчиков являются величины a_x, a_y, a_z и $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции кажущегося ускорения и угловой

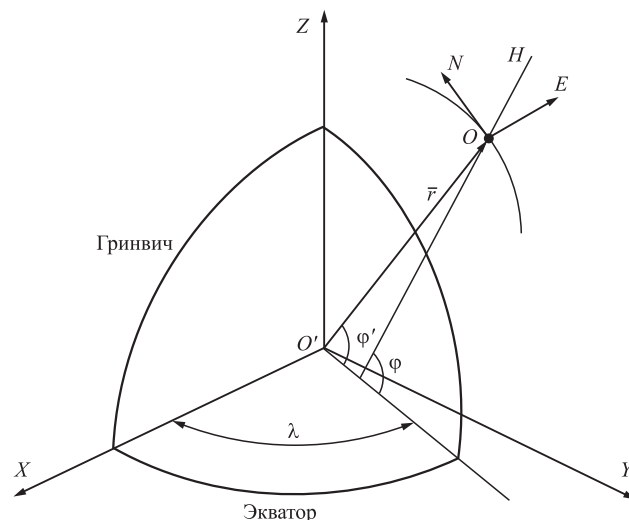


Рис. 1. Основные системы координат

скорости на оси трёхгранника $Oxyz$. Широкое применение в БИНС находят также датчики, осуществляющие интегрирование входных сигналов и выдающие в вычислитель поток приращений входного сигнала за такт интегрирования τ . В этом случае выходными сигналами датчиков (с точностью до инструментальных погрешностей) являются величины

$$\int_0^\tau a_x dt, \int_0^\tau a_y dt, \int_0^\tau a_z dt, \int_0^\tau \omega_x dt, \int_0^\tau \omega_y dt, \int_0^\tau \omega_z dt. \quad (4)$$

Обработка информации таких датчиков требует применения специальных, довольно сложных численных алгоритмов и высокой частоты обработки. В современных БИНС данные обрабатываются с частотой 200 Гц и более. Разработка, исследование и испытания алгоритмов БИНС требуют применения специальных методов, среди которых важное место занимает математическое моделирование.

Моделирование БИНС. При разработке и анализе потенциальной точности БИНС широко используется математическое моделирование, суть которого заключается в том, что формируются эталонные значения всех параметров, измеряемых и считаемых БИНС. Эталонные значения должны быть корректно связаны между собой, образуя целостную картину движения объекта в околоземном пространстве [5, 6]. Эталонные сигналы ускорений и угловой скорости подаются на вход моделей датчиков, в которых эти сигналы складываются с моделируемыми погрешностями, формируя поток данных, «измеренных» акселерометрами и гироскопами [7, 8]. Эти данные обрабатываются по алгоритму БИНС, и в результате формиру-

ется поток данных о координатах, составляющих скорости и об углах ориентации объекта, а также о составляющих ускорения и угловой скорости. Оценки погрешностей в определении выходных параметров для моделируемой БИНС формируются как разности между считаемыми и эталонными значениями соответствующих параметров. Если при моделировании положить, что погрешности измерителей равны нулю, т. е. датчики идеальны, а изменения эталонных параметров соответствуют требуемым параметрам движения объекта, то можно оценить точность алгоритмов, которая фактически является потенциальной точностью для моделируемой БИНС.

Важнейшей задачей при этом является формирование эталонных значений кажущегося ускорения. Полагая эталонное значение вектора положения $\vec{r}(t)$ заданной функцией времени, эталонное значение кажущегося ускорения \vec{a} определяется как векторная разность между абсолютным ускорением (второй производной вектора положения) и гравитационным ускорением (подробный алгоритм описан в работе [5]):

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} - \vec{g}'(\vec{r}) \quad (5)$$

или

$$\vec{a} = \vec{w}^{\text{отн}} + \vec{w}^{\text{кор}} + \vec{w}^{\text{пер}} - \vec{g}',$$

где первые три слагаемые в правой части — это относительное (относительно гринвичского трёхгранника), кориолисово и переносное ускорения соответственно. Векторную разность гравитационного и переносного ускорения, возникающего из-за суточного вращения Земли, объединяют в ускорение тяжести — градиент потенциала поля тяжести — суммарного поля гравитационных сил и центробежных сил инерции:

$$\vec{g} = \vec{g}' - \vec{w}^{\text{пер}}. \quad (6)$$

В модели блока акселерометров БИНС формируется поток измеренных данных о векторе кажущегося ускорения:

$$\vec{a}^{\text{изм}} = \vec{a} + \delta\vec{a} = \vec{w}^{\text{отн}} + \vec{w}^{\text{кор}} - \vec{g} + \delta\vec{a}, \quad (7)$$

где $\vec{a}^{\text{изм}}$ — измеренный акселерометрами вектор кажущегося ускорения; $\delta\vec{a}$ — вектор погрешностей блока акселерометров.

Из выражения (7) видно, что неточность формирования эталонного значения вектора ускорения тяжести эквивалентна введению дополнительной ненулевой погрешности $\delta\vec{a}$.

Поле тяжести Земли представляет собой сумму гравитационного поля Земли и поля центробежных сил инерции, вызванных её вращением. Принято различать нормальное и аномальное поле тяжести [9, 10]. Нормальное представляет собой сумму поля центробежных сил и гравитационного поля Земли, масса которой равномерно распределена внутри эллипсоида вращения, принимаемого за фигуру планеты [1—4]. Это поле имеет строгое математическое описание и из-за симметрии относительно малой оси земного эллипсоида не зависит от долготы места. Аномальное поле представляет собой поправку, учитывающую неэллиптичность реальной земной поверхности и неравномерность распределения массы внутри неё. Поле не имеет общего однозначного описания и задаётся в виде специальных цифровых карт (моделей), локализованных для конкретных участков Земли. Алгоритмы авиационных БИНС [11, 12] разрабатываются с учётом нормального поля тяжести, а влияние аномального поля осуществляется путём добавления к сигналам акселерометров специальных поправок, выбираемых из загружаемой в память вычислителя цифровой карты зоны полётов.

Далее рассмотрим только нормальное поле тяжести и его учёт при разработке и моделировании алгоритмов БИНС. Потенциал нормального поля тяжести описывается выражением вида [1—4]

$$\begin{aligned} W(r, \varphi') &= W^{\text{грав}} + W^{\text{центр}} = \\ &= f \iiint \frac{dm}{r} + \frac{1}{2} U^2 r^2 \cos^2 \varphi', \end{aligned} \quad (8)$$

где r и φ' — полярные координаты точки (см. рис. 1): величина радиус-вектора и геоцентрическая широта; $W^{\text{грав}}$ — гравитационный потенциал; $W^{\text{центр}}$ — потенциал центробежных сил; U — скорость вращения Земли; f — фундаментальная гравитационная постоянная; dm — элементарная масса.

Для вычисления интеграла в уравнении (8) используется разложение в бесконечный ряд функции r^{-1} , при этом получается выражение [1, 4—6]

$$\begin{aligned} W(r, \varphi') &= \frac{fM}{r} \left(1 + \sum k_n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_n(\sin \varphi') \right) + \\ &+ a^2 \frac{U^2 r^2}{2a^2} (1 - \sin^2 \varphi'), \end{aligned} \quad (9)$$

где k_n — безразмерные коэффициенты; a — величина большой полуоси земного эллипсоида; M — масса Земли; P_n — полиномы Лежандра, аргументами для которых является синус геоцентрической широты; n — индекс суммирования, принимает значения от 1 до бесконечности.

Величина потенциала на экваторе имеет значение, которое удобно принять за «нулевое»:

$$W_0 \equiv W(r = a, \varphi' = 0). \quad (10)$$

В соответствии с физическим смыслом введённого определения нормального поля тяжести земной эллипсоид является поверхностью нулевого уровня этого поля, т. е. во всех точках эллипсоида потенциал поля имеет одинаковое «нулевое» значение, а уравнение этой поверхности имеет вид

$$W(r, \varphi') - W_0 = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) должно совпадать с уравнением земного эллипсоида, имеющего вид [1, 2]

$$r = \frac{a}{\sqrt{1 + e'^2 \sin^2 \varphi'}}, \quad (12)$$

где e'^2 — квадрат второго эксцентриситета эллипсоида.

Из выражения (12) следует полезное соотношение (точное)

$$\left(\frac{a}{r}\right)^2 = 1 + e'^2 \sin^2 \varphi'. \quad (13)$$

Кроме того, что уравнения (11) и (12) должны полностью соответствовать друг другу, вектор градиента поля тяжести (ускорение \bar{g}) должен быть направлен вдоль нормали к земному эллипсоиду. Выполнение этого условия также требует определённого вида от функции (9), а именно, северная составляющая гравитационного ускорения, определяемого как производная от гравитационного потенциала, должна быть равна по величине северной составляющей центростремительного ускорения из-за вращения Земли. Центростремительное ускорение в проекциях на оси гринвичского трёхгранника $OXYZ$ определяется простыми формулами

$$\begin{aligned} w_X^{\text{пер}} &= -U^2 r \cos \varphi' \cos \lambda; \\ w_Y^{\text{пер}} &= -U^2 r \cos \varphi' \sin \lambda; \\ w_Z^{\text{пер}} &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

а на оси географического трёхгранника $OENH$, вертикальная ось OH которого направлена по нормали к земному эллипсоиду, — формулами

$$\begin{aligned} w_E^{\text{пер}} &= 0; \\ w_N^{\text{пер}} &= U^2 r \cos \varphi' \sin \varphi'; \\ w_H^{\text{пер}} &= -U^2 r \cos^2 \varphi'. \end{aligned} \quad (15)$$

Гравитационное ускорение в осях трёхгранника $OXYZ$ определится как

$$\begin{aligned} g'_X &= -\frac{\partial W^{\text{грав}}}{\partial X}; \\ g'_Y &= -\frac{\partial W^{\text{грав}}}{\partial Y}; \\ g'_Z &= -\frac{\partial W^{\text{грав}}}{\partial Z}, \end{aligned} \quad (16)$$

а в осях трёхгранника $OENH$ —

$$\begin{aligned} g'_E &= 0; \\ g'_N &= -(g'_X \cos \lambda + g'_Y \sin \lambda) \sin \varphi + g'_Z \cos \varphi; \\ g'_H &= (g'_X \cos \lambda + g'_Y \sin \lambda) \cos \varphi + g'_Z \sin \varphi. \end{aligned} \quad (17)$$

Условие, что поверхность нулевого уровня потенциала тяжести совпадает с земным эллипсоидом, означает строгое выполнение равенства

$$g'_N = U^2 r \cos \varphi' \sin \varphi', \quad (18)$$

в левой части которого стоят выражения, рассчитанные по формулам (16) и (17) с учётом конкретного вида $W^{\text{грав}}$. Точность выполнения условия (18) является критерием качества используемой модели поля тяжести.

