

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Буддакова 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
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
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)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова

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

Адрес редакции:

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 74

1
2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

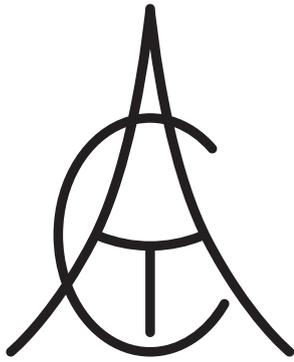
- Куликов О.Е., Шалумов А.С., Шалумов М.А.** АСОНИКА-ЭМС: моделирование электромагнитных процессов конструкций электроники 3
- Ягопольский А.Г., Домнышев А.А.** Мониторинг производственных систем 14
- Загидуллин Р.Р.** Определение оптимальной партии запуска в станочной системе для малых и средних машиностроительных предприятий 16
- Микаева А.С.** Основные этапы формирования стратегии технологического развития предприятия и принципы её разработки 19
- Амиров С.Ф., Болтаев О.Т., Жураева К.К.** Исследование магнитных цепей новых преобразователей усилий 24
- Горбунов А.А., Микаева С.А.** Исследование характеристик влагозащищённых светильников 27

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Яковлева Ю.С., Макаренко Н.Г., Яковлев Е.В.** Мониторинг технического состояния мобильных объектов 32
- Антипин А.Ф., Антипина Е.В.** Многомерный нечёткий интервально-логический регулятор с механизмом предсказания термов 37
- Селезнева М.С.** Подход к определению степени управляемости с использованием свойства дуальности 42

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

- По страницам журналов 47



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

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

EDITORIAL COUNCIL:

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

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

Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK

Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE

Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI

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

Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS

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

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

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 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)

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

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

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 74 $\frac{1}{2020}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Kulikov O.E., Shalumov A.S., Shalumov M.A.** ASONIKA-EMC: modeling of electromagnetic processes in electronics designs . . . 3
- Yagopolskiy A.G., Domnyshev A.A.** Production system monitoring 14
- Zagidullin R.R.** Determination of the optimal launch batch in the machine tool system for small and medium-sized engineering enterprises 16
- Mikaeva A.S.** The main stages of the strategy forming of the enterprise technological development and the principles of its development 19
- Amirov S.F., Boltaev O.T., Zhuraeva K.K.** Research of the magnetic circuits for new force transducers 24
- Gorbulov A.A., Mikaeva S.A.** The characteristics research of waterproof luminaires 27

MODERN TECHNOLOGIES

- Yakovleva Yu.S., Makarenko N.G., Yakovlev E.V.** Monitoring the technical condition of mobile objects 32
- Antipin A.F., Antipina E.V.** Multidimensional fuzzy interval-logic controller with a mechanism for terms predictions 37
- Selezneva M.S.** Approach to determining the controllability degree with use the property of duality 42

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

- On the journals pages 47



УДК 621.396.6.019.3

О.Е. Куликов, канд. техн. наук, **А.С. Шалумов**, д-р техн. наук, проф.,

М.А. Шалумов, канд. техн. наук

(ООО «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)

als@asonika-online.ru

АСОНИКА-ЭМС: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Приведены сведения о программе АСОНИКА-ЭМС, предназначенной для расчётов распределения напряжённости электрического и магнитного полей внутри и снаружи корпусов электронных устройств, а также для определения эффективности экранирования электрического и магнитного полей при воздействии электромагнитных волн в диапазоне частот 10... 30 000 МГц. Описаны функциональные возможности, приведён пример расчёта и анализа результатов расчётов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; электрическое поле; магнитное поле; напряжённость электрического поля; напряжённость магнитного поля; экранирование.

The information about the ASONIKA-EMC program, intended for calculating the distribution of electric and magnetic fields intensity inside and outside of the electronic devices housings, as well as for determining the effectiveness of shielding electric and magnetic fields at effect of the electromagnetic waves in the frequency range 10...30 000 MHz, is adduced. Functional capabilities are described, an example of calculation and analysis of calculation results is adduced.

Keywords: radio engineering device; modeling; electric field; magnetic field; electric field intensity; magnetic field strength; shielding.

АСОНИКА-ЭМС является компьютерной программой (исполняемым модулем с динамически подключаемыми библиотеками и служебными файлами) для работы на персональных 32- или 64-разрядных ЭВМ. АСОНИКА-ЭМС предназначена для расчётов распределения напряжённости электрического и магнитного полей внутри и снаружи корпусов электронных устройств, а также для определения эффективности экранирования электрического и магнитного полей при воздействии электромагнитных волн в диапазоне частот 10...30 000 МГц [1—4].

Для обеспечения сетевой работы АСОНИКА-ЭМС необходимо на сервер, где будет проходить расчёт, установить программу АСОНИКА-ЭМС-сервер и саму программу АСОНИКА-ЭМС.

АСОНИКА-ЭМС-сервер является компьютерной программой (исполняемым модулем с динамически подключаемыми библиотеками и служебными файлами) для работы на персональных 32- или 64-разрядных ЭВМ, предназначенной для удалённого запуска расчётов в АСОНИКА-ЭМС.

При запуске АСОНИКА-ЭМС-сервер автоматически запускает сервер, ожидающий проекта для расчёта, и сворачивается в системный трей.

Развернуть окно программы можно при помощи пункта контекстного меню «Восстановить». В окне программы можно задать следующие параметры:

расположение проектов — директорию, куда будут сохраняться принятые файлы проектов. С помощью кнопки «Обзор» можно указать эту директорию. В пути к директории символы кириллицы не допустимы;

порт для подключения — номер порта, на котором запущен сервер. В настройках клиентской версии должен быть указан тот же порт, что и на сервере.

Также в окне программы имеются следующие кнопки:

«Запустить сервер», «Остановить сервер» — запуск и остановка сервера;

«Скрыть» — свернуть программу в системный трей;

«Применить» — сохранить введённые параметры;

«Выход» — выход из программы.

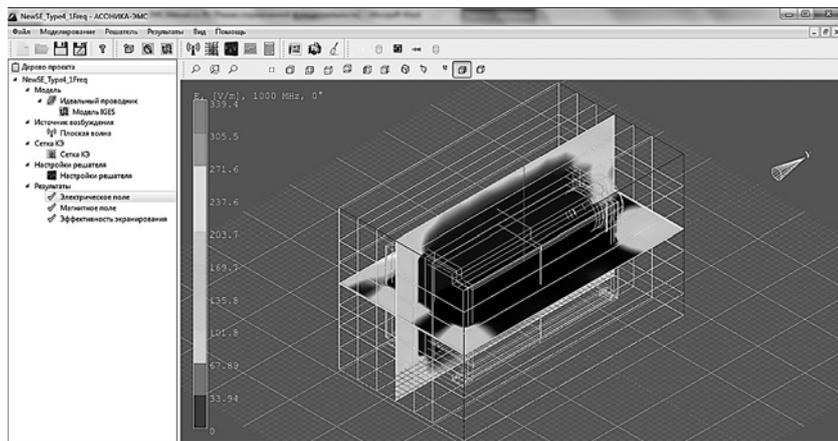


Рис. 1. Графический интерфейс АСОНИКА-ЭМС

Если отметить переключатель «*Запускать вместе с Windows*», то при каждой перезагрузке АСОНИКА-ЭМС-сервер будет запускаться автоматически.

АСОНИКА-ЭМС-сервер позволяет запустить очередь из нескольких проектов на расчёт. Для этого необходимо нажать кнопку «*Добавить проекты...*». Появится стандартное диалоговое окно выбора файлов, в котором необходимо указать файлы проектов АСОНИКА-ЭМС (*.ert). После того как проекты добавлены, их имена отображаются в списке проектов для запуска. Для того чтобы запустить проекты на расчёт, необходимо остановить сервер кнопкой «*Остановить сервер*». Тогда станет активной кнопка «*Запустить*».

Сетевое взаимодействие организовано следующим образом. При запуске расчёта на локальном компьютере формируется файл проекта, который передаётся для расчёта на сервер. АСОНИКА-ЭМС-сервер принимает этот файл и запускает для расчёта АСОНИКА-ЭМС, указывая в качестве входного параметра полученный файл проекта. После завершения расчёта файлы с результатами передаются обратно на локальный компьютер.

Для обеспечения возможности работы АСОНИКА-ЭМС-сервер необходимо отключить сетевой экран (брандмауэр) или настроить его таким образом, чтобы обеспечивалась двусторонняя передача данных через сетевой порт, указанный в настройках АСОНИКА-ЭМС-сервер.

Графический интерфейс обеспечивает ввод и вывод проектных данных и результатов расчёта, а также управление и настройку. Пример проекта АСОНИКА-ЭМС представлен на рис. 1.

Панель меню служит для отображения доступных действий при работе с АСОНИКА-ЭМС.

Панель меню имеет различный вид после запуска АСОНИКА-ЭМС и во время работы с проектом. Рассмотрим некоторые пункты работы меню.

Меню «*Моделирование*». При щелчке левой кнопкой мыши (ЛКМ) по меню «*Моделирование*» открывается меню, представленное на рис. 2. Оно содержит следующие команды:

«*Типовой блок...*» — открывает диалоговое окно выбора вида и ввода геометрических параметров типового блока;

«*Импортировать файл STEP...*» — открывает стандартное диалоговое окно открытия файла, имеющего расширение *.step или *.stp;

«*Импортировать файл IGES...*» — открывает стандартное диалоговое окно открытия файла, имеющего расширение *.iges или *.igs;

«*Настройки модели...*» — открывает диалоговое окно настроек параметров модели.

Меню «*Решатель*». При щелчке ЛКМ по меню «*Решатель*» открывается меню, представленное на рис. 3. Оно содержит следующие команды:

«*Добавить источник возбуждения...*» — запускает мастер настройки параметров источника возбуждения моделируемой структуры;

«*Настройка сетки КЭ...*» — запускает диалоговое окно настройки параметров источника возбуждения;

«*Настройка решателя...*» — открывает диалоговое окно настройки параметров решателя;

«*Запуск на решение*» — запускает процесс решения проекта;

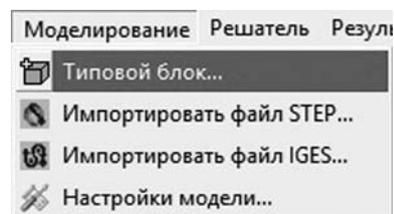


Рис. 2. Меню «*Моделирование*»

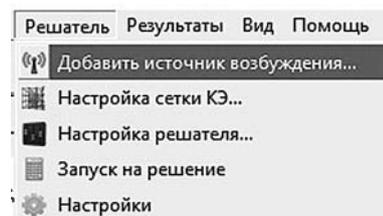


Рис. 3. Меню «*Решатель*»

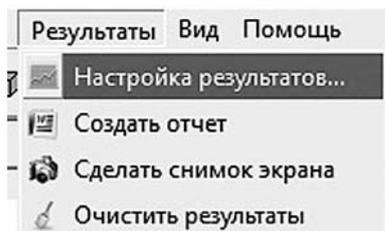


Рис. 4. Меню «Результаты»

«*Настройки*» — открывает диалоговое окно выбора типа решателя (локальный или сетевой).

Меню «Результаты». При щелчке ЛКМ по меню «Результаты» открывается меню, представленное на рис. 4. Оно содержит следующие команды:

«*Настройка результатов...*» — открывает диалоговое окно настройки отображаемых результатов: частоты и фазы отображаемых магнитных и электрических полей, настройки интерполяционных плоскостей и расчёта эффективности экранирования. При щелчке ЛКМ по пункту «Электрическое поле» или «Магнитное поле» в дереве проекта в рабочей области отображается поле на частоте и фазе, указанных в этом диалоговом окне;

«*Создать отчёт*» — создаёт отчёт о моделировании в формате *.doc. Создание отчёта доступно только после успешного решения проекта;

«*Сделать снимок экрана*» — сохраняет рабочую область в виде изображения с именем %Имя_проекта%.bmp в папке с файлом проекта, о чём выводится сообщение;

«*Очистить результаты*» — очищает рабочую область от картины напряжённостей электрического и магнитного полей, оставляя только исходную модель.

Первым шагом при работе с проектом является создание трёхмерной модели конструкции корпуса электронной аппаратуры (ЭА). В зависимости от сложности конструкции её можно представить в виде типового блока, создаваемого непосредственно в АСОНИКА-ЭМС, или импортировать её трёхмерную модель из сторонней САД-системы через формат STEP или IGES.

Для того чтобы добавить в проект модель типового блока, необходимо выбрать пункт «Типовой блок...» в меню «Моделирование», или нажать кнопку  на панели

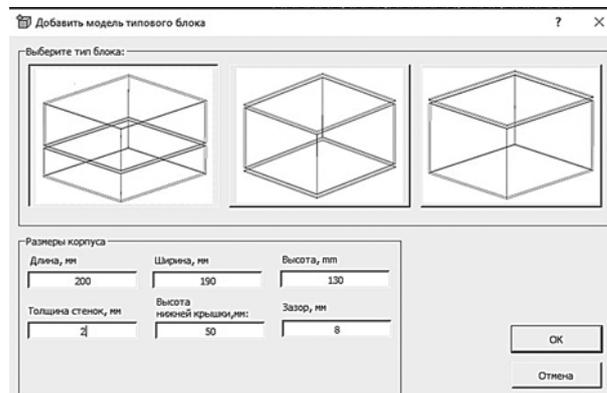


Рис. 5. Диалоговое окно добавления модели типового блока

инструментов. Появится диалоговое окно, представленное на рис. 5. В этом окне можно выбрать один из трёх видов типовых корпусов, представленных в виде кнопок с рисунками, и задать его геометрические размеры. После нажатия кнопки «ОК» трёхмерная модель типового блока с окружающим воздушным пространством на экране отобразится в рабочей области и появится соответствующий пункт в дереве проекта (рис. 6).

Если корпус ЭА невозможно представить в виде типового блока, то можно импортировать трёхмерную модель из сторонней САД-системы через формат STEP или IGES. Для того чтобы импортировать модель в проект в формате STEP или IGES, необходимо выбрать пункт «Импортировать файл STEP...» или «Импортировать файл IGES...» в меню «Моделирование» или нажать кнопку  или  на панели инструментов. Появится стандартное диалоговое окно выбора файла с расширением *.stp, *.step или *.igs, *.iges. После успешного импортирования трёхмерная модель отобра-

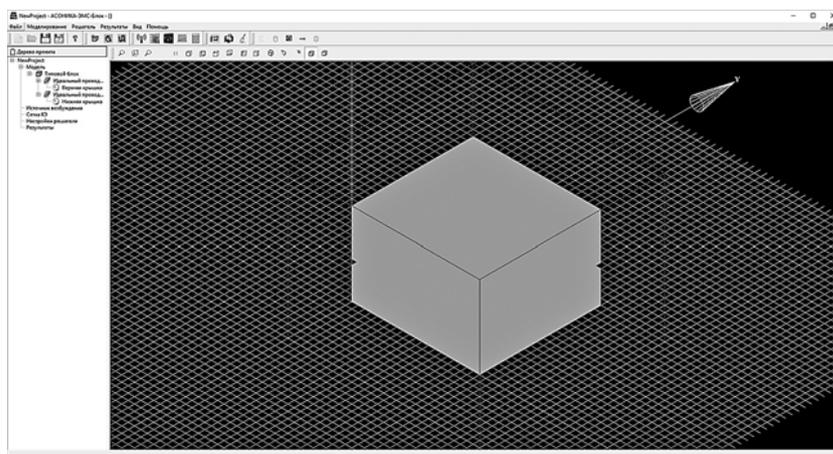


Рис. 6. Главное окно после добавления модели типового блока

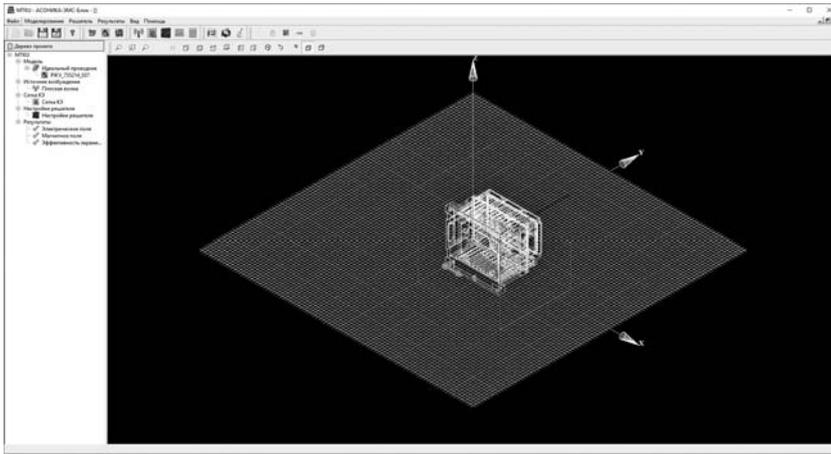


Рис. 7. Главное окно после импорта модели



Рис. 8. Окно выбора материала модели в подсистеме АСОНИКА-ЭМС

зится в рабочей области (рис. 7). В случае ошибки импорта на экран будет выведено соответствующее сообщение.

Если импортируется файл формата STEP, состоящий из нескольких деталей, то материал и названия этих деталей отображаются в дереве проекта (см. рис. 7). При импорте файла из САД-системы необходимо убедиться, что названия деталей модели записаны латиницей.

После создания типового блока или импорта конструкции можно произвести настройку параметров модели. Для этого необходимо выбрать пункт меню «Моделирование» / «Настройки модели». Откроется окно, в котором можно задать толщину воздушного слоя между моделью и счётной областью. Толщина воздушного слоя должна быть не менее $\lambda/(2\pi)$ (λ — длина волны в среде, в которой ищется решение). Следует помнить, что увеличение толщины воздушного слоя приводит к росту времени расчёта.

АСОНИКА-ЭМС позволяет задавать для модели различные материалы и электрофизические параметры. При работе с моделями типовых блоков можно задать различный материал для каждой из крышек модели. При работе с импортированными моделями фор-

мата STEP материал можно задать для каждой детали модели. Для моделей формата IGES материал можно задать только целиком для всей модели. Электрофизические параметры материалов хранятся в единой справочной базе данных (БД) АСОНИКА. Для того чтобы задать материал модели, необходимо в контекстном меню, вызываемом щелчком правой кнопкой мыши (ПКМ) по модели в рабочей области, выбрать пункт «Материал» либо нажать кнопку  на панели инструментов. В появившемся окне надо выбрать материал из перечня и нажать кнопку «ОК» (рис. 8).

Если в перечне нет материала с необходимыми свойствами, можно воспользоваться редактором БД АСОНИКА, вызываемым нажатием кнопки «Редактировать материалы», для создания собственного материала, который затем будет отображаться в перечне.

В редакторе БД АСОНИКА предусмотрена возможность редактирования существующих и добавления новых материалов. На рис. 9 представлено окно ввода электрофизических параметров вновь добавляемого материала.

Следующим шагом после создания модели конструкции является задание параметров источника электромагнитного воздействия (возбуждения). Для того чтобы добавить в проект источник возбуждения, необходимо выбрать пункт «Добавить источник возбуждения...» в меню «Решатель» или нажать кнопку  на

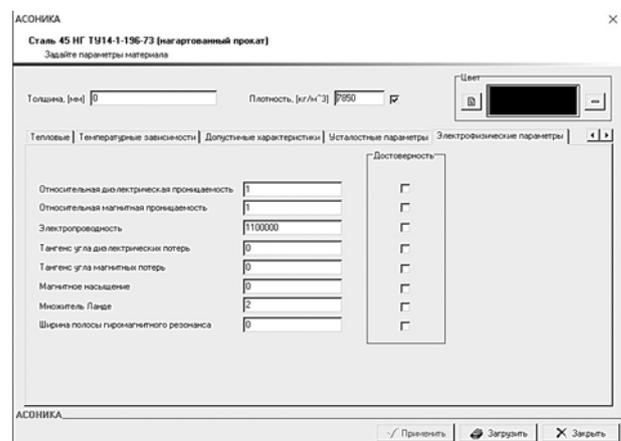


Рис. 9. Окно редактирования электрофизических параметров материала в редакторе БД АСОНИКА

панели инструментов. Появится первое окно мастера задания источника возбуждения.

В первом окне мастера выбирается тип падающей волны. Во втором окне выбирается позиция источника возбуждения в координатах рабочей области. При нажатии кнопки «Далее» появится окно задания величин векторов волны.

При нажатии кнопки «Завершить» в дереве проекта появляется пункт «Источник возбуждения», который можно увидеть на рис. 1.

После задания источника возбуждения нужно задать параметры сетки конечных элементов (КЭ). Для того чтобы задать параметры сетки, необходимо выбрать пункт «Настройка сетки КЭ...» в меню «Решатель» или нажать кнопку  на панели инструментов. Появится окно, в котором можно задать один из двух типов ограничений сетки: по длине элемента и по числу элементов. При ограничении длины элемента в расчётной области не появятся элементы, длина которых превышает заданное значение. При ограничении числа элементов общее число КЭ в расчётной области не превысит заданное значение. После нажатия кнопки «ОК» в дереве проекта появится пункт «Сетка КЭ» (данный пункт можно увидеть на рис. 1).

Одним из самых важных и ответственных шагов при создании проекта является настройка параметров решателя. Для того чтобы задать параметры решателя, необходимо выбрать пункт «Настройка решателя...» в меню «Решатель» или нажать кнопку  на панели инструментов. Появится окно, представленное на рис. 10.

Настройка решателя позволяет задать такие параметры, как частота расчёта, порядок базисных функций, задать диапазон частот. Также на этом этапе проводится настройка адаптивного анализа.

Адаптивный процесс генерирования сетки КЭ решателем состоит из следующих шагов:

1) генерируется начальная сеть, которая в прямом смысле включает установки аппроксимации поверхности;

2) если требуется уплотнение сетки разбиения на основе длины волны (λ refinement), решатель выполняет это, используя рассчитанную в материале длину волны;

3) вычисляются режим разбиения и степень уплотнения сетки;

4) используя полученную сетку разбиения, решатель вычисляет методом конечных элементов электромагнитные поля, которые существуют внутри структуры, когда они возбуждаются на частоте решения;

5) генерируется другое решение с использованием уплотнённой сетки;

6) решатель повторно вычисляет ошибку, и итеративный процесс (решение — анализ ошибок — адаптивное усовершенствование) повторяется до тех пор, пока не удовлетворяются критерии сходимости или не выполняется максимальное число адаптивных проходов, заданное в настройках решателя;

7) если задаётся расчёт в диапазоне частот, то решатель решает задачу на других частотах без дальнейшего уплотнения сетки разбиения. Адаптивное решение выполняется только на указанной частоте решения.

После нажатия кнопки «ОК» в дереве проекта появится соответствующий пункт, который можно увидеть на рис. 1.

После настройки решателя нужно выбрать результаты расчётов, которые необходимо отобразить. Для того чтобы задать параметры отображаемых результатов, необходимо выбрать пункт «Настройка результатов...» в меню «Результаты» или нажать кнопку  на панели инструментов. Появится окно, представленное на рис. 11. В этом окне выбираются параметры отображаемых полей (частота и фаза), интервал между интерполяционными плоскостями (на которые выводятся картины распределения напряжённости поля). При выборе переключателя

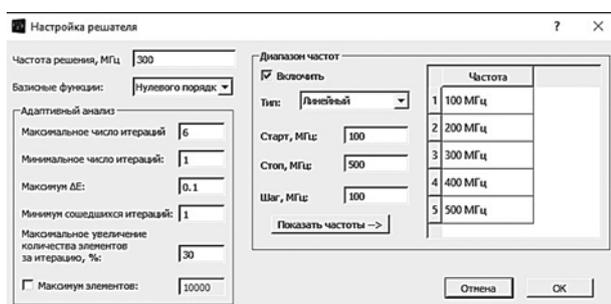


Рис. 10. Окно настроек решателя

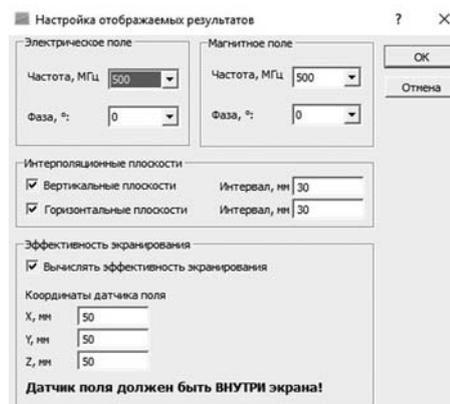


Рис. 11. Окно настроек отображаемых результатов

теля «Вычислять эффективность экранирования» необходимо ввести координаты датчика поля. Датчик поля отображается в графическом окне в виде шара жёлтого цвета.

Расчёт эффективности экранирования происходит следующим образом. Сначала проводится расчёт напряжённости поля в отсутствие модели. Напряжённость поля в точке с координатами датчика запоминается. Затем проводится расчёт с моделью и вычисляется соотношение напряжённостей полей в присутствии и отсутствии модели. Поэтому очень важно правильно подобрать координаты датчика поля. Он должен обязательно находиться внутри корпуса электронного блока и как можно ближе к его геометрическому центру. Иначе расчёт эффективности экранирования может быть неточным.

После нажатия кнопки «ОК» в дереве проекта появятся соответствующие пункты с результатами, которые можно увидеть на рис. 1.

В АСОНИКА-ЭМС существует возможность использования как локального решателя, установленного на компьютере пользователя, так и удалённого, установленного на компьютере в локальной сети или в сети интернет. Для выбора типа решателя необходимо выбрать пункт «Настройка» в меню «Решатель». Появится диалоговое окно с двумя вкладками:

1) «*Локальный решатель*». По умолчанию АСОНИКА-ЭМС производит расчёт, используя решатель, установленный на локальном компьютере. В этом случае указываются расположение решателя и опции командной строки его запуска. Программа сама определяет, какие версии расчётного ядра установлены на компьютере, и даёт возможность выбора только установленных версий;

2) «*Расчёт на удалённом компьютере*». Если выбран переключатель «Разрешить расчёт на удалённом компьютере», АСОНИКА-ЭМС производит расчёт, используя решатель, установленный на удалённом сервере, через локальную сеть или интернет. Здесь указываются IP-адрес сервера и порт (уточняйте эти данные у системного администратора вашей сети). Программа автоматически проверяет соединение с сервером. При успешном соединении программа в строке статуса выдаёт несколько сообщений, в зависимости от состояния сервера.

После того как все данные проекта введены, можно запустить проект на решение. Для этого необходимо выбрать пункт «Запуск на решение» в меню «Решатель» или нажать

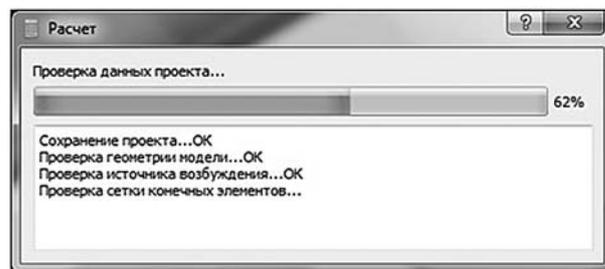


Рис. 12. Окно расчёта

кнопку  на панели инструментов. Появится окно, представленное на рис. 12.

Перед расчётом проект сохраняется и проводится проверка введённых пользователем данных, что отображается в окне расчёта (см. рис. 12). Затем запускается непосредственно расчёт. Расчёт электромагнитного поля требует больших вычислительных ресурсов, поэтому перед началом расчёта необходимо закрыть все остальные приложения, запущенные на компьютере.

В случае успешного завершения расчёта выводится соответствующее сообщение и пункты результатов в дереве проектов принимают вид, показанный на рис. 1.

Для того чтобы посмотреть полученные результаты расчётов, нужно щёлкнуть ЛКМ по желаемому пункту в дереве проекта.

Электрическое поле. Для того чтобы увидеть распределение напряжённости электрического поля в конструкции, нужно щёлкнуть ЛКМ по пункту «Электрическое поле» в дереве проекта. В рабочей области отобразится картина распределения напряжённости электрического поля.

Напряжённость поля в АСОНИКА-ЭМС отображается с помощью секущих плоскостей, на которых изображён цветовой градиент. Цвета градиента напряжённости поля расшифровываются на цветовой карте слева.

Магнитное поле. Для того чтобы увидеть распределение напряжённости магнитного поля в конструкции, нужно щёлкнуть ЛКМ по пункту «Магнитное поле» в дереве проекта. В рабочей области отобразится картина распределения напряжённости магнитного поля.

Эффективность экранирования. Для того чтобы получить эффективность экранирования конструкции, нужно щёлкнуть ЛКМ по пункту «Эффективность экранирования» в дереве проекта. Появится окно с координатной сеткой. Если в настройках решателя задан диапазон частот, то в этом окне отобразятся графики эффективности экранирования

электрического и магнитного полей в зависимости от частоты. Если же была задана одна частота решения, то в координатной сетке отобразятся две точки, соответствующие эффективности экранирования электрического и магнитного полей на данной частоте.

Для того чтобы создать отчёт о моделировании, необходимо выбрать пункт «Создать отчёт» в меню «Результаты» или нажать кнопку  на панели инструментов. Откроется окно программы Microsoft Word, в котором будет открыт файл отчёта, где содержатся все данные, введённые пользователем, а также результаты расчётов: картины напряжённости электрического и магнитного полей, эффективность экранирования. Для дальнейшей работы с отчётом файл необходимо сохранить.

Практические рекомендации по работе с АСОНИКА-ЭМС. Корпусы современной ЭА имеют довольно сложную конструкцию — состоят из двух и более крышек, имеют скругления, рёбра, отверстия произвольной формы, проушины для крепления.

Первым шагом при работе с проектом, созданным в АСОНИКА-ЭМС, является создание трёхмерной модели исследуемой конструкции корпуса ЭА. В зависимости от сложности конструкции её можно представить в виде типового блока, создаваемого непосредственно в АСОНИКА-ЭМС, или импортировать трёхмерную модель из сторонней САД-системы через формат STEP или IGES. Для того чтобы определиться с типом создаваемой модели в АСОНИКА-ЭМС, необходимо провести анализ конструкции корпуса ЭА по специально разработанному алгоритму.

Первым шагом данного алгоритма является определение диапазона частот поля ($f_{\min} \dots f_{\max}$), воздействию которого будет подвергаться корпус. Диапазон частот воздействий при испытаниях на устойчивость к электромагнитному полю указан в соответствующих ГОСТах по ЭМС. Для каждого типа аппаратуры (оборудование информационных технологий или электроэнергетическое оборудование) и места её применения (на подвижном объекте или стационарно) существует соответствующий стандарт, определяющий диапазон частот воздействующего электромагнитного излучения.

Вторым шагом является исключение из трёхмерной модели корпуса выступающих частей. Такими частями обычно бывают рёбра охлаждения, ручки для переноски, проушины для крепления и т. п. Выступающие части не оказывают влияния на поле внутри корпуса,

поэтому их можно исключать из модели для уменьшения числа конечных элементов.

Третий шаг — анализ несквозных отверстий и различных канавок на стенках корпуса. Если толщина стенки корпуса под отверстием больше толщины скин-слоя (глубины проникновения поля в металл) на частоте f_{\min} , то данное отверстие можно исключить из модели. Толщина скин-слоя Δ на частоте f определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad (1)$$

где μ , σ — абсолютная магнитная и удельная проводимости металла соответственно.

Затем проводится анализ сквозных отверстий в стенках корпуса. Отверстие в металлической стенке представляет собой волноводный фильтр с частотой среза $f_{\text{ср}}$, рассчитываемой по формулам

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{D}, \quad (2)$$

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{W}. \quad (3)$$

По формуле (2) можно рассчитать частоту среза $f_{\text{ср}}$, МГц, для круглого отверстия (D — диаметр отверстия, мм), а по формуле (3) — для прямоугольного (W — наибольший размер отверстия, мм).

Если рассчитанная частота среза много больше f_{\max} , то отверстие можно исключить из модели, так как колебания с частотой ниже частоты среза значительно ослабляются и практически не влияют на картину поля внутри корпуса. Например, для круглого отверстия диаметром 5 мм частота среза будет равна 35 ГГц, что значительно превышает максимальную частоту воздействующего поля, которая обычно не превышает 5 ГГц. Таким образом, такое отверстие можно исключить из модели.

Если на рёбрах исследуемого корпуса имеются фаски, то в модели, предназначенной для электромагнитного анализа, их делать не стоит, так как это потребует использования дополнительных конечных элементов, что приведёт к необоснованному увеличению времени расчёта без существенного увеличения точности.

Полученная модель анализируется. Если в ней не осталось отверстий, а сама она по форме подходит под один из имеющихся в АСОНИКА-ЭМС вариантов типовых корпусов, например приведённых на рис. 5, то кор-

пус ЭА можно представить в виде такого типового корпуса. Это значительно сократит время расчёта эффективности экранирования.

Если же модель имеет нетиповую форму, то её можно импортировать в подсистему с помощью форматов обмена данными STEP или IGES, применяющихся в САД-системах.

При создании типового блока и при импортировании модели из сторонних САД-систем по умолчанию назначается материал «идеальный проводник» (Perfect Electric Conductor, PEC). Это материал с относительной диэлектрической проницаемостью и относительной магнитной проницаемостью, равными единице, и проводимостью, стремящейся к бесконечности. Поле внутри такого материала не вычисляется, что значительно увеличивает скорость расчёта. Большинство металлов в задачах экранирования можно представить как идеальный проводник.

Типовой блок позволяет назначить разные материалы для разных деталей корпуса, а импортированная модель — только один материал для всей конструкции.

Когда построена трёхмерная модель исследуемого корпуса, встаёт вопрос о передаче электромагнитной энергии в структуру, т. е. о её возбуждении. В вычислительной электродинамике существует несколько способов ввода энергии в вычислительный объём, зависящих от типа решаемой задачи: волноводный порт, дискретный порт, падающая волна, источник напряжения, источник тока, внутреннее поле смещения. В задачах нахождения наведённого поля внутри замкнутых структур, какими являются корпуса ЭА, используется только возбуждение падающей волной.

Для решения трёхмерных задач электродинамики в АСОНИКА-ЭМС используется метод конечных элементов (Finite Element Method). Основа метода состоит в том, что пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдра. Размер тетраэдра должен быть достаточно мал для того, чтобы поле в его пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами. Эти коэффициенты находятся из уравнений Максвелла и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов. Однако в ходе разбиения форма отдельных элементов структуры искажается. Это относится, в первую очередь, к элементам, имеющим искрив-

лённую поверхность. Поэтому ограничения на размер тетраэдра накладываются не только точностью определения поля, но и точностью аппроксимации исходной структуры новой структурой, составленной из тетраэдров.

Между размером ячейки, желательным уровнем точности и имеющимися в наличии вычислительными ресурсами существует противоречие. С одной стороны, точность решения зависит от того, насколько мал каждый из отдельных конечных элементов (тетраэдров). Решения, при которых используется большое число элементов, более точны, чем решения, выполненные с помощью крупных ячеек, когда используется относительно немного элементов. Самым эффективным критерием для выбора размеров ячейки является критерий малой вариации поля в её пределах. В этом случае поле может быть корректно аппроксимировано линейной функцией. Скорость изменения поля зависит от рабочей частоты и неоднородности среды. С другой стороны, решение задачи при большом числе ячеек требует применения быстродействующих процессоров и большого объёма оперативной памяти. Поэтому необходимо искать компромисс между точностью решения и ресурсами, необходимыми для её реализации.

Разбиение объекта на элементарные ячейки — тетраэдры является самостоятельной достаточно сложной задачей. Чтобы получить оптимальную сетку, в АСОНИКА-ЭМС используется итерационный процесс, в котором шаг между ячейками автоматически уменьшается в критических областях. На первом этапе для построения тетраэдров используются вершины объектов анализируемой структуры, которые играют роль вершин тетраэдров. Таким образом, создается начальное разбиение, для которого находится грубое распределение поля. Анализ этого поля позволяет установить наличие областей, в которых поле имеет большую скорость изменения. После выявления таких областей программа осуществляет повторное разбиение, которое уже содержит ячейки меньшего размера в критических областях. При этом в качестве вершин новых тетраэдров используются узлы координатной сетки. Далее электродинамическая задача решается повторно для нового разбиения. Процедура повторяется до полной сходимости процесса.

Однако необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. Разные электродинамические параметры имеют разную скорость сходимости. Наибольшую осторожность следует

соблюдать, когда речь идёт о вычислении потерь в структурах, содержащих металлические рёбра, например рёбра охлаждения корпусов ЭА. Потери и связанные с ними величины — затухание в линии передачи, добротность резонатора и т. д. — могут очень сильно изменяться в зависимости от точности аппроксимации тока вблизи металлического ребра. Иногда речь идёт не о процентах и даже не о десятках процентов, а о разгах. В то же время для той же структуры некоторые S-параметры могут реагировать на размер ячейки значительно слабее. Следовательно, необходимо вручную задавать ограничения для итерационного процесса разбиения структуры на конечные элементы. Следует помнить, что появление в счётной области ячеек с размерами, большими $\lambda/10$ (λ — длина волны в среде, в которой ищется решение), нежелательно.

Как указывалось, в АСОНИКА-ЭМС возможно задать один из двух типов ограничений сетки: по длине элемента и по числу элементов. При ограничении длины элемента в расчётной области не появятся элементы, длина которых превышает заданное значение. При ограничении числа элементов общее число КЭ в расчётной области не превысит заданное значение.

При настройке параметров решателя в АСОНИКА-ЭМС можно изменить следующие параметры:

частоту решения. На этой частоте проводится расчёт электромагнитного поля в структуре. Если задан диапазон частот решения, то адаптивное разбиение геометрии проводится только на этой частоте. Для остальных частот используется эта же сетка. Поэтому при задании диапазона частот наиболее точное решение будет получено вблизи этой центральной частоты;

базисные функции. Изменение порядка базисных функций от первого порядка к линейным базовым функциям (нулевому). Если выбраны базисные функции нулевого порядка, то все тетраэдры в модели должны иметь длины границ меньше, чем $1/20$ от длины волны;

максимальное число итераций. Это максимальное число уплотнений ячеек, которое может выполняться в процессе решения. Данная величина — критерий остановки процесса уплотнения: если выполнено максимальное число итераций, анализ останавливается. Если нет, то адаптивный анализ будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки. Обычно используется значение этой величины между 3 и 6;

минимальное число итераций. Адаптивный анализ не будет остановлен, пока заданное минимальное число проходов не будет достигнуто, несмотря на критерий сходимости;

максимум ΔE . Величина ΔE — изменения решения (значение E поля), или относительная ошибка от одного адаптивного прохода до следующего. Установленное значение максимума ΔE — критерий остановки адаптивного решения. Если ΔE меньше этого значения, адаптивный анализ останавливается и программа выполняет решение в диапазоне частот. Иначе процесс продолжается, пока не будут достигнуты критерии сходимости;

минимум сошедшихся итераций. Адаптивный анализ не будет остановлен, несмотря на то, что установленное число проходов было достигнуто. Критерий сходимости должен быть удовлетворён по крайней мере для заданного числа проходов перед тем, как адаптивный анализ будет остановлен;

максимальное увеличение числа элементов за итерацию, %. Эта величина определяет, сколько тетраэдров добавляется на каждом шаге уплотнения в адаптивном процессе. Тетраэдры с наиболее высокой ошибкой будут уменьшены в размере;

максимум элементов. Адаптивный анализ остановится при достижении заданного числа элементов.