Отметим, что геоцентрическая φ' и географическая φ широты связаны точным соотношением [1, 2]

$$\text{tg} \varphi = (1 + e'^2) \text{tg} \varphi'. \quad (19)$$

Точность счисления при использовании упрощённых формул потенциала нормального поля тяжести. В уравнении вида (9) обычно рекомендуется ограничить число полиномов Лежандра [1–3]:

$$\begin{aligned} W(r, \varphi') &\cong \frac{fM}{r} \left[1 + \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 (3 \sin^2 \varphi' - 1) \right] + \\ &+ a^2 \frac{U^2 r^2}{2a^2} (1 - \sin^2 \varphi'), \end{aligned} \quad (20)$$

а нулевое значение потенциала —

$$W_0(r, \varphi') = \frac{fM}{r} \left(1 - \frac{1}{2} k_2 \right) + a^2 \frac{U^2}{2}. \quad (21)$$

В работах [4, 5] показано, что уравнение, получающееся после подстановки выражения (21) в уравнение (20) и учёта значений задействованных в нём физических констант, в первом приближении эквивалентно уравнению эллипсоида (12). При этом выражения (16) для составляющих гравитационного ускорения в гринвичской системе координат $OXYZ$ имеют вид [1]

$$\begin{aligned} g'_X &= -fM \left(\frac{X}{r^3} - \frac{3}{2} k_2 a^2 \frac{X}{r^5} + \frac{15}{2} k_2 a^2 \frac{XZ^2}{r^7} \right); \\ g'_Y &= -fM \left(\frac{Y}{r^3} - \frac{3}{2} k_2 a^2 \frac{Y}{r^5} + \frac{15}{2} k_2 a^2 \frac{YZ^2}{r^7} \right); \\ g'_Z &= -fM \left(\frac{Z}{r^3} - \frac{3}{2} k_2 a^2 \frac{Z}{r^5} + \frac{15}{2} k_2 a^2 \frac{Z^3}{r^7} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Однако если для произвольной точки на земном эллипсоиде, заданной географической широтой φ , нулевой высотой H , и для определённости нулевой долготой λ (её величина

не имеет значения из-за симметрии поля), вычислить декартовы координаты X, Y, Z , затем по формулам (22) — составляющие гравитационного ускорения и перепроецировать их с помощью выражения (17) на северную и вертикальную оси, то окажется, что в уравнении (18) левая и правая части различаются на величину, соизмеримую с инструментальными погрешностями современных акселерометров, применяемых в точных БИНС. Так, для широты Москвы (около 56°) эта разность составит примерно $0,00005 \text{ м/с}^2$, что эквивалентно введению в контур БИНС такой же по величине погрешности измерения ускорения.

На рис. 2—5 приведены результаты моделирования суточной работы БИНС на неподвижном объекте на широте Москвы. Принято, что БИНС оснащена идеальными датчиками, начальная выставка выполнена идеально (без погрешностей), акселерометры и гироскопы выдают данные в виде (4), интеграторы (1—3) реализуют трёхточечный метод Ньютона, частота обработки данных 200 Гц. Гравитационное ускорение для формирования в соответствии с выражением (7) входного вектора

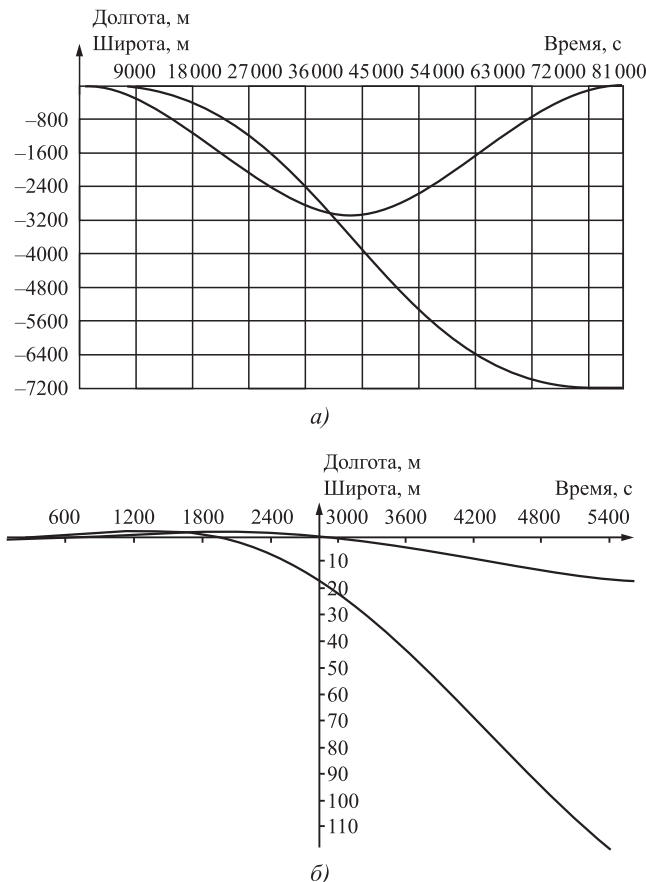


Рис. 2. Погрешности счисления координат (м) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2-й степени:

a — суточный период наблюдения; *б* — полуторачасовой период наблюдения

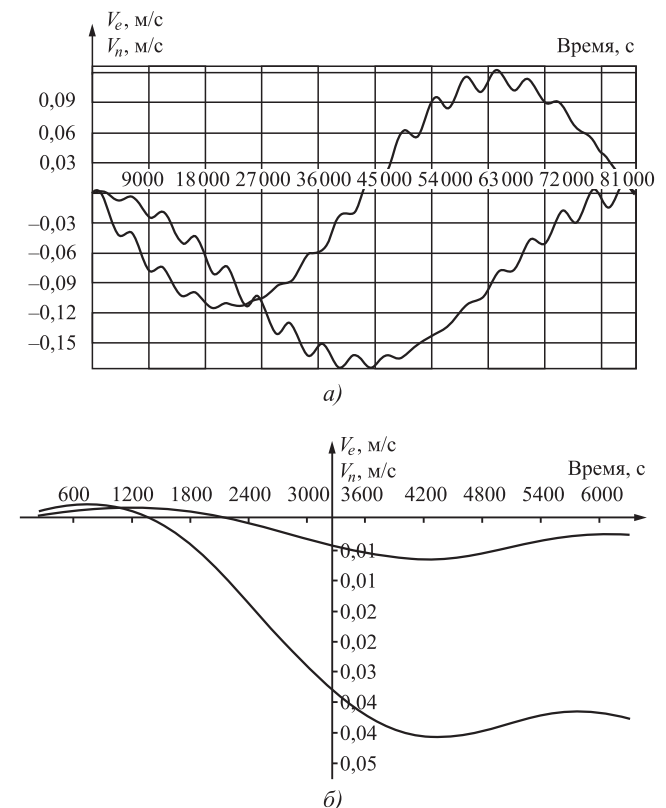


Рис. 3. Погрешности счисления северной (V_n) и восточной (V_e) скорости (м/с) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2-й степени:

a — суточный период наблюдения; *б* — полуторачасовой период наблюдения

кажущегося ускорения вычисляется по формулам (17) и (22). На рис. 2 показаны погрешности счисления координат, на рис. 3 — северной и восточной составляющих скорости, на рис. 4 — курса, на рис. 5 — тангажа и крена.