Эффективность экранирующих устройств ориентировочно может быть оценена следующим образом. Если эффективность экранирования a_s не выше 10 дБ, то экранирование, как правило, недостаточно. При $10 < a_s < 30$ дБ удовлетворяются минимальные требования по экранированию.

Для многих случаев достаточно, если $30 < a_s < 60$ дБ. Если $60 < a_s < 90$ дБ, то имеет место хорошее экранирование, а при $90 < a_s < 120$ дБ можно говорить о предельно хорошем экранировании.

Следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия отверстий в стенке экрана (кабельных вводов и отверстий для элементов обслуживания и сигнализации), а также то, что внутри экранированных объёмов могут возникать резонансные эффекты, так как любой корпус прибора с проводящими стенками можно рассматривать как объёмный резонатор.

Пример расчёта. Пусть имеется вариант конструкции блока, который представлен на рис. 13. В техническом задании на изделие сказано, что эффективность экранирования кор-

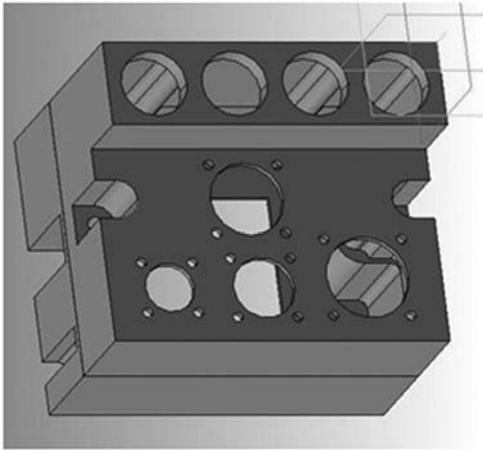


Рис. 13. Исследуемый корпус

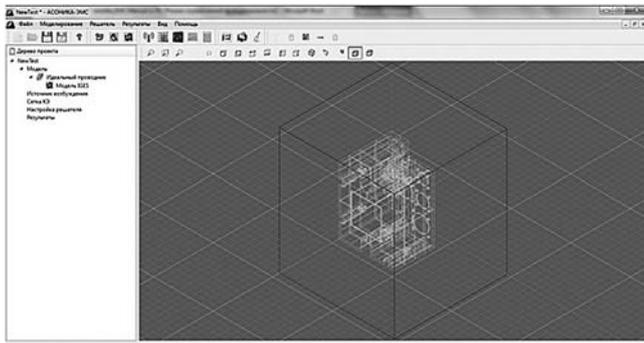


Рис. 14. Модель корпуса импортирована в АСОНИКА-ЭМС

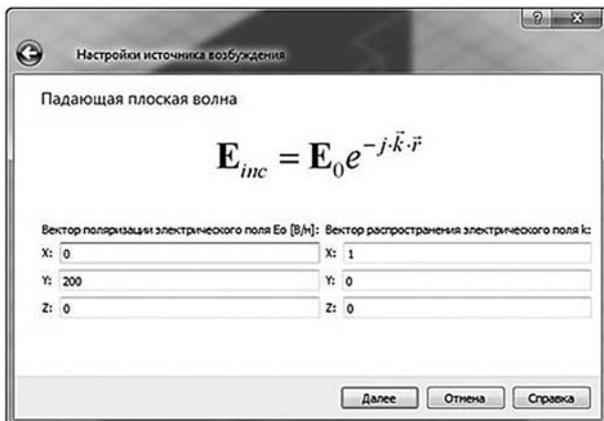


Рис. 15. Ввод параметров воздействий

пусом прибора электромагнитных полей должна быть не ниже 15 дБ на частотах от 1000 до 3000 МГц при воздействии плоской электромагнитной волны, распространяющейся вдоль плоскости корпуса, создающей напряжённость поля 200 В/м.

После того как создан новый проект в АСОНИКА-ЭМС, необходимо провести анализ конструкции корпуса ЭА. Как следует из рис. 13, корпус имеет нетиповую фор-

му, что предполагает импорт конструкции в АСОНИКА-ЭМС через формат STEP или IGES. После импорта трёхмерная модель конструкции корпуса отобразится в рабочей области главного окна АСОНИКА-ЭМС (рис. 14).

Следующим шагом будет ввод параметров возбуждения с помощью мастера ввода параметров воздействий. В рассматриваемом примере введены данные из технического задания (рис. 15).

Теперь необходимо настроить сетку конечных элементов. Задано ограничение числа КЭ 100 000. Этого вполне хватит для корректного расчёта электромагнитного поля внутри корпуса.

Проводится настройка параметров решателя и задаются отображаемые результаты. В окне настройки решателя задан диапазон частот от 1000 до 3000 МГц. В окне настройки отображаемых результатов отмечены все возможные результаты: электрические и магнитные поля и эффективность экранирования.

Проводится расчёт. В результате получены картины напряжённости магнитного поля (рис. 16) и электрического поля (рис. 17), а также графики эффективности экранирования на рассчитанных частотах (рис. 18).

Из графиков следует, что эффективность экранирования корпуса не соответствует требованиям технического задания на частотах выше 2200 МГц.

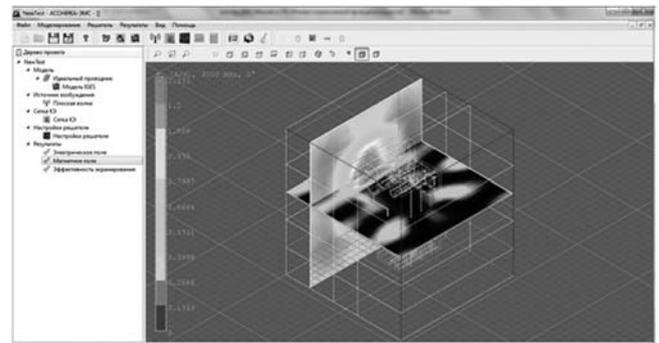


Рис. 16. Напряжённость магнитного поля

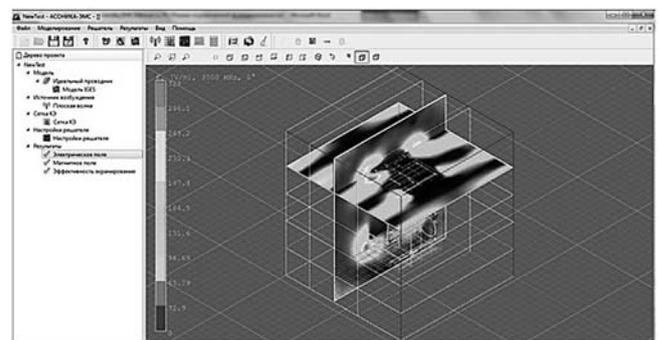


Рис. 17. Напряжённость электрического поля

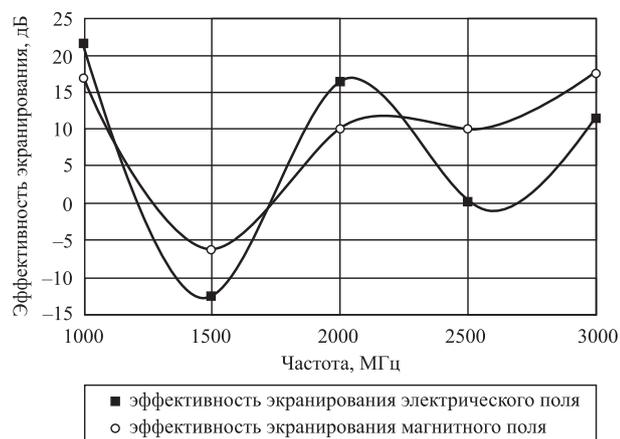


Рис. 18. Графики эффективности экранирования магнитного и электрического полей на частотах от 1000 до 3000 МГц

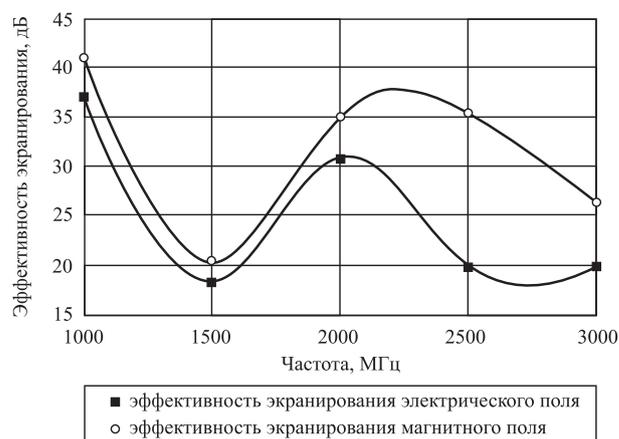


Рис. 21. Графики эффективности экранирования изменённой конструкции магнитного и электрического поля на частотах от 1000 до 3000 МГц

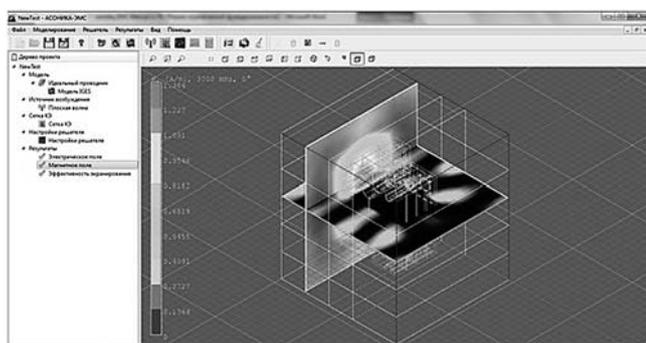


Рис. 19. Напряжённость магнитного поля после внесения изменений в конструкцию

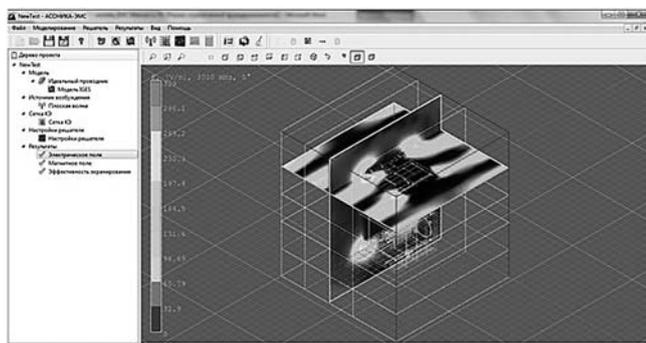


Рис. 20. Напряжённость электрического поля после внесения изменений в конструкцию

Проведён анализ проблемных участков конструкции. Корпус блока выполнен из алюминия, который является хорошим проводником (проводимость $3,8 \cdot 10^7$ См·м), однако имеет множество сквозных отверстий, которые негативно сказываются на качестве экранирования (см. рис. 13). Закроем прямоугольное отверстие в днище корпуса листом проводящего материала, например проводящего стекла.

Импортируем изменённую модель в АСОНИКА-ЭМС и повторно проведём рас-

чёт эффективности экранирования корпуса с теми же параметрами. В результате получены картины напряжённости магнитного поля (рис. 19) и электрического поля (рис. 20), а также графики эффективности экранирования на рассчитанных частотах (рис. 21).

Видно, что после внесения изменений в конструкцию эффективность экранирования повысилась и по электрическому, и по магнитному полю. Требование технического задания выполнено: эффективность экранирования корпусом прибора электромагнитного поля не ниже 15 дБ на частотах от 1000 до 3000 МГц.

Библиографические ссылки

1. Шалумов А.С., Шалумов М.А. Опыт применения автоматизированной системы АСОНИКА в промышленности Российской Федерации. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2017. 422 с.
2. Шалумов М.А., Шалумов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.
3. 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.
4. 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.

Ссылка для цитирования

Куликов О.Е., Шалумов А.С., Шалумов М.А. АСОНИКА-ЭМС: моделирование электромагнитных процессов конструкций электроники // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 3—13.

УДК 658.562.3

А.Г. Ягопольский, А.А. Домнышев

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

domnyshev_andrev@rambler.ru

МОНИТОРИНГ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены основные тенденции развития инструментов мониторинга производственных систем. Описаны проблемы, связанные с хранением и обработкой большого количества данных, поступающих с различных компонентов технологических систем. Приведены примеры решений для промышленных систем сбора и обработки данных, предлагаемые российскими компаниями.

Ключевые слова: мониторинг оборудования; большие данные; датчик; управление предприятием.

The main trends of the tools development for monitoring production systems are considered. The problems associated with the storage and processing of a large data amount coming from various components of technological systems are described. The solution examples of industrial systems for acquisition and processing data offered by Russian companies are given.

Keywords: equipment monitoring; big data; sensor; enterprise management.

Важнейшим фактором эффективной экономической деятельности промышленного предприятия является мониторинг производственного оборудования и персонала. Мониторинг станочного оборудования позволяет решать большое число задач, среди которых контроль загрузки оборудования, выявление узких мест технологической цепи, предотвращение аварийных ситуаций, контроль выполнения управляющей программы (УП), контроль состояния оборудования.

Выявление выпуска бракованной продукции также может осуществляться с помощью мониторинга станочного оборудования. Например, диагностика одной из распространённых причин брака при обработке деталей на металлорежущем оборудовании — износа режущего инструмента может осуществляться косвенными методами, среди которых измерение колебаний технологической системы, электрической проводимости контакта инструмент—деталь, крутящего момента и мощности приводных электродвигателей.

За последние 60 лет в развитии устройств для мониторинга состояния оборудования сделан огромный шаг. Например, в 1960-х гг. лабораторные приборы для измерений и вывода сигнала вибрации были настолько громоздкими, что занимали такую же площадь, что и станок, на котором проводились измерения. Современные приборы (рис. 1) легко умещаются в ладони руки и при этом обладают высокой чувствительностью [1]. Недоро-



Рис. 1. Преобразователь виброскорости ZET 114 (BC 114) (Россия)

гие и компактные датчики с функцией беспроводной передачи информации внедряют в различные узлы станков. Расположенные с определённым интервалом датчики температуры позволяют в режиме реального времени отслеживать изменение теплового поля оборудования [2]. Использование в машинном оборудовании датчиков-подшипников позволяет контролировать износ самих подшипников, определять силы резания за счёт измерения тензометрическими датчиками нагрузки на подшипники, контролировать угол поворота ротора за счёт генерации магнитных импульсов, связанных с угловым положением ротора (рис. 2) [3].

С одной стороны, постоянный сбор данных о показаниях датчиков положения, скорости, значениях параметров программ устройств числового программного управления (УЧПУ), сигналах электрических и пневматических систем, действиях персонала и др.



Рис. 2. Сенсорный подшипник с неподвижным наружным кольцом АВ SKF (Швеция)

позволяет многократно запечатлеть всю производственную систему с заданным интервалом времени. С другой стороны, автоматизированная фиксация показаний элементов производственной системы с высокой частотой формирует большие объёмы информации, в то время как данные зачастую не представляют ценности без грамотной обработки. Одна из проблем, с которой столкнулись авиастроительные компании, — обработка и анализ данных с датчиков, расположенных на самолётах. Например, воздушное судно Boeing 787 (США) генерирует несколько терабайт данных в течение каждого полёта [4].

Современные промышленные предприятия по объёмам генерируемой информации не уступают воздушным судам. Поэтому проблема обработки и анализа данных для промышленных предприятий также актуальна. В последние десятилетия системы мониторинга компонент технологической системы активно развивались. На рынке представлен широкий спектр решений для промышленных систем сбора и обработки данных, в том числе и российских ИТ-компаний:

системы хранения и обработки данных ЗАО «КРОК инкорпорейтед»;

информационные системы ИТЦ «Аусферр»;

Datana — продукт группы компаний «Ланит»;

система мониторинга промышленного оборудования «Диспетчер» группы компаний «Цифра»;

системы мониторинга группы компаний «Техносерв»;

автоматизированная система мониторинга и управления АО «Инфосистемы Джет».

Таким образом, эффективная система обработки данных, поступающих от различных частей технологической системы, позволяет повысить эффективность используемого оборудования, уменьшить количество бракованной продукции, уменьшить затраты на её изготовление. В настоящее время активно развивается как аппаратная база (увеличивается чувствительность датчиков, уменьшаются их габаритные размеры), так и информационная (системы мониторинга и управления предприятиями).

Библиографические ссылки

1. **Каталог** продукции ООО «Zetlab». [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://zetlab.com/shop/datchiki/akselerometriyi/preobrazovateli-vibroskorosti/velosimetr-vs-114/> (дата обращения: 10.05.2019).

2. **Ягопольский А.Г., Винников Д.А.** Сравнительный анализ и обобщение способов коррекции температурных деформаций в металлорежущих станках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1(682). С. 71—78.

3. **Каталог** продукции АВ SKF. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.skf.com/ru/products/bearings-units-housings/engineered-products/sensor-bearing-units/motor-encoder-units/index.html> (дата обращения: 10.05.2019).

4. **Chitra Sethi** Aerospace Bets on Big Data. Site of The American Society of Mechanical Engineers (Сайт Американского общества инженеров-механиков). [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/design/aerospace-bets-on-big-data> (дата обращения: 11.05.2019).

Ссылка для цитирования

Ягопольский А.Г., Домнышев А.А. Мониторинг производственных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 14—15.

Уважаемые читатели!

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

УДК 621

Р.Р. Загидуллин, д-р техн. наук, доц.

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

polysoft@list.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПАРТИИ ЗАПУСКА В СТАНОЧНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ МАЛЫХ И СРЕДНИХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрена методика определения оптимальной партии запуска в станочной системе для малых и средних машиностроительных предприятий на основе многопродуктовой сети, алгоритма Форда—Фалкерсона и разработанной целочисленной задачи линейного программирования.

Ключевые слова: партия запуска; задача определения мощностей; алгоритм Форда—Фалкерсона; математическая модель; методика определения оптимальной партии запуска.

The methodology for determining the optimal start-up lot in the machine tool system for small and medium-sized engineering enterprises is considered. The methodology based on a multi-product network, the Ford-Fulkerson algorithm and the developed integer-valued linear programming task is considered.

Keywords: launch party; capacity determination task; Ford—Fulkerson algorithm; mathematical model; methodology for determining the optimal launch batch.

Введение. Повышение производительности станочного парка является одной из основных задач повышения рентабельности отечественного производства, конкурентоспособности продукции и сроков её освоения. Для решения этих задач принято использовать дорогостоящие программные продукты (ПП) классов APS и MES [1], что часто является невыгодным с точки зрения затрат для предприятий, имеющих в составе небольшой парк оборудования от 25 до 200 единиц оборудования (ЕО). В то же время, используя общедоступные математические пакеты, можно снизить себестоимость как продукции, так и программного обеспечения. При планировании производства продукции принято

использовать двухэтапную структуру решения. На первом этапе решается задача достаточности мощностей (рис. 1). Эта задача на ряде предприятий возложена на бюро мощностей отделов главного технолога. Если решение задачи положительное (фонд времени оборудования не превышает объём работ), то на втором этапе строится расписание работы на множестве оборудования $N\{N = 1, \dots, n\}$ и множестве единиц планирования (ЕП) $M\{e_{ijk}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, p_i, k \in N\}$, где i — номер ЕП; j — номер операции; p_i — количество операций на i -й ЕП, $k \in N$.

Во всех случаях задача мощностей решается также с помощью систем APS и MES. Рассмотрим случай решения этой задачи для участка или цеха при мелкосерийном производстве, используя предложенную в работе математическую модель, которая в дальнейшем может быть реализована с помощью доступных для небольших предприятий ПП.

Анализ пропускной способности станков. Рассмотрим некий гипотетический станочный участок в виде ориентированной сети (рис. 2) с фиктивной вершиной S . Задачу мощностей для простоты рассмотрим при продолжительности смены 480 мин (см. рис. 2) без учёта обеденного перерыва, т. е. введём величину фонда времени для ЕО $\Phi_k (k \in N)$.