Представленные на рисунках зависимости изменения погрешностей счисления соответствуют поведению БИНС, возмущённой погрешностью смещения нуля «северного» аксе-

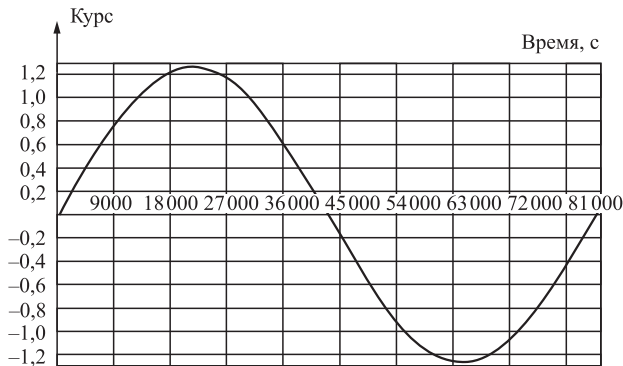


Рис. 4. Погрешность счисления курса (угл. мин) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2-й степени (суточный период наблюдения)

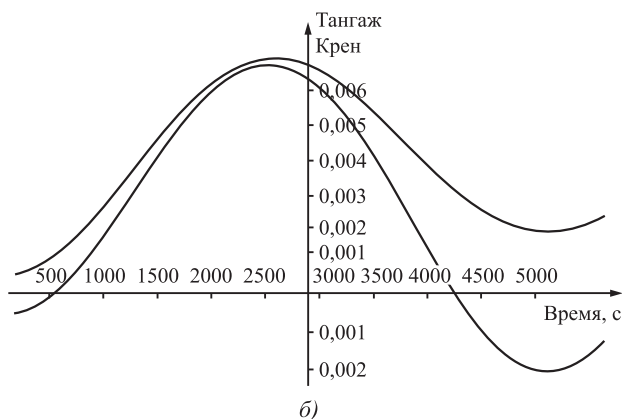
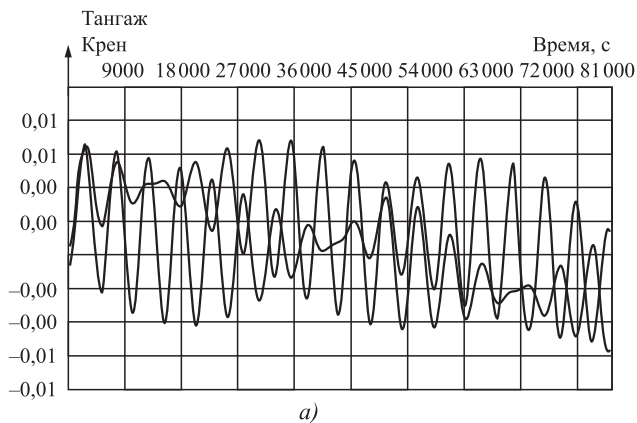


Рис. 5. Погрешность тангажа и крена (угл. мин) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2-й степени: а — суточный период наблюдения; б — полуторачасовой период наблюдения

лерометра или, что эквивалентно, погрешности начальной выставки вертикали в плоскости меридиана. Наблюдаются характерные для погрешностей БИНС гармонические процессы с периодом Шулера (около 84 мин) и суточным периодом (1440 мин). Максимальные погрешности за первый период Шулера составляют: по координатам — до 100 м; по скорости — не более 0,04 м/с; по курсу — до 20"; по тангажу и крену — не более 0,5". Максимальные погрешности за полный суточный период составляют: по координатам — 3..7 км, причём погрешность долготы имеет растущую составляющую примерно 0,08 м/с; по скорости — не более 0,15 м/с; по курсу — не более 1,2'; по тангажу и крену — не более 0,5". Величины погрешностей счисления скорости и координат уже не могут считаться малыми.

Таким образом, для отработки алгоритмов БИНС низкой точности рассмотренная точность описания потенциала поля тяжести является удовлетворительной, но для высокоточных БИНС этого явно недостаточно.

Выражения для коэффициентов более точных формул потенциала нормального поля тяжести. Воспользуемся выражением (9), в котором сохраним члены с коэффициентами k_2 , k_4 , k_6 . Тогда для нулевого потенциала в соответствии с формулой (10) получим выражение

$$W_0 = \frac{fM}{a} \left(1 - \frac{1}{2}k_2 + \frac{3}{8}k_4 - \frac{5}{16}k_6 \right) + \frac{U^2 a^2}{2}, \quad (23)$$

а для поверхности уровня в соответствии с формулой (11) —

$$\begin{aligned} & \frac{fM}{r} \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \frac{k_2}{2} (3x^2 - 1) + \right. \\ & + \left(\frac{a}{r} \right)^4 \frac{k_4}{8} (35x^4 - 30x^2 + 3) + \\ & \left. + \left(\frac{a}{r} \right)^6 \frac{k_6}{16} (231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5) \right\} + \\ & + \frac{a^2 U^2}{2} \left(\frac{r}{a} \right)^2 (1 - x^2) - W_0 = 0. \end{aligned}$$

Здесь для простоты записи введено обозначение

$$x^2 \equiv \sin^2 \varphi', \quad (24)$$

и записаны в явном виде полиномы Лежандра P_2 , P_4 , P_6 .

Если поверхность нулевого уровня потенциала поля тяжести совпадает с земным эллипсоидом, то подстановка радиус-вектора r

из уравнения эллипсоида (12) в уравнение (24) должна обратить его в тождество. Осуществляя такую подстановку, а также воспользовавшись выражением (13) и обозначением (24), после несложных, но громоздких преобразований, получим уравнение

$$C_0 + C_2x^2 + C_4x^4 + C_6x^6 = 0, \quad (25)$$

в котором для упрощения записи введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \beta &\equiv e'^2; \\ \lambda_0 &= 1 - \frac{1}{2}k_2 + \frac{3}{8}k_4 - \frac{5}{16}k_6; \\ \lambda_2 &= \frac{1}{2}k_2(3 - \beta) + \frac{1}{8}k_4(-30 + 3\beta) + \\ &+ \frac{1}{16}k_6(105 - 15\beta); \\ \lambda_4 &= \frac{1}{2}k_2(3\beta) + \frac{1}{8}k_4(35 - 60\beta + 3\beta^2) + \\ &+ \frac{1}{16}k_6(-315 + 315\beta - 15\beta^2); \\ \lambda_6 &= \frac{1}{8}k_4(70\beta - 30\beta^2) + \\ &+ \frac{1}{16}R_6(231 - 945\beta + 315\beta^2); \\ C_0 &= \frac{fM}{a}\lambda_0 + \frac{a^2U^2}{2} - W_0; \\ C_2 &= \frac{fM}{a}\lambda_2 + \frac{1}{2}\beta\frac{fM}{a}\lambda_0 - \frac{a^2U^2}{2}(1 + \beta); \\ C_4 &= \frac{fM}{a}\lambda_4 + \frac{1}{2}\beta\frac{fM}{a}\lambda_2 - \\ &- \frac{1}{8}\beta^2\frac{fM}{a}\lambda_0 + \frac{a^2U^2}{2}\beta(1 + \beta); \\ C_6 &= \frac{fM}{a}\lambda_6 + \frac{1}{2}\beta\frac{fM}{a}\lambda_4 - \frac{1}{8}\beta^2\frac{fM}{a}\lambda_2 + \\ &+ \frac{3}{48}\beta^3\frac{fM}{a}\lambda_0 - \frac{a^2U^2}{2}\beta^2(1 + \beta). \end{aligned}$$

Чтобы уравнение (25) обращалось в тождество при любых значениях x , все коэффициенты C_0 , C_2 , C_4 , C_6 должны обращаться в нуль, т. е.

$$C_0 = 0; C_2 = 0; C_4 = 0; C_6 = 0. \quad (26)$$

Нетрудно убедиться, что подстановка в первое из этих уравнений величин λ_0 и W_0 даёт тождество вида $0 = 0$. Подставляя величины λ_0 , λ_2 , λ_4 , λ_6 и W_0 в другие три уравнения, получим следующую систему из трёх уравнений, линейных относительно неизвестных k_2 , k_4 , k_6 :

$$\begin{aligned} m_{11}k_2 + m_{12}k_4 + m_{13}k_6 &= s_1; \\ m_{21}k_2 + m_{22}k_4 + m_{23}k_6 &= s_2; \\ m_{31}k_2 + m_{32}k_4 + m_{33}k_6 &= s_3, \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} m_{11} &= \frac{6 - 2\beta}{4}; \quad m_{12} = \frac{9\beta - 60}{16}; \quad m_{13} = \frac{210 - 35\beta}{32}; \\ m_{21} &= \frac{36\beta - 3\beta^2}{16}; \quad m_{22} = \frac{280 - 600\beta + 33\beta^2}{64}; \\ m_{23} &= \frac{-2520 + 2940\beta - 175\beta^2}{128}; \\ m_{31} &= \frac{54\beta^2 + 3\beta^3}{96}; \quad m_{32} = \frac{4200\beta - 2700\beta^2 + 72\beta^3}{384}; \\ m_{33} &= \frac{11\,088 - 52\,920\beta + 22\,050\beta^2 - 285\beta^3}{768}; \\ s_1 &= \frac{a}{fM} \frac{a^2U^2}{2} (1 + \beta) - \frac{\beta}{2}; \\ s_2 &= \frac{\beta^2}{8} - \frac{a}{fM} \left(\frac{a^2U^2}{2} \right) (1 + \beta)\beta; \\ s_3 &= \frac{a}{fM} \frac{a^2U^2}{2} \beta^2 (1 + \beta) - \frac{3}{48}\beta^3. \end{aligned}$$

Решение этой системы методом Крамера при том, что входящие в систему (27) константы имеют следующие стандартные значения ([4]):

$$\begin{aligned} M &= 5,973\,698\,995\,442\,549\,29 \cdot 10^{24} \text{ кг}; \\ f &= 6,672\,59 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2); \\ a &= 6\,378\,136 \text{ м}; \\ U &= 7,292\,115 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}; \\ \beta &\equiv e'^2 = 0,006\,739\,482\,8, \end{aligned} \quad (28)$$

даёт следующие значения для коэффициентов при полиномах Лежандра 2, 4 и 6-й степеней, обеспечивающих выполнение условия совпадения поверхности нулевого уровня потенциала поля тяжести с земным эллипсоидом:

$$\begin{aligned} k_2 &= -0,001\,082\,622\,074\,147\,29; \\ k_4 &= 2,370\,639\,319\,971\,97 \cdot 10^{-6}; \\ k_6 &= -6,176\,484\,942\,311\,52 \cdot 10^{-9}. \end{aligned} \quad (29)$$

Полученные значения совпадают с приведёнными в справочных данных Военно-топографического управления [4], для которых указаны следующие значения (противоположные знаки вызваны соответствующей инверсией знаков этих коэффициентов в исходных выражениях вида (9), используемых в справочнике [4]):

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,001\,082\,625\,75; \\ k_4 &= -2,370\,89 \cdot 10^{-6}; \\ k_6 &= 6,08 \cdot 10^{-9}. \end{aligned} \quad (30)$$

Различия в 9-м десятичном знаке для k_2 и в 11-м — для k_4 и k_6 могут быть обусловлены тем, что справочные коэффициенты получены для заведомо более сложного вида выражения (9).

Точность счисления при использовании более полных формул потенциала нормального поля тяжести. Выражения (16) для составляющих гравитационного ускорения в гринвичской системе координат $OXYZ$ имеют вид [1]

$$\begin{aligned}
 g'_X &= -\mu_0 X \left(\frac{1}{r}\right)^3 + 3\mu_2 X \left(\frac{1}{r}\right)^5 - \\
 &- 15X(\mu_2 Z^2 + \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^7 + \\
 &+ 35X(6\mu_4 Z^2 + \mu_6) \left(\frac{1}{r}\right)^9 + (-315) XZ^2 \times \\
 &\times (3\mu_6 + Z^2 \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^{11} + 3465 XZ^4 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{13} + \\
 &+ (-3003) XZ^6 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{15}; \\
 g'_Y &= -\mu_0 Y \left(\frac{1}{r}\right)^3 + 3\mu_2 Y \left(\frac{1}{r}\right)^5 - \\
 &- 15Y(\mu_2 Z^2 + \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^7 + \\
 &+ 35Y(6\mu_4 Z^2 + \mu_6) \left(\frac{1}{r}\right)^9 + (-315) YZ^2 \times \\
 &\times (3\mu_6 + Z^2 \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^{11} + 3465 YZ^4 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{13} + \\
 &+ (-3003) YZ^6 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{15}; \\
 g'_Z &= -\mu_0 Z \left(\frac{1}{r}\right)^3 + 9\mu_2 Z \left(\frac{1}{r}\right)^5 - \\
 &- 15Z(\mu_2 Z^2 + \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^7 + \\
 &+ 35Z(10\mu_4 Z^2 + \mu_6) \left(\frac{1}{r}\right)^9 + (-315) Z^3 \times \\
 &\times (7\mu_6 + Z^2 \mu_4) \left(\frac{1}{r}\right)^{11} + 4851 Z^5 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{13} + \\
 &+ (-3003) Z^7 \mu_6 \left(\frac{1}{r}\right)^{15},
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } \mu_0 &= fM; \quad \mu_2 = \frac{1}{2} k_2 fMa^2; \quad \mu_4 = \frac{1}{8} k_4 fMa^4; \\
 \mu_6 &= \frac{1}{16} k_6 fMa^6.
 \end{aligned}$$

Если теперь для произвольной точки на земном эллипсоиде, заданной географической широтой φ , нулевой высотой H и долготой λ , вычислить декартовы координаты X , Y , Z , затем по формулам (31) — составляющие гравитационного ускорения и перепроецировать их с помощью выражения (17) на северную и вертикальную оси, то разность между левой и правой

частями уравнения (18) составит величину, на 2 порядка меньшую по сравнению с более грубым представлением поля тяжести, учитывающим только полиномы Лежандра 2-й степени. Так, для широты Москвы (около 56°) эта разность составит примерно $0,000\,000\,4 \text{ м/с}^2$.

Столь высокая точность выполнения равенства (18) даёт возможность утверждать, что в алгоритмах БИНС для расчёта северной составляющей нормального гравитационного ускорения (g'_N) выражением (18) можно пользоваться как расчётной формулой.

На рис. 6—9 приведены результаты моделирования суточной работы БИНС на неподвижном объекте на широте Москвы. Моделирование проведено при тех же допущениях, что и ранее, но гравитационное ускорение для формирования в соответствии с выражением (7) входного вектора кажущегося ускорения вычисляется по формулам (17) и (31). На рис. 6 показаны погрешности счисления координат,

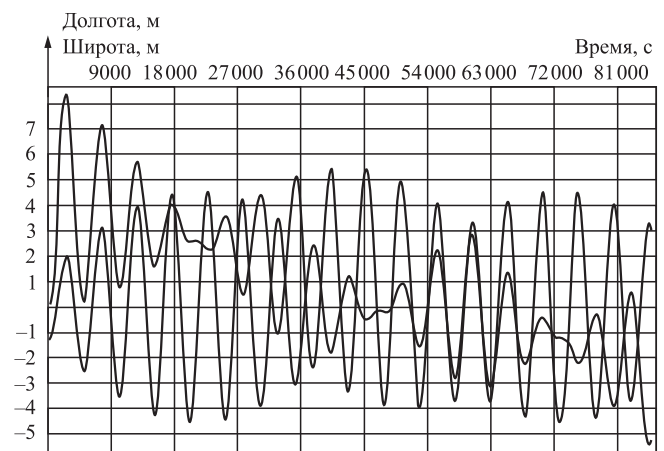


Рис. 6. Погрешность счисления координат (м) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2, 4, 6-й степеней (суточный период наблюдения)

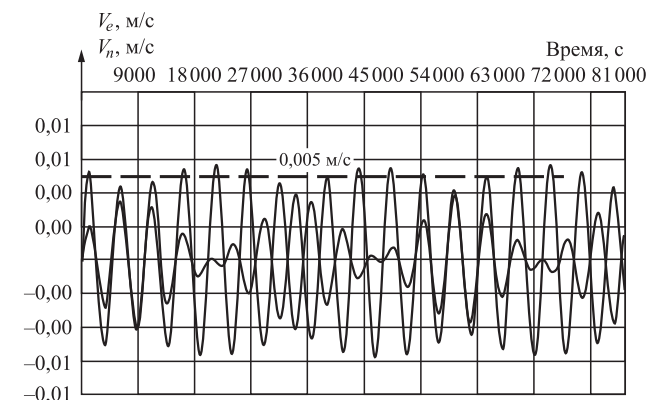


Рис. 7. Погрешность счисления северной (V_n) и восточной (V_e) скорости (м/с) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2, 4, 6-й степеней (суточный период наблюдения)

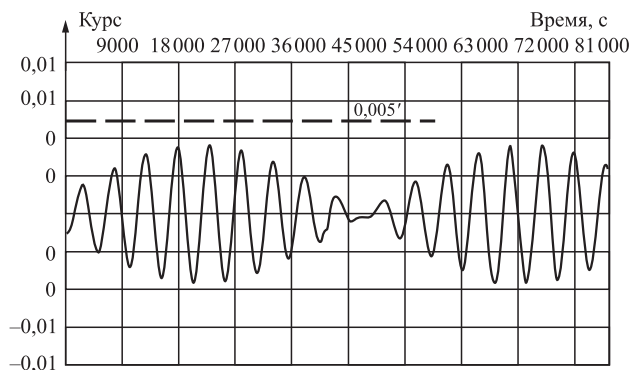


Рис. 8. Погрешность счисления курса (угл. мин) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2, 4, 6-й степеней (суточный период наблюдения)

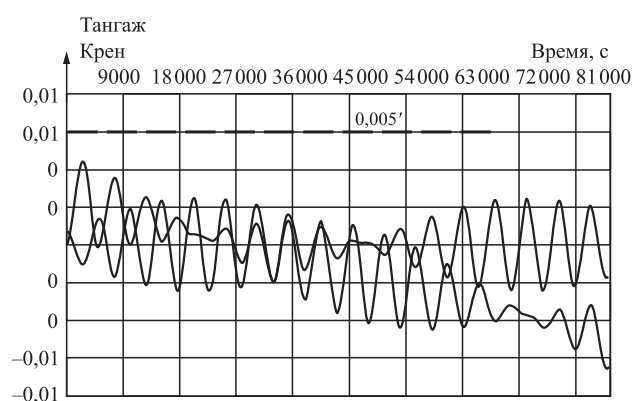


Рис. 9. Погрешность тангажа и крена (угл. мин) в случае расчёта гравитационного ускорения с учётом полиномов Лежандра 2, 4, 6-й степеней (суточный период наблюдения)

на рис. 7 — северной и восточной составляющих скорости, на рис. 8 — курса, на рис. 9 — тангажа и крена.

Изменения погрешностей счисления соответствуют поведению БИНС, возмущённой погрешностью смещения нуля акселерометра, составляющим порядка 10^{-7} м/с². На графиках наблюдаются характерные гармонические процессы с периодом Шулера, амплитуда которых меняется с суточным периодом.

Максимальные погрешности за первый период Шулера составляют: по координатам — до 8 м; по скорости — не более 0,005 м/с; по курсу — не более 0,2"; по тангажу и крену — не более 0,25".

Максимальные погрешности за полный суточный период составляют: по координатам — 5...8 м, причём обе составляющие погрешности имеют колебательный характер, тренда долготы не наблюдается, по широте наблюдается смещение центра колебаний на 2...3 м; по скорости — не более 0,006 м/с; по курсу — не более 0,3"; по тангажу и крену — не более 0,25".

Величины всех погрешностей могут считаться пренебрежимо малыми для любых интервалов наблюдения. Полученный результат позволяет сделать вывод, что представление нормального поля тяжести Земли с учётом полиномов Лежандра 2, 4 и 6-й степеней достаточно для формирования эталонных данных при разработке и исследовании алгоритмов авиационных БИНС любой точности. В самих же алгоритмах БИНС для расчёта северной составляющей гравитационного ускорения можно использовать в качестве расчётной формулы правую часть выражения (18).