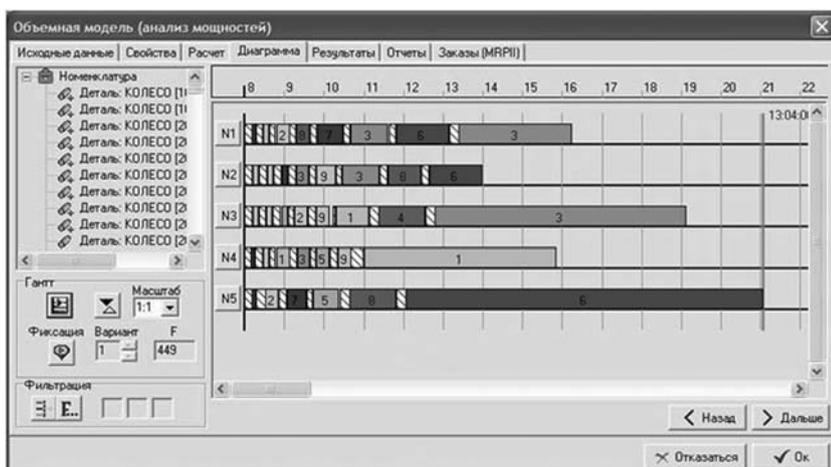


Рис. 1. Диаграмма мощностей, полученная в MES PolyPlan

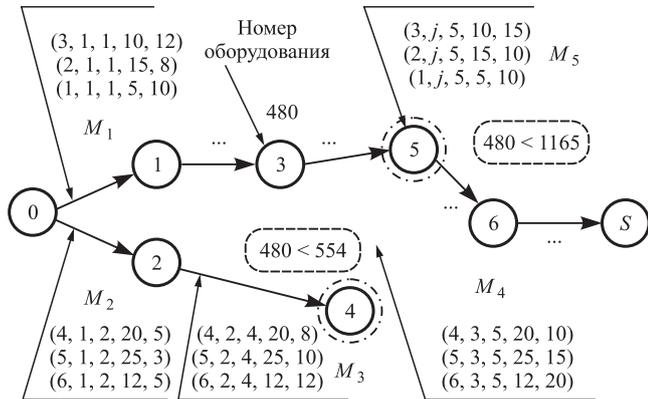


Рис. 2. Сеть потока деталей

При нумерации ЕО необходимо использовать тот же принцип, который используется в методах МКП/ПЕРТ в сетевом планировании [3] — по ходу используемого оборудования.

Каждую ЕП обозначим следующим образом: $e(i, j, k, a_{ij}, t_{oe_{ijk}})$, где i — номер ЕП; j — номер операции; k — номер ЕО согласно технологическому процессу (ТП); a_{ij} — размер партии запуска i -й ЕП на j -й операции; $t_{oe_{ijk}}$ — время обработки одной ЕП на k -й ЕО.

Всё множество M можно представить в виде подмножеств $M_l \{l = 1, \dots, L\}$, представляющих собой партии запуска различных ЕП на соответствующие ЕО. При этом ЕП в этих подмножествах могут пересекаться, но только на различных операциях.

Аналізу подлежат только подмножества M_l , которые непосредственно входят в вершину ЕО.

Данная сеть анализируется с точки зрения пропускной способности (обычным суммированием произведений $a_{ij}t_{oe_{ijk}}$ для каждой ЕО

на входящих потоках подмножеств M_l), и эти данные заносятся в таблицу.

Расчёты для случая, представленного на рис. 1 (см. таблицу), показывают, что пропускная способность нарушена для двух ЕО — 4 и 5.

Если в одну вершину в виде k -й ЕО входит несколько подмножеств, например, M_l и M_q , то они объединяются в общее подмножество

$$M^k = M_l \cup M_q \quad (1)$$

с объединением составляющих их ЕП. Например, для случая ЕО 5 (см. рис. 2) будет справедливо

$$M^5 = \begin{pmatrix} (4, 3, 5, 20, 10) \\ (5, 3, 5, 25, 15) \\ (6, 3, 5, 12, 20) \\ (3, j, 5, 10, 15) \\ (2, j, 5, 15, 10) \\ (1, j, 5, 5, 10) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Мощность такого подмножества в нашем случае составит

$$\#M^5 = \#M_4 + \#M_5 = 6.$$

По сути подмножество M^k состоит из подмножеств ЕП, вошедших в M^k , и нумерация в системе, т. е. в списке (2), будет идти снизу вверх (в нашем случае от 1-й ЕП до 4-й), хотя это и не имеет большого значения, поскольку в каждой пятёрке указаны номера ЕП и её операции. Для системы (2) ЕП введём количество ЕП, входящих в M^k — P^k (в нашем примере $P^k = 6$).

Между системой (2) и пятёрками $e(i, j, k, a_{ij}, t_{oe_{ijk}})$ соответствие устанавливается достаточно легко, поскольку в системе (2) указана нумерация. Например, $e_1 = e(1, j, 5, 5, 10)$, $e_4 = e(6, 3, 5, 12, 20)$ и т. д.

Традиционно в производстве доминируют два решения проблемы перегрузки ЕО: увеличение дублёров ЕО и положительное решение на увеличение незавершённого производства (НЗП). Оба решения имеют ряд недостатков. Например, первое решение часто может привести к случаям, когда в последующих запусках ОЕ-дублёры не будут востребованы. Второе решение в итоге сводится либо к запаздыванию сроков поставки продукции, либо к неоправданному первому решению.

Рассмотрим задачу с точки зрения поиска оптимального размера партии ЕП — метода, лишённого указанных недостатков.

Определение пропускной способности ЕО

Номер вершины	Оборудование	Фонд времени, мин	Входной поток	Пропускная способность
0	Склад	—	—	—
1	Токарный станок	480	290	—
2	Отрезной станок	480	235	—
...
4	Сборочный стол	480	554	Нарушена
5	Сборочный стол	480	1165	Нарушена
...
S

Решение проблемы определения оптимальной партии запуска. В начале для всех ЕО необходимо провести проверку относительно системы (2) по формуле

$$a_r t_r \leq \Phi_k, (a_r = 1, \dots, P^k), \quad (3)$$

где $a_r = a_{ij}$ и $t_r = t_{oe_{ijk}}$ соответствующей ЕП $e(i, j, k, a_{ij}, t_{oe_{ijk}})$ согласно принятой в системе (2) нумерации.

Рассмотрим крайние случаи невыполнения условия (3).

1) Если условие (3) не выполняется для какой-либо ЕП, то она не может быть выполнена на ЕО, поскольку нарушается пропускная способность ЕО. В этом случае данная ЕП удаляется из системы (2). Такую же проверку проводим для всех оставшихся ЕП в системе (2).

2) Если в системе (2) не выполняется условие (3) для всех ЕП, кроме одной, то это означает, что только эта ЕП может быть выполнена на ЕО, а все остальные ЕП могут быть удалены из системы (2). При этом размер партии равен заявленному ранее для данной ЕП и дальнейшие вычисления для k -й ЕО прекращаются.

3) Если для всех ЕП из системы (2) не выполняется условие (3), то множество M^k — пустое ($\#M^k = \emptyset$). В этом случае задача не имеет решения.

Если в системе (2) для всех ЕП не выполняется условие (3) и только для одной ЕП встречается строгое равенство, то мы имеем только одно решение.

Если в результате проверки условия (3) выяснилось, что список M^k не является пустым и содержит хотя бы две ЕП, то можно осуществлять поиск оптимального значения размера партии для оставшихся в системе (2) ЕП.

Для определения оптимальной партии запуска разработана следующая математическая модель в терминах задач целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП). Для каждого узла ЕО, начиная с первой вершины сети

(см. рис. 1), которая встретилась в таблице, необходимо решить несложную модель ЗЦЛП с целевой функцией F . Введём неизвестные величины x_r в качестве искомым величин партий a_r . При этом допускаем, что величина x_r может быть как равной заявленной ранее (желательной) величине a_r , так и меньше:

$$F = \sum_{r=1}^{P^k} x_r \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^{P^k} x_r t_r \leq \Phi_k; \quad (5)$$

$$x_r \leq a_r; \quad (6)$$

$$x_r \geq 0; \quad (7)$$

$$F > 0. \quad (8)$$

Выражение (5) отражает ограничение по фонду времени ЕО. Неравенство (6) гарантирует, что найденная партия запуска x_r не превысит заявленную величину a_r . Неравенство (7) означает положительность полученных партий запуска, а неравенство (8) — положительность целевой функции F .

Особо следует отметить, что ввод величины x_r в модель (4—8) сделан неслучайно. Это позволяет использовать данную модель вне зависимости от крайних случаев 1—3, рассмотренных ранее.

На рис. 3 представлены программа и результат, полученные в математическом пакете Maple для вершины 4 (см. рис. 2).

Как видно из решения, размеры партий из-за ограничения на пропускную способность изменились: вместо значений $a_{ij}(12, 25, 20)$ в подмножестве M_3 получили значения $a_{ij}(6, 25, 19)$. В дальнейшем эти значения a_{ij} необходимо повторить в более ранних вершинах ЕО, например в подмножестве M_2 .

Далее проверяются следующие по ходу сети вершины ЕО на той же модели (4—8). При этом значения a_{ij} в следующем подмножестве (подмножество M_4 для нашего примера) должны быть переписаны и соответствовать значениям предыдущего подмножества M_3 . Если вновь полученные значения a_{ij} для новой вершины ЕО меняются, то они должны быть изменены для предыдущего подмножества.

Значения a_{ij} , полученные на новой вершине (подмножестве), для предыдущей вершины могут только уменьшаться, но не увеличиваться, так как это может привести к нарушению пропускной способности уже рассмотренных ранее вершин ЕО.

Задача считается решённой, если проанализированы с точки зрения модели (4—8) все

```
restart;
with(Optimization);
t[1] := 12, t[2] := 10, t[3] := 8;
a[1] := 12, a[2] := 25, a[3] := 20,
Foe := 480; MyF := x[1] + x[2] + x[3];
Constr := {(x[1]*t[1] + x[2]*t[2] + x[3]*t[3]) <= Foe, x[1] <= a[1], x[2] <= a[2], x[3] <= a[3],
x[1] >= 0, x[2] >= 0, x[3] >= 0};
LPSolve(MyF, Constr, assume = {nonnegative, integer}, depthlimit = 10, maximize);
[50, x[1] = 6, x[2] = 25, x[3] = 19]
```

Рис. 3. Программа и результат решения математической модели

вершины сети. При этом конечные результаты a_{ij} могут резко отличаться от первоначальных (в меньшую сторону), заданных на первых подмножествах при ЕО.

Как частное решение, для преодоления проблемы, если это возможно технически или имеются дополнительные мощности, можно порекомендовать известный способ расстановки оборудования, предложенный профессором Н.М. Султан-Заде [3] для автоматических линий, согласно которому все ЕО по ходу сети от начальной вершины до конечной имеют возрастающую производительность при одинаковом коэффициенте готовности оборудования.

Выводы. В результате проделанной работы показано, что с помощью математической модели линейного программирования целочисленного типа, основываясь на принципах пропускной способности теоремы Форда — Фалкерсона, можно без использования доро-

гостоящих программных продуктов классов MES и APS определить оптимальные размеры партий запусков в станочной системе.

Библиографические ссылки

1. **Загидуллин Р.Р.** Планирование машиностроительного производства: учебник (гриф УМО). Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. 392 с.
2. **Филлипс Д., Гарсиа-Диас А.** Методы анализа сетей: пер. с англ. М.: Мир. 1984. 496 с.
3. **Султан-Заде Н.М.** Теоретические основы оптимизации структуры автоматических линий в системе автоматизированного проектирования: автореф. дисс. д-ра техн. наук. М.: 1983. 36 с.

Ссылка для цитирования

Загидуллин Р.Р. Определение оптимальной партии запуска в станочной системе для малых и средних машиностроительных предприятий // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 16—19.

УДК 338

А.С. Микаева, канд. экон. наук, доц.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)
bisser@inbox.ru

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ЕЁ РАЗРАБОТКИ

Рассмотрена структурно-функциональная модель разработки стратегии технологического развития, включающая основные блоки: информационно-аналитический, оценочно-контрольный и проектно-конструктивный. Описаны функции каждого блока, а также этапы формирования стратегии технологического развития предприятия.

Ключевые слова: технологическое развитие; стратегия технологического развития; предприятия; этапы формирования стратегии; технологии; анализ.

The structural-functional developing model of the technological development strategy including the main blocks: information-analytical, evaluation-control and design-constructive is considered. The functions of each block, as well as the stages of the strategy forming of the enterprise technological development are described.

Keywords: technological development; technology development strategy; enterprises; stages of strategy formation; technologies; analysis.

Повышение конкурентоспособности отечественных предприятий приборостроения возможно при наличии продуманной и обоснованной стратегии технологического развития предприятия.

Процесс принятия решений в научно-технологической сфере предприятия необходимо осуществлять на корпоративном уровне. В результате наука и технология будут отождествляться не с функциональным управлением

отдельными производствами, а с корпоративным развитием. Это должно способствовать тому, что на накопление интеллектуального капитала и новые технологии будут выделяться равноценные ресурсы наравне с другими нетехнологическими корпоративными направлениями. Знания и новые технологии войдут в сферу управления и поддержки руководства предприятия. Разработка и реализация научно-технологического развития будут осуществляться на принципах и методах формирования стратегического поведения.

Анализ существующей практики показывает:

как правило, стратегия подменяется долгосрочным планом технологического развития предприятия, что исключает возможность рассмотрения многовариантного сценария;

разработка стратегии, как правило, основывается лишь на анализе внутренней среды предприятия и не учитывает темпы появления и распространения технологических новаций, что становится причиной возникновения проблемы сбалансированности формируемой стратегии с внешними условиями;

вследствие ограниченного понимания технологического развития (как совершенствования основных производственных фондов) не

учитываются все направления технологического развития;

не проводится маркетинговая оценка прежде всего в части изучения возможного спроса на новую или усовершенствованную продукцию, которая будет произведена с использованием предлагаемых к внедрению технологических решений, что существенно повышает риски стратегического выбора.

Принимая во внимание результаты проведенного анализа, сформирована структурно-функциональная модель разработки стратегии технологического развития предприятия, которая включает три основных блока (см. рисунок): информационно-аналитический (I); оценочно-контрольный (II); проектно-конструктивный (III) [1].

Функция информационно-аналитического блока заключается в сборе и анализе информации об уровне технологического развития предприятия, а также о внешней среде.

Функция оценочно-контрольного блока — количественная и качественная оценка возможностей технологического развития и ожидаемых результатов в целях обоснования критериев принятия решений.

Функциями проектно-конструктивного блока являются выбор проектов, соответствующий



Структурно-функциональная модель разработки стратегии технологического развития

ющих выделенным критериям и подлежащих практической реализации, и планирование работ.

Начальным этапом формирования стратегии технологического развития предприятия является анализ как внешней, так и внутренней среды, выявляющий возможности и угрозы в его макро- и микроэкономическом окружении.

В первую очередь проводятся анализ технологической системы предприятия, состояния и уровня исследований и разработок, анализ и оценка объектов интеллектуальной собственности, а также технологический мониторинг и маркетинговая прикидка.

Анализ технологической системы предприятия подразумевает оценку фактического состояния:

технологий, относящихся к производимой продукции, т. е. технологий, которые воплощены в конкретном продукте, в том числе инструментарий, используемый при разработке нового продукта (например, технологии, которые применяются на этапе конструирования);

технологий производственного процесса (анализируется производственный процесс и выявляются используемые в нём технологии);

вспомогательных технологий, которые используются в определённых видах деятельности предприятия и не связаны непосредственно с производимым продуктом или производственным процессом (типичные примеры таких технологий — компьютерный инструментарий, пакеты математического обеспечения, сети и т. д.).

Для идентификации имеющихся на данном предприятии технологий необходимо составить план-схему технологий, используемых в процессе создания материальных ценностей, т. е. входящие и исходящие потоки материальных средств, поставки в сбытовую сеть, продажи, послепродажное обслуживание, взаимоотношения с заказчиками, поставщиками и т. п.

Термин «потенциал» происходит от латинского слова «*potentia*» и означает «сила». Потенциал — источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть использованы для решения какой-либо задачи, достижения определённой цели; возможности отдельного лица, общества, государства в определённой области [2].

Комплексный анализ технологической системы предприятия, состояния и уровня исследований и разработок, объектов интеллек-

туальной собственности позволяет выявить существующий потенциал технологического развития.

Целью проведения оценки потенциала технологического развития является определение возможностей, которыми располагает данное предприятие применительно к каждой технологии. Она достигается путём оценки технологических возможностей предприятия в сопоставлении с его основными конкурентами.

Потенциал технологического развития предприятия включает следующие составляющие: кадровый потенциал, инновационный и финансовый потенциал. Оценка потенциала технологического развития предприятия включает оценку: расходов на НИОКР (в абсолютных цифрах и процентах от объёма продаж); расходов на техническое обновление при неизменности других технических функций; людских ресурсов (спектр специальностей имеющих сотрудников и уровень их квалификации); оборудования; патентов и иной интеллектуальной собственности; распределения финансовых ресурсов (критерии, направленность), увеличиваемых в плановом порядке в противопоставлении к более радикальным инновациям) и др.

При этом также должен учитываться технологический уровень других производственно-хозяйственных звеньев предприятия приборостроения (систем управления, логистики, качества продукции, связи и пр.).

Чтобы своевременно предвидеть позитивные события и выявлять негативные тенденции, а также оценить их возможное влияние на результативность процесса освоения нововведений, в технологическом управлении используются методы технологического контроля и последующего мониторинга.

Технологический мониторинг — это система прогнозирования и выявления ситуаций и тенденций, которые могут изменить первоначальные внешние или внутренние условия разработки и реализации стратегии технологического развития [3].

Информационно-аналитический блок включает технологический мониторинг, значимость которого определяется необходимостью обеспечения опережающего развития предприятий приборостроения.

Методы технологического контроля и мониторинга позволяют выделять во внешней и внутренней среде пробелы и прогнозировать будущие тенденции, которые следует рассматривать как жизненно важные направления

для осуществления инновационно-технологической деятельности. Данные методы могут обеспечить эффективное оперативное управление реализацией стратегии технологического развития.

При проведении технологического мониторинга оцениваются направления, которые предприятие ещё не использовало в своей деятельности. Они могут касаться логистики, организации производства в кооперации с субпоставщиками, выпуска новой продукции и материалов с использованием сети технического обслуживания конкурентов и т. п.

В анализ также необходимо включить технологии, влияние которых может проявиться в будущем. К ним относят вновь появляющиеся и дорабатываемые технологии, которые пока не находятся в хозяйственном обороте, но могут иметь значительный потенциал с точки зрения замещения технологий, используемых в данный момент для производства данного продукта или разработки новых видов продукции. В этой связи для выявления новейших технологий полезно пользоваться методами прогнозирования технологического развития. Основная роль при определении стратегий технологического развития предприятия должна принадлежать технологическому прогнозированию, которое служит информационной базой для экономического прогнозирования и перспективного планирования.

Развитие существующей системы технологического мониторинга предприятия возможно на основе интеграции методов стратегического и инновационного контроля, которые в свою очередь выражаются в трёх основных видах контроля: предварительном, направляющем и итоговом.

Методы предварительного контроля используются до начала исполнения решения и позволяют определять количественные и структурные характеристики оптимального варианта его реализации.

Основное назначение предварительного контроля — адекватная оценка и постановка собственных целей.

Направляющий контроль применяется постоянно, от начала практического осуществления решения до его завершающего этапа. Он включает измерение, оценку, сравнение, выработку, а также исполнение корректирующих действий, направленных на достижение конечных результатов по исследуемому объекту.

Метод контроля по итоговым полученным результатам применяется, когда решение счи-

тается выполненным. Этот вид контроля при анализе эффективности освоения нововведений может быть направлен на оценку результативности выполнения поставленных целей и выбранной стратегии их достижения. Наряду с этим здесь также представляется необходимым провести анализ актуальности и коммерческой способности разработанной технологии в сопоставлении с текущим состоянием общего научно-технологического развития и сформировавшимися рыночными потребностями.