Заключение. В результате проведённого исследования установлено:

для обработки алгоритмов БИНС любой точности и продолжительности работы при формировании входного сигнала кажущегося ускорения следует использовать выражения для потенциала поля тяжести Земли, учитывающие разложения по полиномам Лежандра 2, 4 и 6-й степеней, при этом вносимая вычислительная погрешность счисления не будет превышать нескольких метров за сутки;

выражения для потенциала, учитывающие только полином Лежандра 2-й степени, могут применяться для исследований поведения БИНС низкой точности и времени работы до полутора часов;

в качестве расчётного значения северной составляющей гравитационного ускорения в алгоритмах БИНС целесообразно использовать величину северной составляющей переносного ускорения, при этом вносимая эквивалентная погрешность кажущегося ускорения будет составлять порядка 10^{-7} м/с² (без учёта аномального поля тяжести).

Библиографические ссылки

1. Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве / под ред. Г.И. Джанджгавы. М.: Научтехлитиздат, 2015. 592 с.
2. Zhang L., Neusylin K.A., Selezneva M.S. A New Method for Determining the Degree of Controllability of State Variables for the LQR Problem Using the Duality Theorem // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 15. P. 5234.
3. Neusylin K.A., Selezneva M.S., Tsibizova T.Y. Diagnostics algorithms for flight vehicles navigation complex // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2018. P. 1—6.
4. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации. М.: Наука, 1979. 296 с.
5. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 512 с.
6. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. М.: Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, 2014. 52 с.

7. **Бабиченко А.В.** Формирование эталонной траекторной информации при математическом моделировании приборных комплексов летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2010. № 4. С. 37—46.

8. **Малеев П.И.** Способ измерения абсолютной угловой скорости линейными акселерометрами // Навигация и гидрография. 2020. № 60. С. 24—31.

9. **Огородова Л.В.** Нормальное поле и определение аномального потенциала // Москва. 2010.

10. **Каленицкий А.И.** К проблеме повышения качества редуцирования гравитационного поля и его аномальной составляющей в геодезии и геодинимике // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2005. № 10. С. 37—42.

11. **Chen D. et al.** New Algorithms for Autonomous Inertial Navigation Systems Correction with Precession Angle Sensors in Aircrafts // Sensors. — 2019. Vol. 19. No. 22. P. 5016.

12. **Shen K. et al.** Multi-sensor performance evaluation and management in integrated navigation based on observability analysis // 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2019. P. 275—280.

Ссылка для цитирования

Бабиченко А.В., Некрасов А.В., Бородаев Н.В., Бородаева О.А. К вопросу обеспечения точности математического моделирования бесплатформенных инерциальных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 126—135.

УДК 512.64

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-3-135-137

Н.Е. Zubov, д-р техн. наук, проф., **В.Н. Рябченко**, д-р техн. наук, проф.,
М.Н. Поклад, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

nikolay.zubov@rsce.ru

НОВЫЕ ФОРМУЛИРОВКИ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ МИМО-СИСТЕМЫ

Приведены новые формулировки алгебраических критериев управляемости и наблюдаемости линейной динамической системы со многими входами и выходами (МИМО-системы), сформулированы соответствующие теоремы. В основе критериев положены алгебраические соотношения между линейными комбинациями столбцов матрицы управления и собственными векторами матрицы свободной динамики.

Ключевые слова: алгебраический критерий; управляемость; наблюдаемость; линейная МИМО-система; собственное значение; собственный вектор; вектор и матрица Крылова; ядро; коядро.

New formulations of algebraic criteria for controllability and observability of a linear dynamical system with multiple inputs and outputs (MIMO-systems) are given, the corresponding theorems are formulated. The criteria are based on algebraic relations between linear combinations of the control matrix columns and own vectors of the free dynamics matrix.

Keywords: algebraic criterion; controllability; observability; linear MIMO-system; own value; own vector; Krylov vector and matrix; kernel; cokernel.

Критерии управляемости и наблюдаемости линейных динамических систем играют важнейшую роль при решении задач анализа и синтеза [1—6]. При всём многообразии трактовок управляемости и наблюдаемости для линейных динамических систем чаще всего используются два критерия: критерий управляемости Калмана и критерий (тест) Попова—Белевича—Хотиса.

Первый из них основан на анализе матриц коэффициентов системы, представленных в пространстве состояний, и может быть отнесён к группе временных критериев. Второй —

использует собственные значения матрицы состояния системы и относится к частотным критериям.

Рассмотрим линейную динамическую систему со многими входами и выходами (МИМО-систему, Multi Input — Multi Output Systems) в форме «вход — состояние»:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^r$ — вектор управления (входов); \mathbb{R} — поле действительных чисел; \mathbf{A} — матрица свободной (собственной) динамики; \mathbf{B} — матрица управления.

Пусть $\text{eig}(A)$ — множество собственных значений:

$$\text{eig}(A) = \{\lambda_i \in \mathbb{C} : \det(\lambda_i I_n - A) = 0, i = \overline{1, n}\}.$$

Для полностью управляемой ММО-системы (1) следующие утверждения являются эквивалентными [1—5]:

а) матрица управляемости Калмана

$$(B \mid AB \mid A^2B \mid \dots \mid A^{n-1}B) \quad (2)$$

имеет полный ранг по строкам;

б) комплексная матрица

$$(\lambda_i I_n - A \mid B) \quad (3)$$

имеет полный ранг для всех $\lambda_i \in \text{eig}(A)$ (критерий управляемости Попова—Белевича—Хотиса);

в) пусть λ_i и y_i — собственное значение и левый собственный вектор матрицы A соответственно, т. е. $y_i^T A = y_i^T \lambda_i$, тогда

$$y_i^* B \neq 0, \quad (4)$$

где $*$ — символ операции эрмитова сопряжения.

Пусть далее минимальный характеристический полином матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ из системы (1) равен

$$\det(\lambda I_n - A) = \lambda^n + \alpha_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_1 \lambda + \alpha_0, \quad (5)$$

где $\lambda \in \mathbb{C}$, $\alpha_{n-1}, \dots, \alpha_0 \in \mathbb{R}$; \mathbb{C} — поле комплексных чисел.

Согласно теореме Гамильтона—Кэли для любой матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ верно тождество

$$A^n + \alpha_{n-1} A^{n-1} + \dots + \alpha_1 A + \alpha_0 I_n = 0.$$

Справедливы теоремы, устанавливающие взаимосвязь между собственными векторами и векторами Крылова [7].

Теорема 1. *Правый собственный вектор x_i матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающий собственному значению λ_i , является вектором Крылова и выражается следующей формулой:*

$$\begin{aligned} x_i &= [\beta_n (\lambda_i I_n - A)^{n-1} + \\ &+ \beta_{n-1} (\lambda_i I_n - A)^{n-2} + \dots + \beta_1 I_n] b = \quad (6) \\ &= \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1} b, \end{aligned}$$

где $\beta_n = 1$; $\beta_{n-1}, \dots, \beta_1 \in \mathbb{C}$ — коэффициенты характеристического полинома матрицы $\lambda_i I_n - A$, т. е.

$$\begin{aligned} \det(\lambda I_n - \lambda_i I_n + A) &= \det[(\lambda - \lambda_i) I_n + A] = \\ &= \lambda^n + \beta_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \beta_1 \lambda = \quad (7) \\ &= (\lambda - \lambda_i)^n + \alpha_{n-1} (\lambda - \lambda_i)^{n-1} + \dots + \alpha_1 (\lambda - \lambda_i), \end{aligned}$$

$b \in \mathbb{R}^n$ — произвольный вектор из подпространства ортогонального ядру матрицы Крылова

$$\mathcal{K} = \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1},$$

т. е.

$$b \notin \mathcal{K}^\perp. \quad (8)$$

Здесь $F^\perp = \ker \mathcal{K}$ — ядро матрицы Крылова.

Теорема 2. *Левый собственный вектор y_i матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающий собственному значению λ_i , т. е.*

$$y_i^* (\lambda_i I_n - A) = 0,$$

является вектором Крылова и выражается следующей формулой:

$$y_i = c^T \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1}, \quad (9)$$

где $c \in \mathbb{R}^n$ — произвольный вектор из подпространства ортогонального коядру матрицы

$$\mathcal{K} = \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1}, \quad (10)$$

т. е.

$$c \notin \mathcal{K}^{\perp\perp}. \quad (11)$$

Здесь $\mathcal{K}^{\perp\perp} = \text{co ker } \mathcal{K}$ — коядро матрицы Крылова.

Согласно формулировке теоремы 2 представленные ранее условия полной управляемости (3) и (4) можно записать в эквивалентном виде

$$c^T \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1} B \neq 0. \quad (12)$$

С учётом заявленного в теореме 2 произвола в выборе вектора c^T вместо неравенства (12) можно записать другое неравенство

$$\sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i I_n - A)^{n-j-1} B \neq 0. \quad (13)$$

С одной стороны, из соотношения (13) следует, что для полностью управляемой системы, и только для неё, столбцы «матрицы входов» $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$ образуются из базиса, ортогонального базису ядра матрицы (10). С другой стороны, для неполностью управляемой ММО-системы столбцы «матрицы входов» $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$ принадлежат ядру матрицы (10). Более того, в соответствии с формулировкой теоремы 1 доказано следующее утверждение.

Теорема 3. Для полностью управляемой МИМО-системы, и только для неё, линейные комбинации столбцов матрицы $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$ порождают непустое множество коллинеарных правых собственных векторов x_i матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающих собственному значению λ_i . И такое утверждение справедливо для всех λ_i , $i = \overline{1, n}$.

Иными словами, только у полностью управляемой МИМО-системы (1) правые собственные векторы матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ порождены линейными комбинациями столбцов матрицы входов $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$.

С учётом дуальности условий полной наблюдаемости и полной управляемости МИМО-системы (1) справедливым оказывается ещё одно утверждение.

Теорема 4. Для полностью наблюдаемой МИМО-системы

$$\dot{x}(t) = Ax(t), \quad y(t) = Cu(t), \quad (14)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ — вектор выхода, и только для неё, линейные комбинации строк матрицы $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ порождают непустое множество коллинеарных левых собственных векторов x_i матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающих собственному значению λ_i . И такое утверждение справедливо для всех λ_i , $i = \overline{1, n}$.

Таким образом, в теоремах 3 и 4 даны новые формулировки алгебраических критериев управляемости и наблюдаемости линейной МИМО-системы, что наряду с исследованиями по совершенствованию методов модального управления [8—18] расширяет возможности аналитического анализа и синтеза МИМО-систем.

Библиографические ссылки

1. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.
2. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
3. Уонем М. Линейные многомерные системы управления: геометрический подход. М.: Наука, 1980.
4. Kailath T. Linear Systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs. NJ. 1980.
5. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
6. Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007.
7. Микрин Е.А., Zubov Н.Е., Рябченко В.Н. Аналитическое представление собственных векторов числовой матрицы // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 134—138.

8. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Управление по выходу спектром дескрипторной динамической системы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468. № 2. С. 134—136.

9. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Стабилизация взаимосвязанных движений летательного аппарата в каналах тангаж-рысканье при отсутствии информации об угле скольжения // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 95—105.

10. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Управление по выходу продольным движением летательного аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 5. С. 164—175.

11. Zubov Н.Е. и др. Синтез законов управления боковым движением летательного аппарата при отсутствии информации об угле скольжения. Аналитическое решение // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 14—20.

12. Zubov Н.Е., Зыбин Е.Ю., Микрин Е.А. и др. Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 111—122.

13. Zubov Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н. Управление по выходу спектром линейной динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воуда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 260—263.

14. Бронников А.М., Буков В.Н., Zubov Н.Е., Рябченко В.Н. Алгебраические особенности динамических систем в виде делителей нуля и их передаточных матриц // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 3. С. 28—36.

15. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Олейник А.С. и др. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2014. № 5. С. 3—15.

16. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Управление конечными собственными значениями дескрипторной системы // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 4. С. 381—384.

17. Zubov Н.Е., Vorob'eva Е.А., Mikrin Е.А., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V.N., Timakov S.N. Synthesis of Stabilizing Spacecraft Control Based on Generalized Ackermann's Formula // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2011. Vol. 50. No. 1. P. 93—103.

18. Zubov Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В. Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 14—20.

Ссылка для цитирования

Zubov Н.Е., Рябченко В.Н., Поклад М.Н. Новые формулировки алгебраических критериев управляемости и наблюдаемости линейной МИМО-системы // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 135—137. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-3-135-137.



УДК 621.3.049.771.14

С.В. Волобуев, канд. техн. наук., **В.Г. Рябцев**, д-р техн. наук, проф.
(Волгоградский государственный аграрный университет),

К.В. Евсеев

(Филиал Национального исследовательского университета МЭИ, г. Волжский)

sergey-aspir14@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ DDR3 SDRAM

Предложен мультипроцессорный многоканальный автоматизированный испытательный стенд для верификации Verilog-моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM, который формирует тестовые воздействия для четырёх смежных тактов обращения к микросхеме памяти. Верификация, выполненная в системе автоматизированного проектирования цифровых систем Active-HDL, позволила детально изучить сложный интерфейс связи памяти с контроллером и существенно сократить трудоёмкость проектирования архитектуры мультипроцессорного устройства, предназначенного для выполнения тестового диагностирования микросхем памяти DDR3 SDRAM и модулей памяти, построенных на данных микросхемах.

Ключевые слова: автоматизированная система; верификация; испытательный стенд; модель микросхемы памяти; устройство тестового диагностирования.

A multiprocessor multichannel automated test bench for the verification of Verilog models of DDR3 SDRAM memory chips which forms test influences for four adjacent accessing cycles to the memory chips is proposed. The verification performed in the computer-aided design of digital systems Active-HDL permits to study in detail the complex interface of communication between the memory and the controller and to reduce significantly the complexity of designing the architecture of a multiprocessor device intended for performing test diagnostics of DDR3 SDRAM memory chips and memory modules which is constructed on these chips.

Keywords: automated system; verification; test bench; memory chips model; test diagnostics device.

Введение. Повышение производительности и эффективности информационно-вычислительных систем связано с усложнением архитектуры процессоров, их структуры и расширением функциональных возможностей оперативных запоминающих устройств. Микросхемы памяти DDR3 SDRAM являются третьим поколением микросхем, обеспечивают скорость работы примерно вдвое большую, чем DDR2 SDRAM, и имеют более низкое энергопотребление за счёт использования напряжения источника питания 1,5 В. DDR3 SDRAM имеет восемь банков данных, что обеспечивает более эффективный доступ с чередованием банков, чем в случае применения четырёх банков.

Для обеспечения высокоскоростной работы DDR3 SDRAM использует 8-битную архитектуру предварительной выборки, тогда как в микросхеме DDR2 SDRAM используется 4-битная архитектура предварительной выборки. Ширина шины ядра DRAM больше, чем у шины

ввода-вывода, что позволяет снизить рабочую частоту ядра DRAM, которая составляет всего 1/8 частоты передачи данных интерфейса ввода-вывода. Операция считывания преобразует 8-битные данные, считанные параллельно из ядра DRAM, в последовательные данные и выводит их на порты ввода/вывода синхронно с удвоенной скоростью передачи данных. Операция записи преобразует последовательные данные, которые вводятся на шины ввода-вывода, в параллельные данные и записывает их в ядро DRAM как многобитовые.

В настоящее время фирмы — изготовители микросхем и модулей памяти предоставляют на своих сайтах модели IBIS (I/O Buffer Information Specification), которые содержат спецификацию, описывающую буферы ввода/вывода интегральных схем [1]. Модели IBIS являются стандартом для описания аналогового поведения буферов. Спецификация предоставляет стандартный формат анализиру-

емого файла, состоящий из вольт-амперных характеристик (ВАХ), паразитных характеристик корпуса устройства и информации об измерениях времени для нескольких типов структур ввода/вывода. Модели IBIS предоставляют информацию, которая точно моделирует поведение буфера, но не раскрывают конфиденциальные данные о структуре схемы и принципах её функционирования. Разработчики цифровых систем используют модели IBIS для моделирования целостности сигналов на уровне платы и анализа временных характеристик. Данные модели можно рассматривать как спецификацию моделирования поведения, подходящую для моделирования линий передачи цифровых систем, поэтому они применимы к большинству цифровых компонентов.

Модели IBIS не описывают логику функционирования микросхем памяти, поэтому необходимо проводить моделирование DDR3 SDRAM на языках описания логических систем AHDL, VHDL, Verilog и др., которые можно применять для сквозного функционально-логического проектирования [2]. Для построения контроллера, обеспечивающего сопряжение микросхем памяти DDR3 SDRAM с процессором, необходимо детально изучить сложный интерфейс связи. Для снижения трудоёмкости проектных работ целесообразно применять модели микросхем памяти и выполнять их верификацию с помощью интегрированных систем автоматизированного проектирования цифровых устройств и систем [3—5].

Постановка задач. Целью данной работы является разработка методологии построения автоматизированной системы для верификации моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM, что обеспечит сокращение времени на синтез программ тестов за счёт формирования их мультипроцессорным многоканальным автоматизированным испытательным стендом. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать архитектуру многоканального автоматизированного испытательного стенда для формирования программ тестов верификации моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM;

- создать программную поведенческую модель данного стенда;

- выполнить инициализацию Verilog-модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM;

- выполнить верификацию Verilog-модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM путём записи, считывания и автоматического сравне-

ния принятого пакета данных с эталонными значениями.

Особенности модели микросхемы оперативной памяти. Для исследования применялась базовая Verilog-модель микросхем памяти DDR3 SDRAM фирмы Micron, которую с помощью макросов можно преобразовать в модели памяти ёмкостью от 1 до 8 Гб, с периодом тактового сигнала от 0,938 до 2,5 нс и числом информационных разрядов 4, 8 или 16 бит [6]. В модели были доработаны функции нахождения максимума и минимума переменных, так как применяемая версия компилятора языка Verilog зафиксировала ошибки в данных функциях. Фрагменты программ доработанных данных функций приведены ниже:

```
function integer max;
    input a, b;
    integer a, b;
    begin
max = (a < b)? b: a;
    end
endfunction
function integer min;
    input a, b;
    integer a, b;
    begin
min = (a > b)? b: a;
    end
endfunction
```

Кроме того, в базовой Verilog-модели микросхем уменьшена величина переменной TRAS_MAX до 1E9, вместо указанного значения 80E9, так как был превышен допустимый диапазон объявления целых величин, который позволяет компилятор языка Verilog. Об этом при компиляции проекта было получено сообщение: «Literal represents an out-of-range integer (60000000000)».

После подачи питания на вход res_n напряжения логического нуля в течение минимум 200 мкс при стабильном напряжении питания на входе СКЕ сохраняется состояние логического нуля для установления зарядов опорных элементов микросхемы в установившееся состояние. После отмены действия логического нуля сигнала res_n необходимо подождать ещё 500 мкс, пока СКЕ станет активным. Команды для задания режимов работы микросхемы памяти DDR3 SDRAM приведены в табл. 1.