В процессе коммерциализации целесообразно придерживаться основных экономических параметров эффективности технологии, которые были определены в технологическом проекте, включая планы по охвату сегментов рынка, увеличению выручки, росту чистого дохода, повышению производительности труда. При этом важно помнить о необходимости непрерывного инновационно-технологического развития и о важности своевременного перехода на разработку и выведение на рынок новых продуктов. Практика показывает, что наиболее эффективным является параллельный переход от реализации одной к разработке другой технологии.

Итогом этого этапа является подробный перечень технологий, отвечающих профильным потребностям данного предприятия, что позволяет определить приоритетные технологии, которые будут использоваться при формировании технологической стратегии предприятия.

За этапом технологического мониторинга следует этап маркетинговой прикидки.

С управленческой точки зрения прикидка есть форма приблизительного моделирования будущей ситуации на основе прогнозных оценок и приблизительных расчётов.

После выполнения этапов технологического мониторинга и маркетинговой прикидки следует этап формирования вариантов технологического развития предприятия с учётом приоритетов.

Эффективная реализация данного этапа возможна в том случае, если учитывается, в какой степени рассматриваемые технологии адаптированы к условиям функционирования предприятия и способны поддерживать конкурентные преимущества, насколько рассматриваемые технологии важны для будущей конкурентной позиции предприятия, т. е. насколько владение ими критично в будущем.

В процессе формирования стратегии технологического развития предприятия немаловажными становятся оценка и контроль

эффективности достижения поставленных целей и задач. Это обосновывается тем, что перед разработкой новых инвестиционных программ и планов-проектов необходимо проанализировать результаты принятых и выполненных ранее экономических решений, чтобы учесть возможные недочёты при разработке стратегии технологического развития.

Экономический анализ технологического развития должен быть ориентирован на оценку внутренних стратегических изменений, произошедших на предприятии в результате развития интеллектуального капитала и обновления производства. Внутренняя среда предприятия в данном случае исследуется в каждом из основных функциональных направлений: НИОКР, маркетинг, производство, финансы, персонал и организационное управление. Прежде всего рассматривается работа функциональных подразделений и отделов по выполнению поставленных перед ними целей и задач.

На основе ряда оценочных показателей предприятие анализирует эффективность реализованных проектов и перспективность будущих проектов. В зависимости от достигнутых результатов оно может перейти к поиску принципиально новых технологий либо сконцентрироваться на модернизации имеющихся.

Заключительным этапом является реализация стратегии технологического развития.

В связи с определяющим влиянием технологического развития на результаты хозяйственной деятельности, а также с его многонаправленностью и большой сложностью важное практическое значение имеет постоянно осуществляемая и сбалансированная по всем элементам система управления технологическим развитием предприятия.

Особенностью сформированной модели является её построение на основе принципа стратегической интеграции, под которым понимается объединение проектов технологического развития с общей, корпоративной стратегией предприятия, что обеспечивает

соответствие направлений технологического развития стратегическим целям предприятия и возможность их восприятия структурными подразделениями предприятия.

Следует отметить, что элементы, формирующие структурно-функциональную модель разработки стратегии технологического развития предприятия, могут находиться как во внутреннем, так и во внешнем контуре управления предприятием. В случае если предприятие является интегрированным в корпоративную структуру, часть или все из указанных функций могут реализовываться централизованно соответствующими корпоративными структурными подразделениями. В другом случае предприятие может выполнять все эти функции самостоятельно, имея для этого собственные структурные подразделения. В современных условиях, когда распространённой становится практика стратегического партнёрства и взаимодействия, ряд функций может осуществляться консолидированными усилиями нескольких предприятий.

Библиографические ссылки

1. **Микаева А.С.** Инструменты разработки стратегии технологического развития предприятий базовых отраслей современной экономики (на примере приборостроения): дис. ... канд. экон. наук. 2013. 146 с.

2. **Большая советская энциклопедия** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/168433/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB> (дата обращения: 14.11.2017).

3. **Макарова И.А.** Механизм оптимизации инновационной политики на предприятии // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6249> (дата обращения: 14.11.2017)

Ссылка для цитирования

Микаева А.С. Основные этапы формирования стратегии технологического развития предприятия и принципы её разработки // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 19—23.

Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 681.586

С.Ф. Амиров, д-р техн. наук, проф., О.Т. Болтаев, К.К. Жураева, д-р филос.
(Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта)

otash_be@mai.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ НОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УСИЛИЙ

Исследованием магнитных цепей новых преобразователей усилий с распределёнными намагничивающими обмотками методом составления схемы замещения показано, что при достаточно большом количестве каскадно соединённых участков магнитной цепи и учёте распределённости намагничивающих сил секций обмотки возбуждения достигается существенное (до 23 %) снижение погрешности при расчёте магнитных цепей с распределёнными параметрами.

Ключевые слова: магнитная цепь; преобразователь усилий; намагничивающие обмотки; ферромагнитные перемычки.

The research results of the magnetic circuits or new force transducers with distributed magnetizing windings by drawing up a substitution scheme shows that with a sufficiently large number of cascade-connected sections of the magnetic circuit and taking into account the distribution of the magnetizing forces of the excitation coil sections, a significant error decrease (up to 23 %) at calculating magnetic circuits with distributed parameters is achieved.

Keywords: magnetic circuit; force transducer; magnetizing windings; ferromagnetic jumpers.

Введение. В настоящее время проводятся научно-исследовательские работы в области устройств контроля объектов железнодорожного транспорта.

В связи с этим большое внимание уделяется исследованиям магнитных цепей магнитоупругих датчиков усилий, методам распределения намагничивающих обмоток, усовершенствованию схем замещения магнитной цепи с учётом распределения секций намагничивающей обмотки.

Магнитная цепь разработанных магнитоупругих датчиков усилий (МУД) [1, 2] (рис. 1) состоит из двух коаксиально расположенных кольцевых ферромагнитных сердечников 1 и 2, соединённых между собой четырьмя диаметрными ферромагнитными перемычками 3, охваченными соответствующими секциями намагничивающей обмотки 4. При этом секции обмотки соединены между собой последовательно.

Расчёт магнитной цепи сводится к определению магнитного потока $\dot{Q}_{\mu 0}$, замыкающегося через ферромагнитные перемычки 3 с соответствующими секциями обмотки 4.

Для упрощения анализа магнитной цепи исследуемого МУД усилий пренебрегаем боковыми потоками рассеяния и будем считать, что ферромагнитные перемычки с соответствующими секциями обмотки намагничивания идентичны. Кроме того, будем считать, что магнитная цепь исследуемого МУД рабо-

тает на линейном участке основной кривой намагничивания материала магнитопровода. Эти допущения, как показали проведённые экспериментальные исследования, незначительно влияют на расчёты, однако существенно упрощают анализ исследуемой магнитной цепи [3].

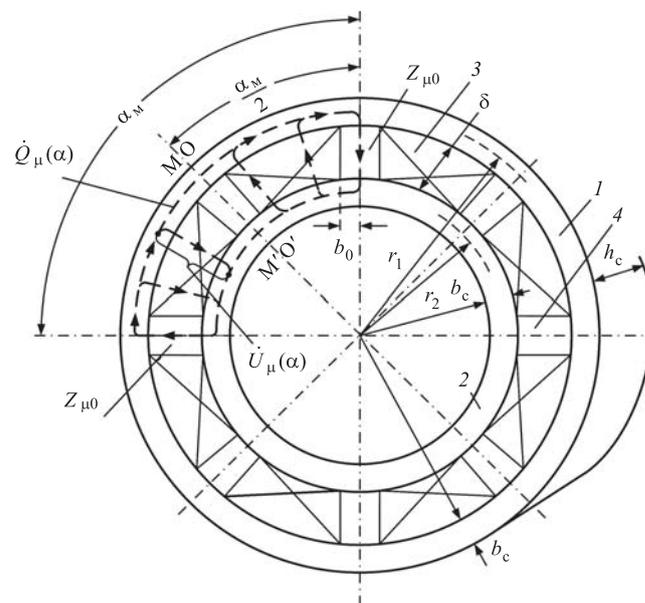


Рис. 1. Магнитная цепь МУД усилий:

r_1, r_2 — средние радиусы кольцевых ферромагнитных сердечников 1 и 2; δ — воздушный зазор между коаксиальными кольцевыми сердечниками; b_c, h_c — толщина и высота кольцевых сердечников 1 и 2 соответственно; b_0, h_0 — ширина и высота ферромагнитных перемычек соответственно $h_c = h_n + 2\Delta_0$, где Δ_0 — толщина секции обмотки намагничивания 4

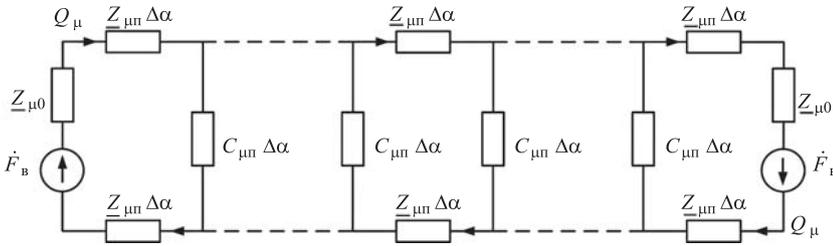


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи без учёта распределённости секций намагничивающей обмотки

Исследование магнитной цепи разработанного МУД усилий без учёта распределённости секций намагничивающей обмотки. Схема замещения рассматриваемой магнитной цепи приведена на рис. 2.

$R_{\mu 0} = \frac{l_0}{\mu_0 \mu_{б.п}|_{\sigma=0} b_{п} h_{п}}$ — активная составляющая комплексного магнитного сопротивления каждой ферромагнитной перемычки $Z_{\mu 0}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; $\mu_{б.п}|_{\sigma=0}$ — относительная магнитная проницаемость без потерь для участка магнитной цепи с ферромагнитной перемычкой, численно равная $\mu_{б.п}$ для данного материала при отсутствии механических напряжений, т. е. при $\sigma = 0$, $l_0 = \delta$ — длина перемычки.

$C_{\mu\pi\Delta\alpha} = C_{\mu\pi} \frac{\alpha_M}{N}$; $Z_{\mu\pi\Delta\alpha} = Z_{\mu\pi} \frac{\alpha_M}{N}$ — магнитная ёмкость (магнитная проводимость по классической аналогии) кольцевого зазора и магнитное сопротивление стальной части участка магнитной цепи соответственно с длиной, соответствующей углу $\Delta\alpha = \frac{\alpha_M}{N}$; N — количество каскадно соединённых участков магнитной цепи; α_M — максимальное значение координаты α ; $F_v = Iw$ — магнитодвижущая сила (МДС) каждой сосредоточенной секции намагничивающей обмотки; I — ток, протекающий по секциям этой обмотки; w — количество витков в каждой секции обмотки.

Реактивная составляющая комплексного магнитного сопротивления $Z_{\mu 0}$ определяется как $X_{\mu 0} = \frac{\omega}{R_{\mu 0}}$, где $R_{\mu 0}$ — электрическое сопротивление ферромагнитной перемычки на пути вихревых токов; ω — угловая частота тока I .

Точность метода составления схемы замещения зависит от точности определения магнитных сопротивлений концентрических ферромагнитных колец, магнитной ёмкости зазора между ними и количества каскадно соединённых участков магнитной цепи МУД усилий.

Схема замещения разработанного МУД усилий с сосредоточенными намагничиваю-

щими силами составлена на основе программы Electronics Workbench [4]. Следует отметить, что расчёты на ЭВМ производились при постоянном токе, а значения напряжения питания и сопротивлений в схеме замещения взяты равными модулям комплексных значений МДС, магнитных сопротивлений и других соответствующих комплексных величин.

На рис. 3 приведены графики зависимости $U_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ и $Q_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ при разных значениях коэффициента затухания магнитного поля в магнитной цепи $\beta = \sqrt{2C_{\mu\pi}Z_{\mu\pi}}\alpha_M$, построенные по результатам расчётов [5], где $Q_{\mu i}$, $U_{\mu i}$, $Q_{\mu i}^* = \frac{Q_{\mu i}}{Q_{\mu M}}$, $U_{\mu i}^* = \frac{U_{\mu i}}{U_{\mu M}}$ — значения магнитного потока в магнитопроводе и магнитного напряжения между ними на i -м участке магнитной цепи соответственно; $Q_{\mu M}$, $U_{\mu M}$ — максимальные значения Q_{μ} и U_{μ} ; $\alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha_M}$.

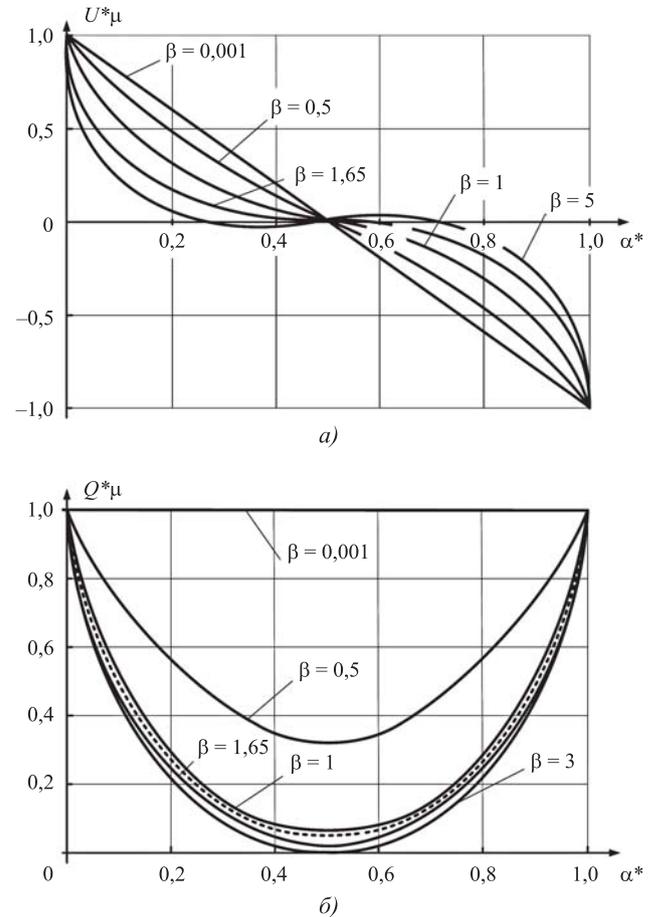


Рис. 3. Зависимости $U_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ (а) и $Q_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ (б) при разных значениях коэффициента β : — — расчётные; - - - - экспериментальные

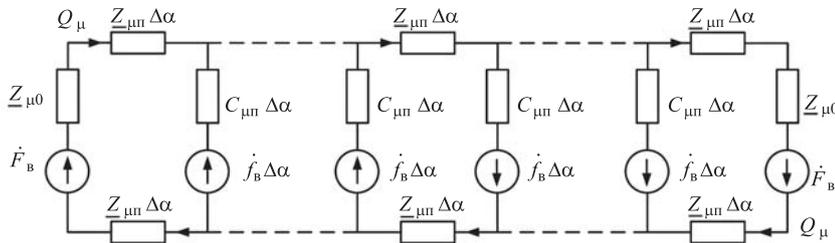
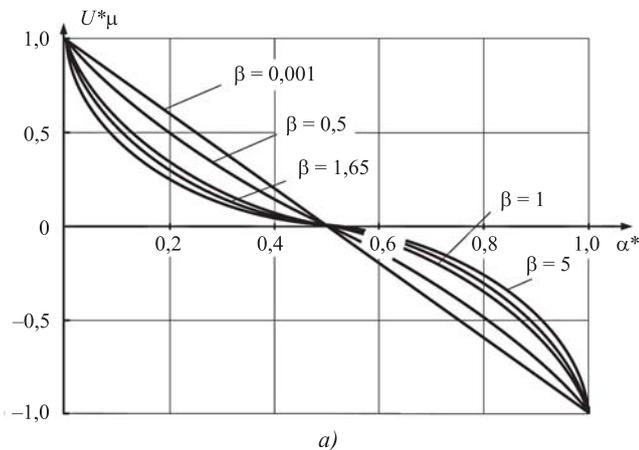
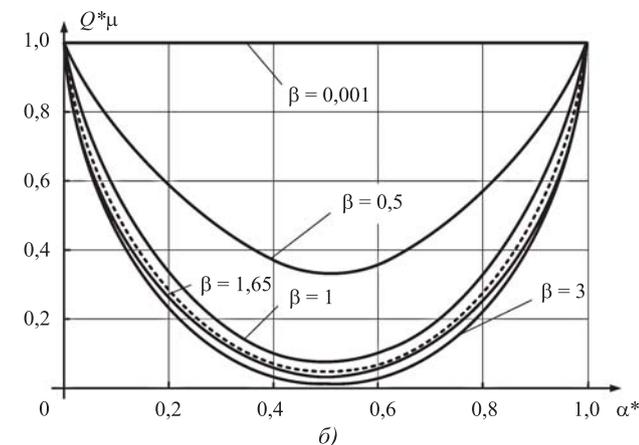


Рис. 4. Схема замещения магнитной цепи с учётом распределённости секций намагничивающей обмотки

Кривые свидетельствуют о том, что магнитное напряжение вдоль магнитной цепи с сосредоточенными намагничивающими силами распределено нелинейно и меняет свой знак в точке магнитной нейтрали, а магнитный поток непостоянен и имеет минимальное значение в точке магнитной нейтрали. Причём при увеличении коэффициента затухания магнитного поля β степень нелинейности распределения магнитного напряжения и непостоянство магнитного потока по длине магнитной цепи возрастают.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости $U_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ (а) и $Q_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ (б) при разных значениях коэффициента β :

— — расчётные; - - - - экспериментальные

Исследование магнитной цепи разработанного МУД усилий с учётом распределённости секций намагничивающей обмотки. Схема замещения рассматриваемой магнитной цепи приведена на рис. 4, где $f_{\text{в}}$ — погонное значение МДС секции намагничивающей обмотки, приходящееся на единицу угла магнитной цепи $\alpha_{\text{в}}$.

На рис. 5 приведены графики зависимости $U_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ и $Q_{\mu}^* = f(\alpha^*)$ при разных значениях коэффициента β [5].

Анализ кривых показывает, что магнитное напряжение вдоль магнитной цепи МУД усилий с распределёнными намагничивающими силами распределено также нелинейно и меняет свой знак в точке магнитной нейтрали, а магнитный поток непостоянен и имеет минимальное значение в точке магнитной нейтрали, причём при увеличении коэффициента затухания магнитного потока β степень нелинейности распределения магнитного напряжения и непостоянство магнитного потока по длине магнитной цепи возрастают.

Заключение. Таким образом, метод исследования магнитных цепей с помощью схемы замещения при достаточно большом количестве каскадно соединённых участков магнитной цепи позволил уменьшить (до 23 %) погрешности при расчёте магнитных цепей МУД усилий.

Библиографические ссылки

1. Амиров С.Ф., Назирова З.Г., Жураева К.К., Болтаев О.Т., Шарапов Ш.А., Файзуллаев Ж.С. Магнитоупругий датчик усилий // Патент РУз (UZ) № IAP 04866. 2014. Официальный вестник. № 4.
2. Амиров С.Ф., Турдибеков К.Х., Жураева К.К., Болтаев О.Т., Файзуллаев Ж.С. Магнитоупругий датчик усилий // Патент РУз (UZ) № IAP 05432. 2017. Официальный вестник. № 7.
3. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. Математическая модель магнитной цепи новых магнитоупругих датчиков усилий // Вестник ТашИИТ. 2017. № 2/3. С. 82—88.
4. Чернышов Н.Г., Чернышова Т.И. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: учеб.-метод. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. 52 с.
5. Алейников И.А. Практическое использование пакета Mathcad при решении задач: учеб. пособие. М.: Рос. гос. открытый техн. ун-т путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации, 2002. 114 с.