Для инициализации модели микросхем при низком уровне напряжения на выводах BA0 и BA2 и высоком уровне напряжения на выводе BA1 подаётся команда MRS2 с рекомендуемыми в описании настройками. Затем

Таблица 1

Команды управления режимами работы микросхемы памяти DDR3 SDRAM

Функции	CS_n	Ras_n	Cas_n	WE_n	Примечание
DESELECT — отсутствие команды	1	X	X	X	—
NOP — нет операции	0	1	1	1	—
PRECHARGE — деактивация строки или выбранных строк во всех банках	0	0	1	0	Если A10 = 1, то строки всех банков деактивируются
LOAD MODE REGISTER — загрузка регистра операций	0	0	0	0	Коды BA1-BA0 определяют тип расширения данной команды LMR1-LMR3
AUTO REFRESH or SELF REFRESH — задание способа регенерации	0	0	0	1	Код СКЕ определяет способ регенерации
ACTIVE — активизация: выбор банка и активизация строки	0	0	1	1	—
ZQCL — команда для запуска калибровки ZQ путём подключения к внешнему резистору $240 \pm 1 \% \text{ Ом}$	0	1	1	0	Выполняется при A10 = 1
WRITE — выбрать банк и начать записывать пакет	0	1	0	0	—
READ — выбрать банк и начать считывать пакет	0	1	0	1	—

при низком уровне напряжения на выводе BA2 и высоком уровне напряжения на выводах BA1 и BA0 подаётся команда MRS3 с заданными настройками. Для выполнения команды MRS устанавливается низкий уровень напряжения на выводах BA0...BA2, а коды адреса определяют режим работы микросхемы памяти DDR3 SDRAM при пакетной обработке данных. После подачи команды ZQCL для запуска калибровки ZQ путём подключения выводов к внешним резисторам $240 \pm 1 \% \text{ Ом}$ микросхема памяти DDR3 SDRAM готова к нормальной работе.

Структура автоматизированной системы для верификации моделей. Для верификации модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM составлена программа теста, которая записана в микропрограммную память модели автоматизированного испытательного стенда. Сформированные моделью стенда входные воздействия подаются на входы модели памяти, а реакции на эти воздействия сравниваются с эталонными реакциями. По результатам сравнения делается заключение о корректности модели памяти. Процесс верификации модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM с применением модели автоматизированного испытательного стенда приведён на рис. 1.

Разработана поведенческая модель четырёхканального автоматизированного испытательного стенда, который имеет мультипро-

цессорную структуру и обеспечивает формирование тестовых воздействий для четырёх смежных тактов обращения к микросхеме памяти DDR3 SDRAM [7]. Разработанная архитектура автоматизированного испытательного стенда обеспечивает формирование следующего кортежа векторов [8, 9]:

$$\forall i, i = \overline{0, 3}$$

$$V_i = \{Addr_i, Data_i, SData_i, Copt_i, Copm_i\},$$

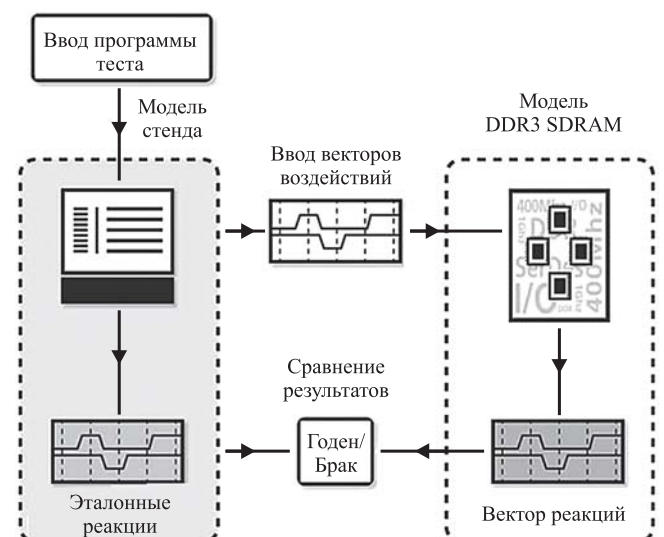


Рис. 1. Процесс верификации модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM

где $Addr_i$ — код адреса для i -го такта обращения к микросхеме памяти; $Data_i$ — код данных для i -го такта обращения к микросхеме памяти; $SData_i$ — код эталонных данных для i -го такта сравнения; $Comp_i$ — код операции стенда для i -го такта обращения к микросхеме памяти; $Comp_i$ — код регистра операций микросхемы памяти для i -го такта обращения.

Для формирования кода адреса применяется следующее множество микроопераций:

$$MO_{addr} = \{A := A; A := notA; A := A + 1; A := A - 1; A := GA; A := NA; A := A + 4; A := A - 4\};$$

где GA — код начального адреса обращения к микросхеме памяти; NA — код конечного адреса обращения к микросхеме памяти.

Для формирования кода данных применяется следующее множество микроопераций:

$$MO_{data} = \{D := D; D := notD; D := D + 1; D := D - 1\}.$$

Сформировано множество команд управления автоматизированным испытательным стендом, приведённое в табл. 2.

Структурная схема четырёхканального формирователя кодов адреса приведена на рис. 2. На его входы поступают управляющие сигналы УС и микрооперации кода адреса МОА. В каждом канале содержатся блок обработки микроопераций, сумматор, увеличивающий текущий код адреса на 4, вычитатель, уменьшающий текущий код адреса на 4, и компаратор, сравнивающий текущие коды адреса с кодами начального и конечного адресов обращения к микросхеме памяти. Коды с выходов компараторов каждого канала поступают на входы мультиплексора, формирующего флаги условных переходов, которые применяются для циклического повторения фрагментов программ тестов.

Формирователь кодов адреса кроме основной функции по выборке ячеек микросхемы памяти применяется также для реализации временной задержки по программе:

```
06 NOP, STNA: = 25
07 STRA, A: = 0
08 NOP, A: = A + 1
09 NOP, JANN, 08
```

Структурная схема четырёхканального блока формирования кодов данных приведена на рис. 3. На его входы поступают управляющие сигналы УС и микрооперации кода данных МОД. В каждом канале содержатся блок об-

Таблица 2

Действия команд управления стендом

Мнемоника	Выполняемые действия
NOOP	Отсутствие операции
JANN	Переход по $A \neq NA$
JXNG	Переход по $A \neq GA$
JUMP	Безусловный переход
JKNZ	Переход по $K \neq 0$ (K — регистр ошибок)
STGA	Занесение начального значения GA
STNA	Занесение конечного значения NA
STRA	Занесение текущего значения регистра адреса A
STRD	Занесение текущего значения регистра данных D

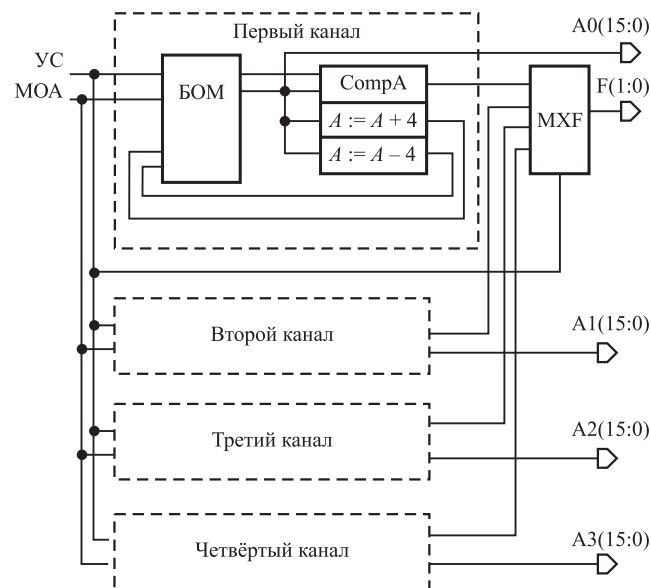


Рис. 2. Структурная схема четырёхканального блока формирования кодов адреса

работки микроопераций и регистр эталонных данных. Коды с выходов блоков обработки микроопераций каждого канала поступают на входы мультиплексора, формирующего пакет кодов выходных данных $Dq(7:0)$. При отсутствии операции записи данных логические элементы, передающие коды данных $Dq(7:0)$, переключаются в третье (отключенное) состояние.

Результаты верификации и перспективы развития системы. Для выполнения верификации модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM выбран режим пакетной обработки данных со следующими параметрами:

Burst Length = Fixed 4 (chop)
 CAS Latency = 6
 Burst Order = Sequential
 Write Recovery = 7
 DLL Reset = Normal
 Power Down Mode = DLL on

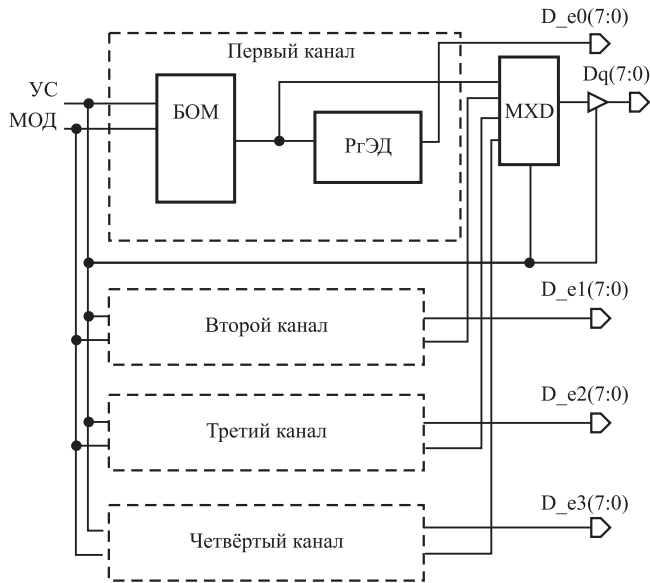


Рис. 3. Структурная схема четырёхканального блока формирования кодов данных

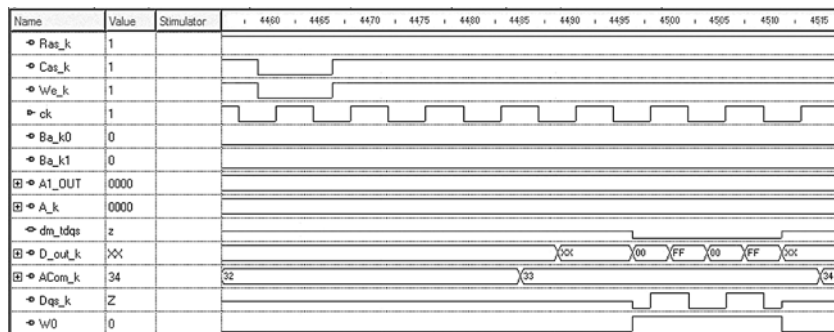


Рис. 4. Временная диаграмма микросхемы в режиме записи данных

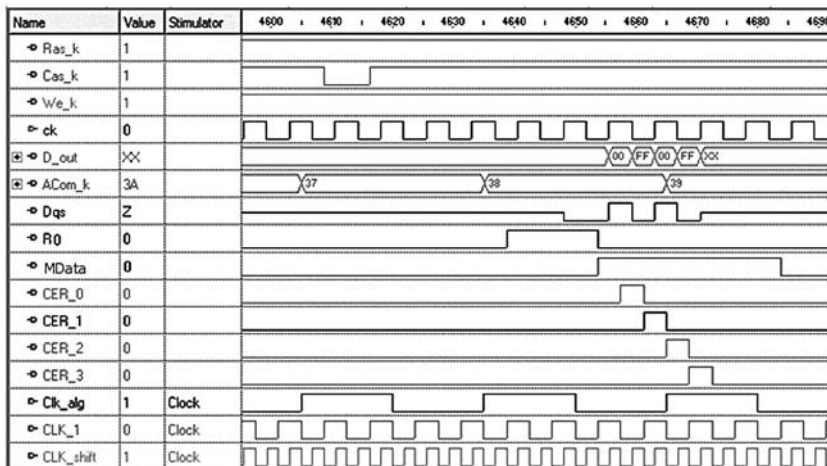


Рис. 5. Временная диаграмма микросхемы в режиме считывания данных

Временная диаграмма формирования основных сигналов в режиме записи пакета данных приведена на рис. 4.

При выполнении моделирования в режиме записи пакета данных, состоящего из четырёх слов, модель микросхемы выдаёт следующие сообщения:

```
WRITE @ DQS = bank = 0 row = 0000
col = 00000000 data = 00;
WRITE @ DQS = bank = 0 row = 0000
col = 00000001 data = ff;
WRITE @ DQS = bank = 0 row = 0000
col = 00000002 data = 00;
WRITE @ DQS = bank = 0 row = 0000
col = 00000003 data = ff.
```

Данные, передаваемые на входы микросхемы памяти, сопровождаются стробом Dqs_k, фронты которого совпадают с центрами сигналов передаваемых данных.

В режиме считывания пакета данных для захвата данных стендом или контроллером микросхема памяти формирует сигнал Dqs_k, фронты которого совпадают с фронтами считанных данных D_out_k. Для преобразования данного сигнала в 4 сигнала, обеспечивающие запись данных в регистры стенда, обычно

применяют управляемые напряжением линии задержки (Voltage-controlled Delay Line) [10]. Однако для упрощения проекта элементами последовательностной логики формируются четыре строба приёма данных CER0...CER3, приведённые на рис. 5.

В результате получены следующие сообщения, подтверждающие корректность верифицируемой модели микросхемы памяти DDR3 SDRAM:

```
READ @ DQS = bank = 0
row = 0000 col = 00000000
data = 00;
READ @ DQS = bank = 0
row = 0000 col = 00000001
data = ff;
READ @ DQS = bank = 0
row = 0000 col = 00000002
data = 00;
READ @ DQS = bank = 0
row = 0000 col = 00000003
data = ff.
```

Заимствование концепции построения архитектуры автоматизированного испытательного стен-

да позволяет спроектировать аппаратный тестер, имеющий высокоскоростной интерфейс, выполняющий тестовое диагностирование микросхем и модулей памяти DDR3 SDRAM.

Выводы. Выполненная верификация подтвердила полноту функциональности микросхемы памяти DDR3 SDRAM после незначительной доработки программы модели. Изменяя программу автоматизированного испытательного стенда, пользователь может генерировать различные типы команд для исследования свойств интерфейса, а также фиксировать моменты времени, в которых ожидаются ответные реакции. Предлагаемую архитектуру автоматизированного испытательного стенда, выполняющего верификацию моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM, можно применять при проектировании мультипроцессорного устройства тестового диагностирования, позволяющего выполнять диагностирование современных быстродействующих микросхем и модулей памяти на рабочей частоте, что повышает достоверность полученных результатов.

Библиографические ссылки

1. **Zhu T., Steer M.B., Franzone P.D.** Accurate and Scalable IO Buffer Macromodel Based on Surrogate Modeling // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2011. Vol. 1. No. 8. P. 1240—1249.
2. **Бибило П.Н., Романов В.И.** Интеграция САПР для синтеза логических схем с использованием глобальной оптимизации // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 1. С. 26—33.
3. **Рябцев В.Г., Евдокимов А.П., Меликов А.В.** Методология построения интегрированной системы для верификации моделей микросхем полупроводниковой памяти // Автоматизация. Современные технологии. Т. 72. № 4. 2018. С. 172—177.
4. **Нанн Г., Дельгуст Ф., Хан А., Верма А., Геден Б.** Методы цифровой верификации для моделирования смешанных СнК в Synopsys VCS и CustomSim // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2014. № 3. С. 118—123.
5. **Melikov A., Evdokimov A., Shubovich A., Volobuev S.** System of Designing Test Programs and Modeling of the Memory Microcircuits / Proc. of East-West & Test International Workshop, Kazan, Russia, September 14—17, 2018. P. 231—236.
6. **DDR3 SDRAM Verilog Model** [Electronic resource]. Access mode: https://www.micron.com/search—results?searchRequest=%7B%22term%22%20%3A%22_verilog%20model%20DDR3%20SDRAM%22%7D (дата обращения: 01.10.2020).
7. **Евдокимов А.П., Рябцев В.Г., Меликов А.В.** Принципы проектирования устройств тестового диагностирования быстродействующих микросхем и модулей полупроводниковой памяти // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. № 2. С. 23—30.
8. **Ryabtsev V., Evseev K., Almadi M.** The Concept of Memory Device Diagnosis Algorithm Design // J. of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). 2016. Vol. 3. Iss. 10. P. 5771—5774.
9. **Ryabtsev V., Almadi M.** New Technology for Memory Tests Design // Intern. J. of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER). 2015. Vol. 02. Iss. 06. P. 520—526.
10. **Patel K.I., Gandhi P.P., Patel N.D., Prajapati J.** Voltage Controlled Delay Line with PFD for Delay Locked Loop in CMOS 90nm // International Journal of Research in Electronics and Communication Technology. 2014. Vol. 1. Iss. 1. P. 25—30.

Ссылка для цитирования

Волобуев С.В., Рябцев В.Г., Евсеев К.В. Автоматизированная система верификации моделей микросхем памяти DDR3 SDRAM // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 3. С. 138—143.

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 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (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/>.



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Метод исследования динамических режимов работы электрогидравлических систем с подвижными границами рабочих жидких сред. *Вестник машиностроения.* 2020. № 12.

Изложен метод исследования динамических режимов работы электрогидравлических систем с подвижными границами рабочих жидких сред «жидкость—газ» или «жидкость—твёрдое тело». Приведены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Оценка стабильности параметров и надёжности энергетического оборудования тепловых электростанций при их производстве и испытаниях. *Вестник машиностроения.* 2020. № 12.

Рассмотрены технологические процессы изготовления лопаток для паровых турбин и их испытания, в том числе вибрационные. Предложен статистический метод контроля стабильности параметров лопаток при изготовлении и испытаниях. Разработана методика контроля стабильности параметров технологических процессов, испытаний и контроля надёжности.

Компьютерный анализ автоподогрева заготовок при выполнении наплавочных работ. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2020. Т. 18. № 12.

Описана методика расчёта температуры при наплавке на поверхность изделия сложной формы путём решения нестационарного и нелинейного уравнения теплопроводности в гетерогенной среде, позволяющего учитывать элементы зажимного приспособления и не описывать многочисленные граничные условия. Приведён пример расчёта температуры разогревания пробки шарового крана при наплавке на сферическую поверхность при спиралевидной и возвратно-поступательной траектории движения

источника теплоты. Рассчитанное изменение температуры подложки в ходе наплавки конкретных изделий позволяет разрабатывать программу корректировки режима наплавки для обеспечения стабильности размеров и свойств наплавляемого слоя.

Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой её краевой части. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2020. Т. 18. № 12.

Рассмотрен способ, заключающийся в реализации процесса обратного выдавливания трубной заготовки в изотермическом режиме штамповки с активным трением. Особенностью способа является одновременное использование сил трения и подталкивание сформированной утолщённой краевой части заготовки и дальнейшее её спрямление. Выполнена оценка силовых режимов и напряжённого состояния в изделии. Приведено сравнение данного способа с классической схемой выдавливания.

Моделирование тепловых процессов при электромеханическом дорновании отверстий в стальных заготовках. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2020. Т. 16. № 12.

Приведены данные по распределению температурных полей при электромеханическом дорновании отверстий в заготовке, полученные в результате моделирования. Расчётные температуры значительно превышают температуры фазовых превращений, однако оплавление структурных составляющих в поверхностном слое заготовки не происходит из-за больших скоростей охлаждения. Зафиксировать экспериментальным путём максимальные температуры процесса не удаётся из-за их малой длительности действия.

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 25.12.2020.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 20.02.2021.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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