Ссылка для цитирования

Амиров С.Ф., Болтаев О.Т., Жураева К.К. Исследование магнитных цепей новых преобразователей усилий // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 24—26.

УДК 621.744.37

А.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),

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

mikaeva@npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГОЗАЩИЩЁННЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

Исследованы характеристики экспериментальных образцов влагозащищённых светильников. Представлены технические характеристики светильников и ламп. Описаны проведённые испытания и методики, приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: светильник; источник света; световой поток; световая отдача; цветовая температура; индекс цветопередачи.

The experimental samples characteristics of waterproof luminaires are investigated. The technical characteristics of luminaires and lamps are presented. The conducted tests and methods are described; the results of experimental studies are presented.

Keywords: lamp; light source; light flow; light return; color temperature; color rendition index.

Введение. Для освещения зон с повышенной влажностью необходимы специальные влагозащищённые осветительные приборы, поскольку сочетание воды и электричества небезопасно. Влагозащищённые осветительные приборы различаются по дизайну, мощности светового потока, цветовому решению и другим критериям.

Достоинства влагозащищённых светильников:

надёжность и долговечность за счёт ударопрочного герметичного корпуса;

пожаробезопасность (большинство моделей работает при низком напряжении);

лёгкость установки моделей на солнечных батареях или аккумуляторах, поскольку они работают от собственного источника питания;

регулировка яркости свечения (в моделях со светодиодами).

Недостатки:

необходимость в дополнительных трансформаторах, преобразующих напряжение в сети на 12 В (для низковольтных приборов);

трудоемкость монтажа (некоторые модели светильников функционируют от электросети, поэтому необходимо прокладывать кабель от сети к месту установки осветительного прибора).

Объекты исследования. Для исследования характеристик взяты 20 экспериментальных образцов светильников:

NBL-01-60-E27/WH с филаментной лампой Uniel Sky 8 Вт — 10 шт.;

NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED — 10 шт.

Влагозащищённые светильники серии NBL — надёжные и компактные, округлой и овальной формы применяются на улицах и внутри помещений, там, где требуется высокая защита от пыли и влаги (рис. 1). Светильники предназначены для использования с лампами накаливания со стандартным цоколем E27. Имеются два типоразмера — для ламп мощностью 60 и 100 Вт [1—4].

Степень защиты данного светильника IP54 — 5 (некоторое количество пыли может проникать внутрь, однако это не нарушает работу устройства). Полная защита от контакта — 4 (защита от брызг, падающих в любом направлении). Технические характеристики светильника приведены в табл. 1.

Для исследования данного светильника взята филаментная лампа Uniel Sky с цоколем E27 (рис. 2). Светодиодная лампа с нитевым излучателем Uniel Sky 4000 К 8 W в форме груши является аналогом «лампы Ильича» не



Рис. 1. Светильник NBL-01-60-E27/WH

Таблица 1

**Технические характеристики
светильника NBL-01-60-E27/WH**

Тип светильника	Светильник с плафоном / рассеивателем
Тип лампы	Лампа накаливания (общего назначения)
Цоколь (патрон) лампы	E27
Мощность лампы, Вт	60
Количество ламп (источников света)	1
Номинальное напряжение, В	230
Тип устройства управления (ПРА/трансформатора)	Не требуется
Материал корпуса	Алюминий
Цвет плафона/рассеивателя	Белый
Степень защиты (IP)	IP54
Возможность применения для аварийного освещения	Да
Выход светового потока	Прямой
Возможность монтажа на стену	Да
Импульсно-зажигающее устройство (ИЗУ)	Не требуется
Ширина, мм	195
Класс защиты	I
Класс пожаробезопасности «F»	Да
Цвет лампы	Нет (без)

только по характеристикам, но и по внешнему виду. Благодаря сапфировым светодиодным нитям свет от лампы распространяется на 360°. Характеристики лампы представлены в табл. 2. Светильники NBL-P-LED являются энергоэффективным аналогом стандартных светильников НПБ по форме, размерам и светотехническим характеристикам.

Внешний вид светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED представлен на рис. 3. Степень защиты данного светильника IP65 — 6 (пыль не может попасть в устройство). Полная защита от контакта — 5 (защита от водяных струй с любого направления). Технические характеристики светильника приведены в табл. 3.

Исследование электрических и световых характеристик. Для измерений электрических и световых характеристик экспериментальных образцов использован гониофотометр GO-2000 фирмы Everfine [5].

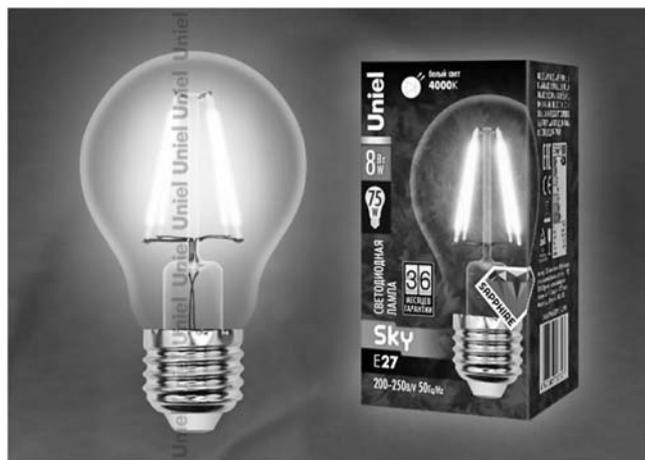


Рис. 2. Лампа Uniel Sky 8 Вт

Таблица 2

Характеристики лампы Uniel Sky

Параметр	Значение
Потребляемая мощность, w	8
Напряжение питания, v	220
Световой поток, lm	800
Срок службы, ч	30 000
Диаметр, мм	60
Длина, мм	102
Цоколь	E27
Угол светового излучения	360°
Индекс цветопередачи Ra	>80



Рис. 3. Светильник NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED

Перед началом работы необходимо стабилизировать светильники. Показатели стабилизации светильников NBL-01-60-E27/WH с филаментной лампой Uniel Sky 8 Вт и NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED на экране компьютера представлены на рис. 4 и 5.

Таблица 3

**Технические характеристики
светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED**

Тип светильника	Светильник с плафоном/рассеивателем
Тип лампы	Светодиод. (LED)
Мощность лампы, Вт	7
Номинальное напряжение, В	220...240
Материал плафона/рассеивателя	Пластик опаловый
Материал корпуса	Пластик
Цвет корпуса	Белый
Цвет плафона/рассеивателя	Белый
Степень защиты (IP)	IP65
Светораспределение	Симметричное
Возможность применения для аварийного освещения	Да
Выход светового потока	Прямой
Возможность монтажа на стену	Да
Тип поверхности	Матовый
Длина, мм	208
Ширина, мм	120
Высота/глубина, мм	74
Класс защиты	II
Предельная температура, °С	-40...40
Категория цветности света	Нейтральная холодно-белая (3300...5300 К)
Средний номинальный срок службы, ч	30 000
Цветовая температура, К	4000

Далее проводились измерения электрических параметров светильников для проверки заявленных параметров [6]. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Для исследования световых величин светильников использованы светомерный шар диаметром 2 м — OL IS 7600 и спектро радиометр OL 770 VIS/NIR. Эксперимент заключался в том, чтобы проследить изменение параметров светильников, проводя измерения после каждых 1000 ч их горения (табл. 5).

На рис. 6 и 7 представлены графики зависимости светового потока и световой отдачи от времени горения.

Таблица 4

Результаты измерений

Характеристика	Светильник	
	NBL-01-60-E27/WH	NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED
U , В	220,0	220,0
I , А	0,046	0,058
P , Вт	5,0	6,76
$\Phi_{л}$, лм	452,5	610,0
η , лм/Вт	87,12	90,18

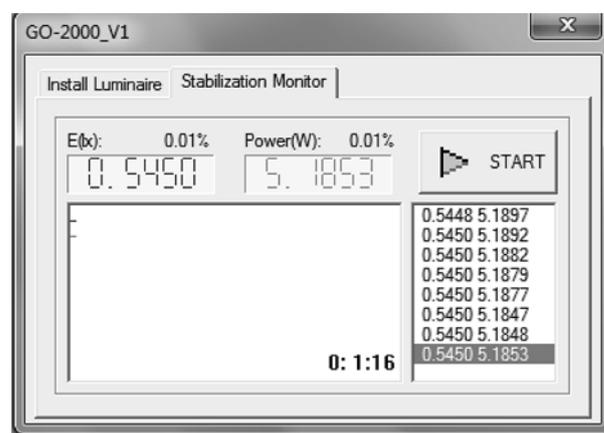


Рис. 4. Показатели стабилизации светильника NBL-01-60-E27/WH с филаментной лампой Uniel Sky 8 Вт на экране компьютера

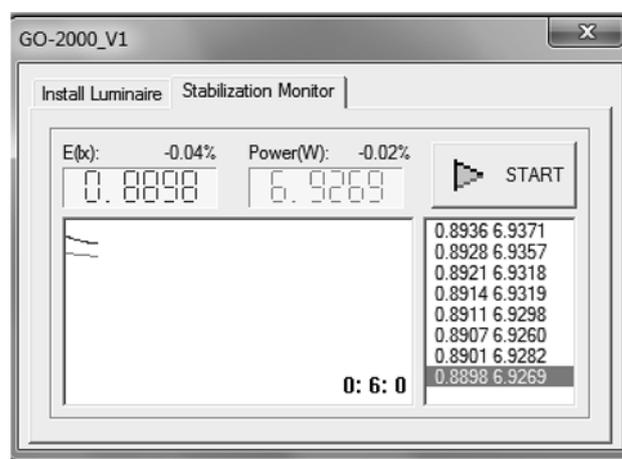


Рис. 5. Показатели стабилизации светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED на экране компьютера

По истечении 3000 ч световой поток и световая отдача у обоих светильников постепенно снижаются. У светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED снижение световой отдачи происходит более интенсивно, чем у NBL-01-60-E27/WH.

Таблица 5

Результаты измерений

Характеристика	Светильник	
	NBL-01-60-E27/WH	NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED
1000 ч		
U , В	220,0	220,0
I , А	0,045	0,057
P , Вт	5,0	6,76
$\Phi_{л}$, лм	437,3	568,8
η , лм/Вт	87,46	84,14
$T_{ц}$, К	4169	4367
Ra	80,41	84,64
2000 ч		
U , В	220,0	220,0
I , А	0,045	0,056
P , Вт	5,0	6,76
$\Phi_{л}$, лм	427,9	540,8
η , лм/Вт	85,58	80,0
$T_{ц}$, К	4148	4454
Ra	80,39	84,96
3000 ч		
U , В	220,0	220,0
I , А	0,044	0,056
P , Вт	5,0	6,76
$\Phi_{л}$, лм	406,9	519,8
η , лм/Вт	81,38	76,89
$T_{ц}$, К	4210	4425
Ra	80,84	84,35

На рис. 8 и 9 представлены графики зависимости цветовой температуры и индекса цветопередачи от времени горения.

Испытания на влагостойкость. Чтобы проверить светильник на влагостойкость, его устанавливают как для нормальной эксплуатации, но в самом неблагоприятном положении — в камере влаги, в которой поддерживают относительную влажность от 91 до 95 %. Температура воздуха в любой точке камеры, где находится образец, должна поддерживаться с погрешностью около 1 °С при любом подходящем значении температуры T от 20 до 30 °С.

Результаты испытаний светильника NBL-01-60-E27/WH на степень защиты, обе-

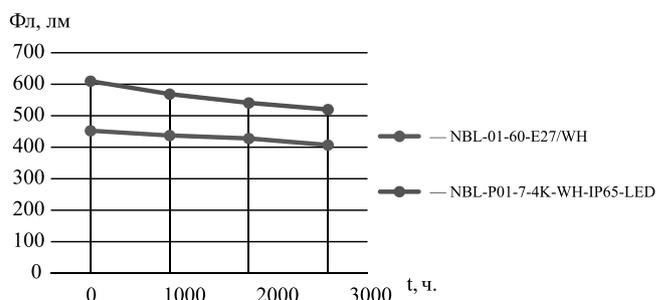


Рис. 6. Зависимость светового потока светильников от времени горения

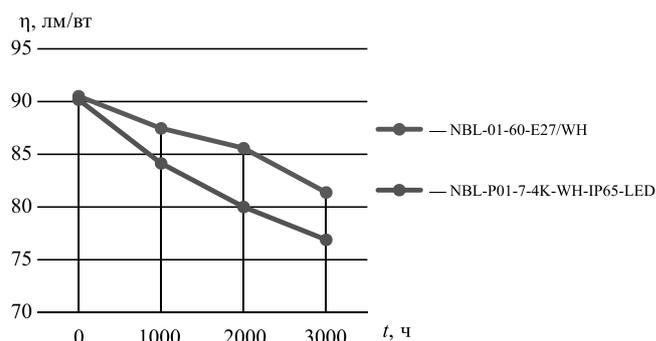


Рис. 7. Зависимость световой отдачи светильников от времени горения

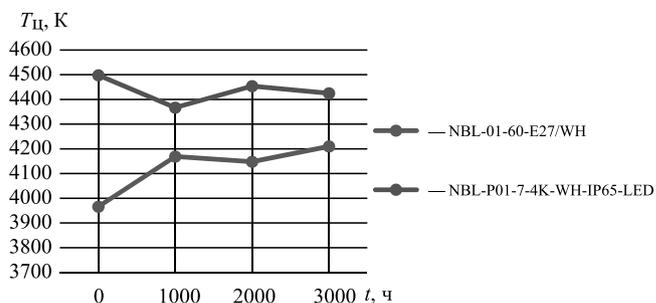


Рис. 8. Зависимость цветовой температуры светильников от времени горения

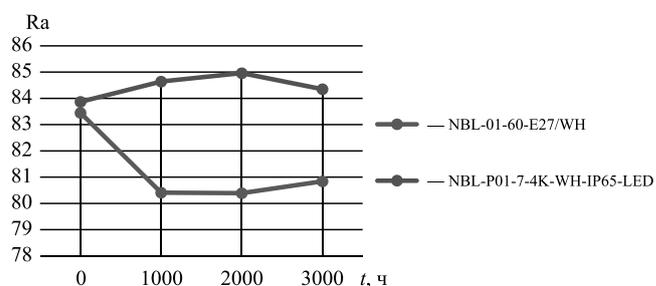


Рис. 9. Зависимость индекса цветопередачи светильников от времени горения

спечиваемой оболочкой IP X4 по ГОСТ IEC 60598-1—2013, приведены в табл. 6.

Результаты испытаний светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED на степень защиты, обеспечиваемой оболочкой IP X5 по ГОСТ IEC 60598-1—2013, приведены в табл. 7.

Таблица 6

Результаты испытаний светильника NBL-01-60-E27/WH

Требования к испытаниям	Метод испытаний	Результат испытаний
Оболочка светильника должна обеспечивать защиту от проникновения пыли, твёрдых частиц и влаги в соответствии с классификацией светильника по степени защиты, указываемой на нём. Все светильники при эксплуатации должны быть влагостойкими	IPX4 — испытание проводят путём обрызгивания с помощью качающейся трубы под углом $\pm 180^\circ$ к вертикали в течение 10 мин под нагрузкой и 10 мин без нагрузки в камере дождя	После испытаний выявлены накопления воды на электроизоляционных частях, попадания воды на части, находящиеся под напряжением, накопления воды вблизи кабельных вводов. Требования не выполняются

Таблица 7

Результаты испытаний светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED

Требования к испытаниям	Метод испытаний	Результат испытаний
Оболочка светильника должна обеспечивать защиту от проникновения пыли, твёрдых частиц и влаги в соответствии с классификацией светильника по степени защиты, указываемой на нём. Все светильники при эксплуатации должны быть влагостойкими	IPX5 — испытание проводят путём обливания светильника со всех сторон струей воды, формирующейся с помощью сопла. При этом расход воды должен составлять 12,5 л/мин $\pm 5\%$, внутренний диаметр сопла — 6,3 мм, расстояние между соплом и поверхностью оболочки 2,5...3 м, продолжительность испытания — 15 мин	После испытаний работа светильника не нарушена, накопление воды на электроизоляционных частях, попадание воды на части, находящиеся под напряжением, накопление воды вблизи кабельных вводов не наблюдаются. Требования выполняются

По истечении 3000 ч световой поток и световая отдача у обоих светильников постепенно снижаются. У светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED снижение световой отдачи происходит более интенсивно (на 15 %), чем у NBL-01-60-E27/WH (на 11 %). Цветовая температура у светильника NBL-01-60-E27/WH возрастает на 6 %, а у NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED — незначительно снижается (1 %). Индекс цветопередачи у NBL-01-60-E27/WH в первые 1000 ч резко снижается и со временем падает до 4 %, а у NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED практически не изменился (увеличился на $\approx 0,5\%$).

Заключение. Результаты исследования показали, что у светодиодного светильника NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED характеристики стабильны, чем у светильника NBL-01-60-E27/WH с филаментной лампой Uniel Sky 8 Вт.

Результаты испытания на влагостойкость исследуемых светильников показали, что светодиодный светильник NBL-P01-7-4K-WH-IP65-LED прошёл испытание на степень защиты, а результат испытания на степень защиты светильника NBL-01-60-E27/WH с филаментной лампой Uniel Sky 8 Вт оказался отрицательным (произошло проникновение влаги внутрь корпуса светильника).

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем: дис. ... д-ра техн. наук. Московская государственная академия приборостроения и информатики. М., 2007.
2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РусАнс, 2017. 136 с.
3. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: Московский технологич. ун-т (МИРЭА), 2017. 150 с.
4. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РусАнс, 2018. 135 с.
5. **Микаева С.А., Железникова О.Е., Сеницына Л.В.** Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33—36.
6. **Микаева С.А., Брысин А.Н.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.

Ссылка для цитирования

Горбунов А.А., Микаева С.А. Исследование характеристик влагозащищённых светильников // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 27—31.



УДК 629.054

Ю.С. Яковлева, Н.Г. Макаренко, канд. техн. наук, Е.В. Яковлев, канд. техн. наук
(Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа)

yuliya.yakowlewa@gmail.com

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрено решение на основе мониторинга технического состояния мобильных объектов протоколом ZigBee стандарта беспроводной передачи данных IEEE 802.15.4. Внедрение системы мониторинга в промышленности позволит повысить надёжность эксплуатации объектов, уменьшить затраты на эксплуатацию, повысить коэффициент технической готовности и уменьшить объём ремонта за счёт раннего выявления неисправности, что, в свою очередь, повысит безопасность эксплуатации мобильных объектов.

Ключевые слова: мониторинг объектов; протокол ZigBee; частотный диапазон; контроль доступа; безопасность; беспроводные технологии; распределение потерь в тракте; подвижный транспорт.

A solution based on monitoring the technical condition of mobile objects by the ZigBee protocol of wireless data transmission standard IEEE 802.15.4 is considered. The monitoring system implementation in industry will permit to increase the facilities operation reliability, to reduce operating costs, to increase the coefficient of technical readiness and to reduce the amount of repair due to the early detection of malfunctions, which in turn will increase the safety of mobile facilities operation.

Keywords: monitoring of facilities; ZigBee protocol; frequency range; access control; security; wireless technology; path loss distribution; mobile transport.

В настоящее время существует потребность в удалённом мониторинге и управлении приложениями беспроводных сенсорных сетей. Эффективный мониторинг технического состояния мобильных объектов является одной из приоритетных задач для страны.

Начиная с 1960-х гг. в разных странах мира велись разработки систем автоматического считывания информации с мобильных объектов. Каждая из систем имела свои преимущества и недостатки. Главная задача — улучшение процессов управления движением и повышение уровня информатизации клиентов при небольших инвестициях [1].

Наиболее распространённой спутниковой системой во всём мире является глобальная система позиционирования GPS (Global Positioning System), которая эксплуатируется под руководством министерства обороны США. В России активно развивается её отечественный аналог — система ГЛОНАСС.

Одним из главных условий стабильного функционирования спутниковой системы является размещение на движущемся объекте антенны, которая должна находиться в зоне прямой видимости со спутником. В этом случае различные помехи (тоннели, здания в густозаселённых

районах, кроны деревьев в лесных просеках) делают прохождение сигнала невозможным.

Несмотря на активное применение, спутниковая система не обеспечивает необходимые условия для контроля за подвижным транспортом на высокоскоростных линиях и обычных дорогах.

Организация мониторинга мобильных систем требует анализа радиочастотной совместимости объектов с устройствами автоматики.

В системе мониторинга мобильных объектов Российской Федерации предлагается использовать нелицензируемый ISM-диапазон частот 2,4...2,4835 ГГц и 868...870 МГц.

Мощность передатчика 10 мВт будет достаточна для эффективной организации беспроводной сенсорной сети [2]. Перечисленные характеристики канала связи не требуют специальной регистрации устройств в государственной комиссии по радиочастотам (URHX).

Рассмотрим подробнее пространство беспроводных протоколов стандарта IEEE 802 (рис. 1).

Сравнительная характеристика стандартов GSM, Wi-Fi, Bluetooth и ZigBee приведена в таблице.

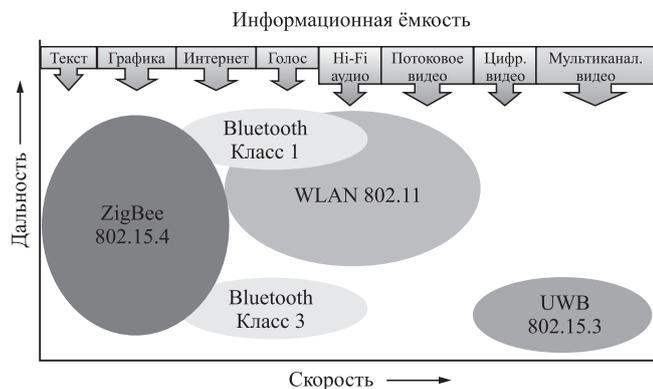


Рис. 1. Основные беспроводные стандарты

Характеристики основных беспроводных стандартов

Параметр	Стандарт			
	802.15.4 ZigBee		802.15.1 Bluetooth	802.11b Wi-Fi
Приложения	Мониторинг, управление		Голос, данные	Данные, видео
Частота, ГГц	0,868		0,915	2,4
Преимущества	Цена, энергосбережение, размеры		Цена, передача голоса	Скорость, гибкость
Максимальная скорость	20 кбит/с	40 кбит/с	250 кбит/с	1 мбит/с
Дальность, м	10...100, 1000		100	
Чувствительность средняя, дБм	- 92		-70	-76
Размер стека, кБайт	4...32		>250	>1000
Срок службы батареи, дни	100...1000		1...7	0,5...1

Конфигурация стека протокола ZigBee

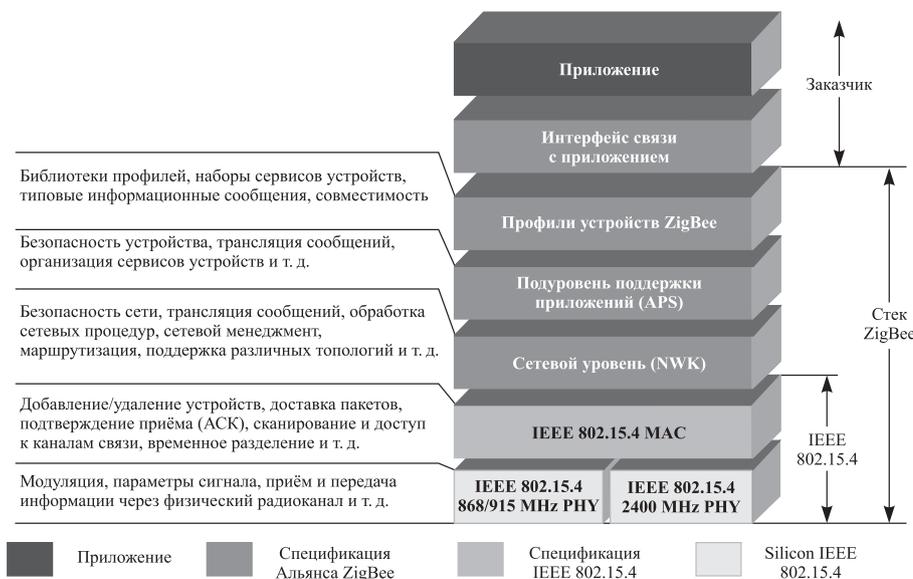


Рис. 2. Архитектура стека ZigBee/802.15.4

Очевидно, что наиболее подходящим для организации мониторинга объектов мобильного транспорта является протокол ZigBee стандарта беспроводной передачи данных IEEE 802.15.4 [3]. Рассматриваемый протокол предназначен для дистанционного управления и сбора информации с датчиков в системах с большим количеством узлов и небольшим объёмом трафика. Основной особенностью протокола является низкое энергопотребление, что позволяет продлить период автономной работы устройств до 15 лет. Стандарт ZigBee обеспечивает организацию беспроводной сети,

безопасность и поддержку пользовательских приложений, работающих на верхних уровнях стандарта IEEE 802.15.4, а также необходимый уровень управления доступом к среде Medium access Control (MAC) и физический уровень PHY (Physical Layer). На рис. 2 представлена обобщённая структура протокола.

Стандарт ZigBee/IEEE 802.15.4 объединяет в себе технологии, обеспечивающие мобильность, гибкость и масштабируемость беспроводной сети. Целевыми направлениями развития технологии являются снижение стоимости устройств и уменьшение уровня энергопотребления узлов сети.

Стандарт ZigBee регламентирует спецификации для беспроводных персональных сетей передачи данных WPAN (от англ. wireless personal area networking) с низкой скоростью и, следовательно, высокой продолжительностью автономной работы [4]. Стандарт ZigBee позволяет организовать пространственно протяжённые сети. Разработкой и спецификацией приложений различных профилей беспроводных сетей ZigBee занимается альянс ZigBee.

Спецификации стандарта ZigBee для некоммерческого использования находят-

ся в открытом доступе. Входной ежегодный членский тариф в альянс ZigBee составляет 3500 дол. США, что открывает доступ к неопубликованным спецификациям и разрешает выпускать произведённые продукты на рынок. Четвёртый в серии 802.15 стандарт WPAN Low Rate ZigBee является самым новым и обеспечивает функционирование устройств, имеющих низкую скорость передачи данных, потребляющих мало энергии и характеризующихся длительным сроком службы.

Указанный в спецификации стандарта максимальный диапазон передачи данных устройств ZigBee составляет 250 футов (76 м), что значительно превышает диапазон стандарта Bluetooth устройств.

Основные характеристики стандарта:

двойной частотный диапазон физического уровня — 2,4 ГГц и 868/915 МГц, реализованный в трёх нелицензируемых зонах: 2,4...2,4835 ГГц, 868...870 МГц и 902...928 МГц. Количество каналов каждой полосы зафиксировано следующим образом: шестнадцать (номера 11...26), один (номер 0) и десять (номера 1...10) соответственно. Высокий частотный диапазон открыт во всём мире, а низкий — в районах Северной Америки, Европы, Австралии и Новой Зеландии;

низкая потребляемая мощность и высокая скважность между посылками открывают возможность автономной работы устройств до нескольких лет;

максимальная скорость передачи данных для каждой частотной полосы составляет 250 Кбит/с...2,4 ГГц, 40 Кбит/с...915 МГц и 20 Кбит/с...868 МГц;

высокая пропускная способность и низкая латентность сети для приложений с низкой скважностью (< 0,1 %);

канальный и множественный доступ с контролем несущей волны и предотвращением коллизий (CSMA/CA);

адресное пространство не превышает 64 бит IEEE-адресации с возможностью создания до 65 535 сетей;

диапазон передачи от 76 м — 2,4 ГГц, 1500 м — 868 МГц (ZigBee Pro);

высокий уровень безопасности;

поддержка сложных топологий сети (рис. 3).

Альянс ZigBee разработал программное обеспечение для стандартных приложений на основе беспроводного стандарта IEEE 802.15.4.

ZigBee является единственной стандартной технологией, которая направлена на удовлетворение потребностей удалённого мо-

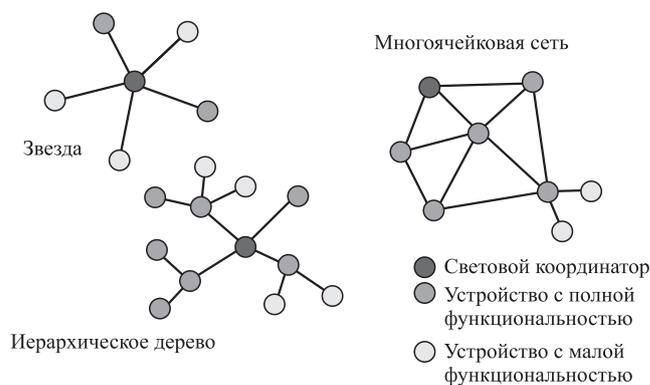


Рис. 3. Варианты топологии сетей ZigBee

нитинга и управления приложениями беспроводных сенсорных сетей.

Правильно будет представить стандарт IEEE 802.15.4 как физическую основу радиопrotocola, а ZigBee — как логическую надстройку сети и программных приложений. Следуя унификации инкорпорации открытых систем (OSI), модель стека протокола ZigBee состоит из нескольких слоёв. Первые два слоя физического уровня (PHY) и уровня управления доступом к среде (MAC) определяются стандартом IEEE 802.15.4. Слои, расположенные над ним, определяются альянсом ZigBee.

Совместимые с ZigBee устройства работают в нелицензируемом во всём мире диапазоне. 2,4 ГГц является глобальным открытым диапазоном, диапазон 902...928 МГц открыт в Южной Америке, а 868 МГц — в Европе. Стандарт ZigBee в диапазоне 2,4 ГГц использует расширение спектра методом прямой последовательности и квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK DSSS). Ширина канала составляет 2 МГц с шагом между каналами 5 МГц. Частотные полосы 868 и 900 МГц устроены аналогично полосе 2,4 ГГц, однако используют двоичную фазовую манипуляцию.

В сетях ZigBee используется три типа устройств:

координатор, организующий работу сети и взаимодействие элементов между собой (наиболее сложный узел, требующий наибольшего объёма памяти и вычислительных мощностей);

устройство с полной функциональностью FFD (от англ. Full Function Device) — поддерживает все функции и особенности стандарта IEEE 802.15.4;

устройство с ограниченной функциональностью RFD (от англ. Reduced function device) — на практике имеет сравнительно меньшую стоимость и сложность (обычно используется в качестве конечного устройства).

Обеспечение высокого уровня безопасности данных является ключевым преимуществом технологии ZigBee. Стандарт ZigBee использует модель безопасности стандарта IEEE 802.15.4 подуровня управления доступом к среде (MAC), которая определяет четыре уровня безопасности:

- контроль доступа — механизм, поддерживающий список доверенных устройств в сети;
- шифрование данных, которое использует стандарт шифрования 128-битным симметричным ключом;

- формат целостности данных, обеспечивающий защиту данных от изменения внешними устройствами, не имеющими криптографических ключей;

- механизм циклического обновления кода, необходимый для отсеивания сообщений, которые уже были приняты ранее (сетевой контроллер сравнивает значения специального кода последнего принятого сообщения с предыдущим и отвергает его, если данное значение не было обновлено).

Стандарт 802.15.4 регламентирует четыре основных вида посылок между беспроводными узлами [5]: информационные, подтверждающие, команды канального доступа и маячковые (рис. 4).

Сравнивая размер стека стандарта ZigBee с другими беспроводными технологиями, очевидное преимущество находится на стороне ZigBee с его стеком размером 32 Кб (для устройства с ограниченной функциональностью можно сократить размер стека до 2 Кб). Стандарт IEEE 802.15.4/ZigBee предназначен для дистанционного управления и сбора информации с датчиков в системах с большим количеством узлов и небольшим объёмом трафика [6]. Основной особенностью стандарта является низкое электропотребление устройств, обеспечивающее им высокую продолжительность автономной работы. Протокол отлично подходит для задач удалённого мониторинга природных и искусственных объектов подвижного транспорта с их протяжённой структурой. Преимущества беспроводных сенсорных сетей, основанных на стандарте ZigBee, незаменимы в приложениях с большим количеством узлов и ограниченными возможностями питания. Технология ZigBee позволяет значительно сократить расходы по разработке и монтажу удалённых систем мониторинга.

Обзор различных систем организации мониторинга показывает, что качество связи в таких системах не всегда удовлетворительное.

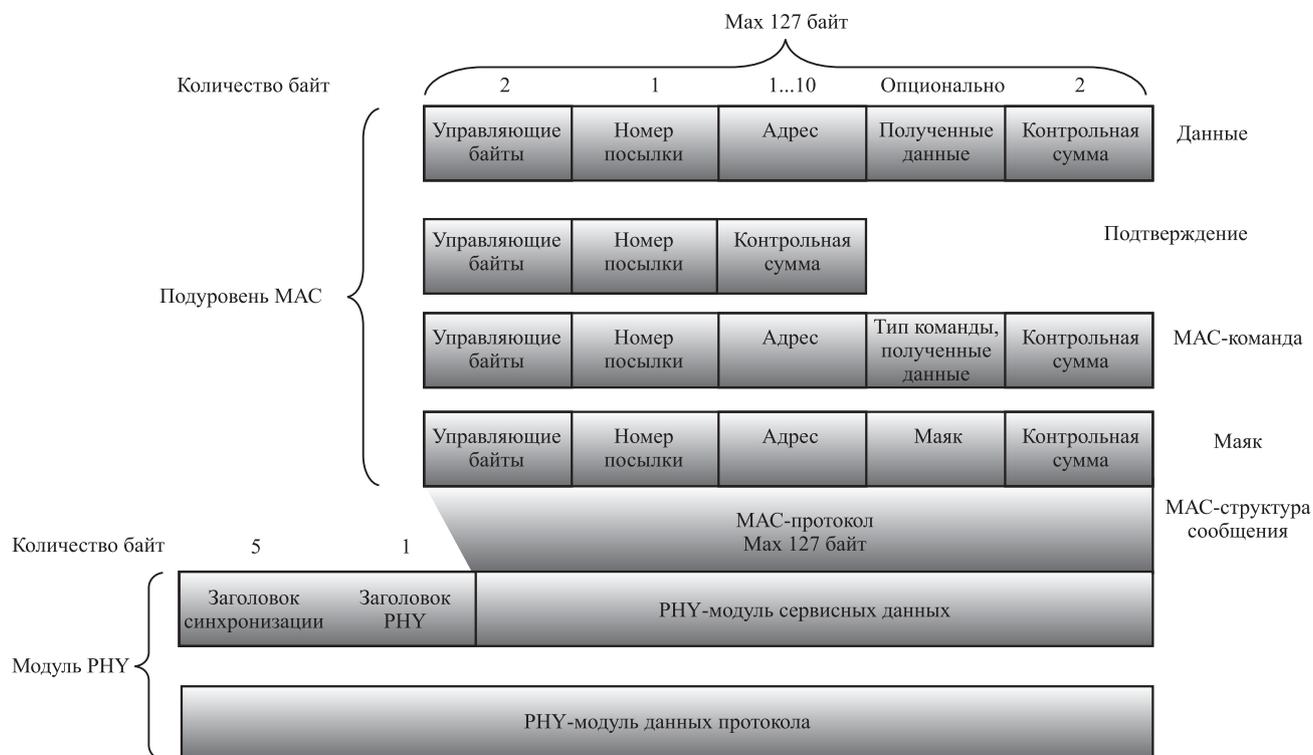


Рис. 4. Основные типы посылок, определённых в стандарте 802.15.4

Пример осуществления системы мониторинга мобильных объектов изложен в патенте [7].

Для расчёта потерь при организации передачи сигналов по сети ZigBee пользуются выражением

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (1)$$

где P_r — мощность сигнала, поступающего на антенну приёмника, дБ; P_t — мощность сигнала объекта мониторинга, дБ; G_t — коэффициент усиления передающей антенны, дБ; G_r — коэффициент усиления антенны приёмника, дБ; λ — длина несущей волны; d — расстояние, пройденное сигналом между двумя антеннами.

Для определения коэффициента ослабления сигнала используется зависимость

$$P_L = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}. \quad (2)$$

Потери при передаче данных имеют нормальный закон распределения:

$$P_L(d) = 20 \log_{10}(f_{\text{МГц}}) + 20 \log_{10}(d) - 28; \quad (3)$$

$$P_t = 100 \text{ м} \cdot \text{Вт} \quad (20 \text{ дБ} \cdot \text{м} \cdot \text{Вт}), \\ G_t = 1, G_r = 1, \lambda = 0,125 \text{ м}, d = 100 \text{ м},$$

следовательно, по формуле (1) рассчитаем мощность сигнала, поступающего на антенну приёмника:

$$P_t = \frac{100 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot (0,125)^2}{(4 \cdot 3,14)^2 \cdot (100)^2} = \\ = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} = 4,3 \cdot 10^{-9} \text{ мВт};$$

$$P_r = 10 \log(4,3 \cdot 10^{-5} \text{ мВт}) = -43,665 \text{ дБ} \cdot \text{м} \cdot \text{Вт}.$$

Зависимость потерь при передаче сигналов с учётом нормального распределения составит

$$P_L(d) = \overline{P}_L(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma,$$

где $\overline{P}_L(d_0)$ — затухание на эталонном расстоянии; X_σ — нулевая гауссовая случайная величина со стандартным отклонением, дБ; d_0 — расстояние между передатчиком и приёмным модулем (1200 м в свободном пространстве); d — эталонное расстояние между передатчиком и приёмным модулем (100 м в помещении); n — показатель степени потерь в тракте (среднее значение для офисных помещений $n = 3$ с отклонением в 7 дБ).

Из уравнений (1) — (3) можно выразить

$$\overline{P}_L(d) = 20 \log_{10}(f_{\text{МГц}}) + \\ + 10n \log_{10}(d) - 28 + X_\sigma, \quad (4)$$

где f — частота модуля, равная 2400 МГц; расстояние между модулями внутри помещения — допустимо 100 м.

Подставляя данные в уравнение (4), получим следующие значения:

$$\overline{P}_L(d) = 20 \log_{10}(2400) + \\ + 10(3) \log_{10} 100 - 28 + X_\sigma = 99,6 \text{ дБ}.$$

Исследования проводились в небольшом офисном помещении, которое не нуждается в расчёте распространения и ослабления сигнала при прохождении сквозь стены этажей.

Таким образом, мониторинг является важным компонентом «интеллектуальной транспортной системы России», которая обеспечивает согласованную и взаимосвязанную систему управления перевозками, построенную на использовании современных технологий, в том числе используемых в международных проектах (например, ERTMS, ERTC).

Приведённые данные свидетельствуют, что уже сегодня бортовые системы мониторинга технического состояния мобильных объектов экономически оправданы для различных видов транспорта, где любой сбой в технологической цепочке грозит убытками, несопоставимыми с затратами на такие системы.

Внедрение систем мониторинга в промышленности позволит повысить надёжность эксплуатации объектов, уменьшить затраты на эксплуатацию, повысить коэффициент технической готовности и уменьшить объём ремонта за счёт раннего выявления неисправности, что, в свою очередь, повысит безопасность эксплуатации мобильных объектов.

Библиографические ссылки

1. Панфилов Д., Соколов М. Введение в беспроводную технологию ZigBee стандарта 802.15.4 // Электронные компоненты. 2004. № 12. С. 73—79.
2. Соколов М.А. Программно-аппаратное обеспечение беспроводных сетей на основе технологии ZIGBEE/802.15.4 // Электронные компоненты. 2014. № 12. С. 80—87.
3. Баранова Е. IEEE 802.15.4 и его программная настройка ZigBee // Интернет-журнал по широкополосным сетям и мультимедийным технологиям «Телеспутник». 2008.

4. **Рощупкин Д., Макаренко Н.** Система контроля нагрева ответственных узлов подвижного состава: сб. науч. трудов Украинской гос. академии железнодорожного транспорта. Вып. 123. Харьков: УкрГАЗТ, 2011. С. 217—221.

5. **Шатунов М., Штрапенин Г.** Интеграция технологии ZigBee в электронные устройства // Компоненты и технологии. 2005. № 10(130). С. 130—134.

6. **Пушкарев О.И.** Построение сети ZigBee // Беспроводные технологии. 2013. № 1. С. 34—38.

7. **Головаш А.Н.** Бортовая система контроля // Патент Российской Федерации № 91958. Заявл. 23.11.2009. Оpubл. 10.03.2010. Бюл. № 7. 18 с.

Ссылка для цитирования

Яковлева Ю.С., Макаренко Н.Г., Яковлев Е.В. Мониторинг технического состояния мобильных объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 32—37.

УДК 681.5:004.4

А.Ф. Антипин, канд. техн. наук, **Е.В. Антипина**, канд. физ.-мат. наук
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

andrejantipin@ya.ru

МНОГОМЕРНЫЙ НЕЧЁТКИЙ ИНТЕРВАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР С МЕХАНИЗМОМ ПРЕДСКАЗАНИЯ ТЕРМОВ

Рассмотрены особенности структуры и принцип работы многомерного нечёткого интервально-логического регулятора с механизмом предсказания термов. Приведены результаты вычислительного эксперимента применительно к системе автоматического регулирования расхода воздуха на паровой котёл.

Ключевые слова: нечёткая логика; многомерный интервально-логический регулятор; система продукционных правил; механизм предсказания термов.

The structural features and the principle of operation of a multidimensional fuzzy interval-logic controller with a term prediction mechanism are considered. The results of a computational experiment with reference to a system for automatically controlling the air flow to a steam boiler are presented.

Keywords: fuzzy logic; multidimensional interval-logic controller; system of production rules; terms prediction mechanism.

Введение. В настоящее время нечёткие регуляторы получают всё большее распространение в системах автоматического управления технологическими процессами и объектами, для которых затруднительно или невозможно получение адекватных математических моделей. Как правило, подобные процессы и объекты являются многомерными и содержат большое количество взаимосвязанных регулируемых параметров [1], что создаёт дополнительные трудности при разработке системы автоматизации. Это приводит к использованию многомерных нечётких регуляторов и всевозможных решений на их основе (например, в качестве модуля для автоматической подстройки параметров ПИД-регуляторов) [2—4].

В связи с этим всё более актуальным становится создание эффективных методов, алгоритмов и/или способов работы нечётких

регуляторов, позволяющих повысить их технические характеристики и, как следствие, область применения [5—7].

Многомерные интервально-логические регуляторы (МИЛР) являются одной из разновидностей многомерных нечётких регуляторов с прямоугольной (в большинстве случаев) и/или ромбовидной функцией принадлежности μ . Ключевой особенностью МИЛР является отказ от последовательной обработки системы продукционных правил (СПП), содержащейся в блоке логического вывода (БЛВ). Вместо этого в МИЛР каждое продукционное правило имеет свой уникальный идентификационный (*ID*) номер, который определяется соответствующим механизмом в каждом цикле сканирования входных параметров. Это повышает быстродействие системы автоматического регулирования [8] и предоставляет

возможности оценки качества программного кода [9].

МИЛР с механизмом предсказания термов. На рис. 1 представлена развёрнутая блок-схема МИЛР, где блоки фаззификации и дефаззификации заменены на соответствующие им блоки интервализации и деинтервализации, выполняющие схожие функции, но с учётом нетрадиционной архитектуры МИЛР [1, 8, 9].

Принцип работы МИЛР заключается в следующем: сначала входные непрерывные величины x_1, x_2, \dots, x_n поступают в блок тревоги БТ, где осуществляется контроль нахождения их значений в пределах указанных диапазонов, при выходе из которых генерируется сигнал тревоги, означающий прерывание работы МИЛР. Если значения всех входных величин входят в заданные для них интервалы, то они передаются в блок предсказания БП вместе с идентификационным (ID) номером производственного правила, который был получен на предыдущем цикле работы МИЛР.

Затем интервализаторы I_1, I_2, \dots, I_n выполняют интервализацию (т. е. определение принадлежности к тем или иным интервалам или термам) значений каждой непрерывной величины x_1, x_2, \dots, x_n , начиная с интервалов (термов), найденных на предыдущей итерации (или начиная с первого терма, если регулятор был запущен впервые). Если значения выбранных термов равны логической единице (т. е. текущее значение непрерывной величины лежит в границах терма), то интервализация прекращается, в противном случае сканируются соседние, а затем и все оставшиеся интервалы до тех пор, пока не будут найдены термы, значения которых равны логической единице.

Пример интервализации значения непрерывной величины x , интерпретированной термами T , в МИЛР с механизмом предсказания термов представлен на рис. 2 для случая, когда порядковый номер терма T , найденный на предыдущей итерации, i .

Одной из основных особенностей разработанной структуры МИЛР является интерпретация всех непрерывных величин эквивалентной совокупностью термов T по алгоритму, согласно которому каждое известное значение каждой непрерывной величины представля-

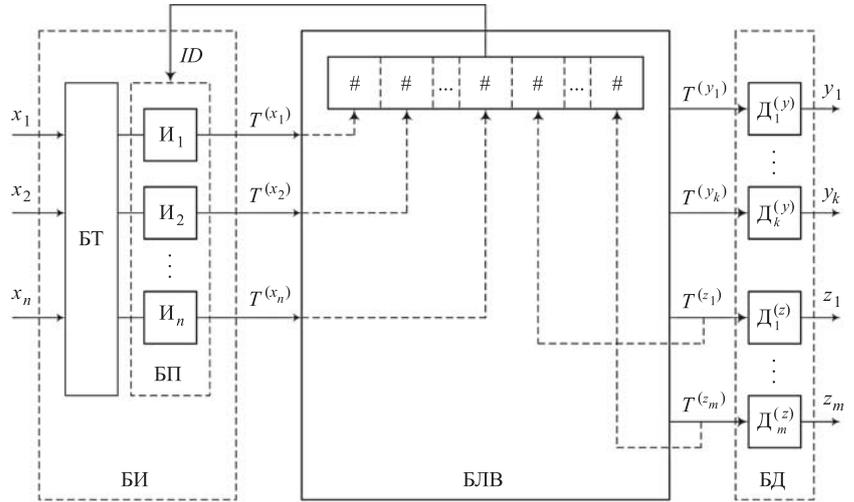


Рис. 1. Развёрнутая блок-схема МИЛР с механизмом предсказания термов: I_1, I_2, \dots, I_n — интервализаторы входных величин x_1, x_2, \dots, x_n ; $D_1^{(y)}, D_2^{(y)}, \dots, D_k^{(y)}$ — деинтервализаторы выходных величин y_1, y_2, \dots, y_k ; $D_1^{(z)}, D_2^{(z)}, \dots, D_m^{(z)}$ — деинтервализаторы выходных величин z_1, z_2, \dots, z_m с обратной связью; БТ — блок тревоги; БП — блок предсказания термов; БИ — блок интервализации, включающий блок тревоги БТ, блок предсказания термов БП и блоки интервализации I_1, I_2, \dots, I_n ; БЛВ — блок логического вывода МИЛР; БД — блок деинтервализации, объединяющий все блоки деинтервализации $D_1^{(y)}, D_2^{(y)}, \dots, D_k^{(y)}$ и $D_1^{(z)}, D_2^{(z)}, \dots, D_m^{(z)}$; T — порядковые номера термов переменных МИЛР в текущий момент времени t

ется тремя термами: одним центральным и двумя окрестными (или крайними), расположенными с двух сторон от центрального терма и определяющими допустимую погрешность вычислений, т. е.:

а) значения, введённые в качестве экспертных данных, принимаются за контрольные точки, которые представляют собой центральные термы вида: $[p^{(k)}; p^{(k)}]$, где $p^{(k)}$ — конкретное значение какой-либо переменной МИЛР;

б) интервалы значений переменных МИЛР между контрольными точками делятся пополам, образуя левый и правый окрестные термы.

На рис. 3 приведён один из вариантов схемы интерпретации непрерывной величины x

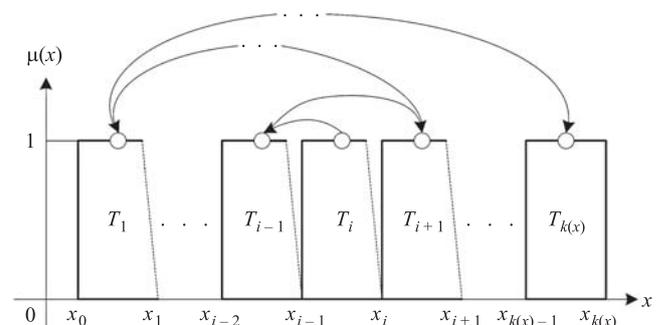


Рис. 2. Пример интервализации значения непрерывной величины x

совокупностью термов T , где $x_i^{(k)}$ — n значений (или контрольных точек) x_i , $i = 1, 2, \dots, n$; $x_i^{(л)}$ и $x_i^{(п)}$ — левое и правое крайние значения, определяющие окрестность, x_i , рассчитываемые по выражениям

$$x_i^{(л)} = \begin{cases} x_i^{(к)} - \frac{x_{i+1}^{(к)} - x_i^{(к)}}{2}, & i = 1; \\ x_i^{(к)} - \frac{x_i^{(к)} - x_{i-1}^{(к)}}{2}, & i > 1, \end{cases}$$

$$x_i^{(п)} = \begin{cases} x_i^{(к)} + \frac{x_{i+1}^{(к)} - x_i^{(к)}}{2}, & i < n; \\ x_i^{(к)} + \frac{x_i^{(к)} - x_{i-1}^{(к)}}{2}, & i = n. \end{cases}$$

Термы T определяются следующим образом:

- $T_i^{(к)}$, если $x \in [x_i^{(к)}; x_i^{(к)}]$, i — любое;
- $T_i^{(л)}$, если $x \in [x_i^{(л)}; x_i^{(к)}]$, i — любое;
- $T_i^{(п)}$, если $x \in (x_i^{(к)}; x_i^{(п)})$, $i < n$;
- $T_i^{(п)}$, если $x \in (x_i^{(к)}; x_i^{(п)}]$, $i = n$.

К преимуществам данного способа интервализации следует отнести тот факт, что при точном совпадении значения переменной МИЛР с термом $T^{(к)}$, определяющим какую-

либо контрольную точку, погрешность вычислений будет равна нулю.

По окончании интервализации порядковые номера термов T входных непрерывных величин x_1, x_2, \dots, x_n передаются в блок логического вывода БЛВ для формирования идентификационного номера текущего продукционного правила из СПП. Вместе с ними в БЛВ возвращаются значения порядковых номеров термов выходных непрерывных величин z_1, z_2, \dots, z_m , участвующих в логическом выводе и обеспечивающих обратную связь.

Введение в структуру МИЛР механизма уникальных номеров продукционных правил обусловлено тем, что в каждый момент времени t существует один и только один терм, значение которого равно логической единице, для каждой непрерывной величины МИЛР. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что в каждый момент времени t существует одно и только одно продукционное правило, антецедент которого также равен логической единице [1]. Каждое продукционное правило, в свою очередь, однозначно определяет совокупность значений выходных величин МИЛР.

Совокупность номеров продукционных правил представляет систему продукционных правил, работающую по схеме (рис. 4), из которой следует, что контрольным термам входных переменных будут соответствовать контрольные термы взаимосвязанных выходных переменных, а окрестным термам — соответствующие им крайние термы.

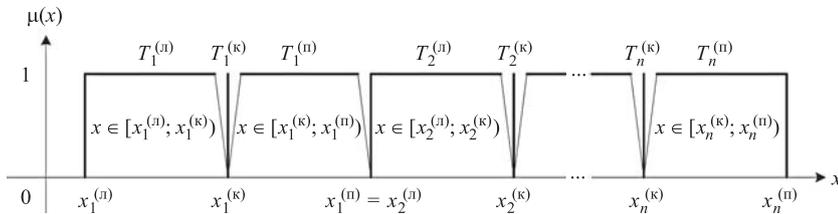


Рис. 3. Пример интерпретации непрерывной величины x совокупностью термов T

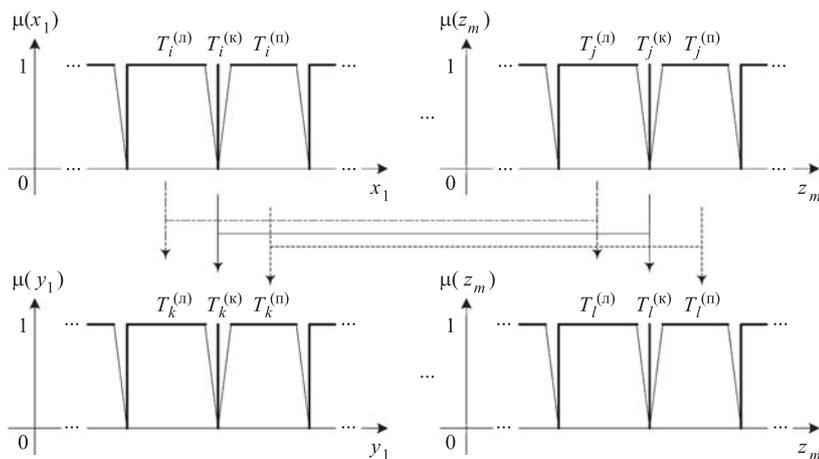


Рис. 4. Принцип работы блока логического вывода МИЛР

По окончании работы блока логического вывода по сформированному им идентификационному номеру из базы данных или соответствующих массивов (зависит от технической реализации СПП) будут выбраны порядковые номера термов, в границах которых лежат значения выходных величин y_1, y_2, \dots, y_k и z_1, z_2, \dots, z_m МИЛР, которые подаются на входы деинтервализаторов $D_1^{(y)}, D_2^{(y)}, \dots, D_k^{(y)}$ и $D_1^{(z)}, D_2^{(z)}, \dots, D_m^{(z)}$.

Деинтервализаторы $D_1^{(y)}, D_2^{(y)}, \dots, D_k^{(y)}$ и $D_1^{(z)}, D_2^{(z)}, \dots, D_m^{(z)}$ формируют значения выходных величин y_1, y_2, \dots, y_k и z_1, z_2, \dots, z_m по заранее заданному алгоритму из интервалов термов, идентификационные номера которых были получены в блоке логического вывода МИЛР.

Вычислительный эксперимент.

Проведём вычислительный эксперимент и оценку МИЛР с механизмом предсказания термов на примере системы регулирования расхода воздуха на паровой котёл [8, 10], схема которой представлена на рис. 5.

Из схемы следует, что МИЛР имеет четыре входные непрерывные величины и одну выходную величину. Исходя из того, что величины F_{Γ}^1 , F_{Γ}^2 и $F_{\text{в}}$ интерпретируются пятью термами, а $Q_{\text{к}}$ — тремя термами, максимально возможное количество продукционных правил, составляющих СПП, R_{max} определяется по формуле

$$R_{\text{max}} = \prod_{i=1}^4 k(x_i) + 1 = 376,$$

где $k(x)$ — количество термов входной непрерывной величины x МИЛР.

Увеличение значения R_{max} на единицу подразумевает включение в СПП аварийного правила, которое описывает действия системы при выходе какой-либо величины за пределы указанных диапазонов, например, при обрыве проводов.

Минимальное количество логических операций L_{min} , производимых контроллером в процессе интервализации значений непрерывных величин и, как следствие, формирования идентификационных номеров продукционных правил, зависит от количества входных непрерывных величин n МИЛР [8, 9] и определяется по формуле

$$L_{\text{min}} = 4n = 16.$$

Количество логических операций L , выполняемых контроллером при отключении механизма предсказания термов, рассчитывают по формуле

$$L = \sum_{i=1}^4 [k(x_i) + 1] = 22.$$

Максимальное сокращение числа логических операций в каждом цикле работы регулятора составляет 27 %.

С учётом довольно малой продолжительности одного цикла работы современных программируемых логических контроллеров (ПЛК), а также низкой вероятности изменения значений входных величин более чем на один терм за один цикл работы МИЛР, мож-

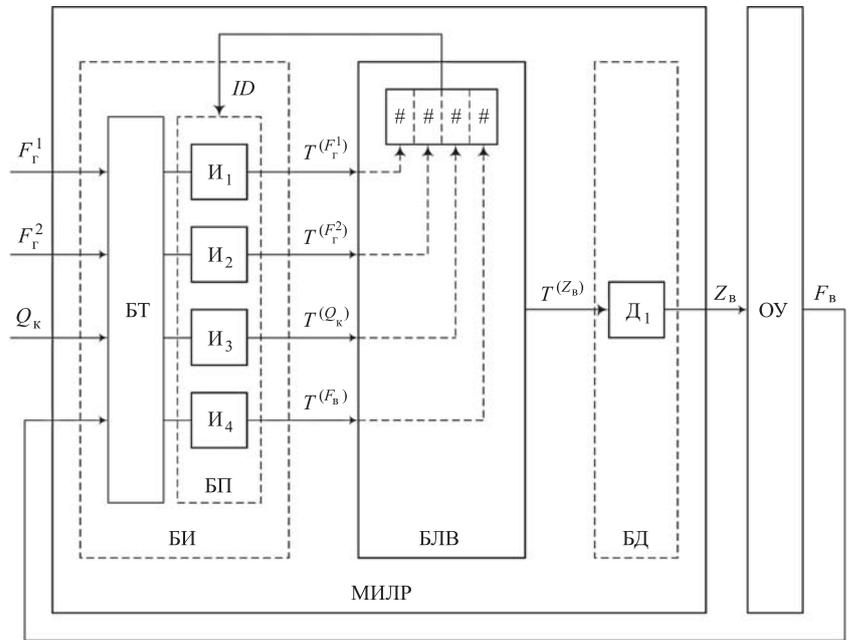


Рис. 5. Система регулирования расхода воздуха на паровой котёл:

F_{Γ}^1 , F_{Γ}^2 , — расход топливного газа; $Q_{\text{к}}$ — концентрация кислорода в газах; $Z_{\text{в}}$ — сигнал управления дутьевым вентилятором; $F_{\text{в}}$ — расход воздуха на котёл; ОУ — объект управления

но сделать вывод, что текущее сокращение числа логических операций будет равным или близким к максимальному в подавляющем большинстве случаев.

Так, при вероятности изменения входных величин в течение одного цикла работы МИЛР, равной 3 %, вероятность изменения идентификационного номера продукционного правила $P(ID)$ составит

$$P(ID) = 1 - [1 - P(F_{\Gamma}^1)] \times \\ \times [1 - P(F_{\Gamma}^2)][1 - P(Q_{\text{к}})][1 - P(F_{\text{в}})] = 0,115,$$

где $P(F_{\Gamma}^1)$, $P(F_{\Gamma}^2)$, $P(Q_{\text{к}})$ и $P(F_{\text{в}})$ — принятые вероятности изменения термов непрерывных величин F_{Γ}^1 , F_{Γ}^2 , $Q_{\text{к}}$ и $F_{\text{в}}$, равные 0,03.

В связи с этим вероятность предсказания ID -номера продукционного правила в текущем цикле работы МИЛР составит

$$P(\overline{ID}) = 1 - P(ID) = 0,885.$$

Данный расчёт говорит о том, что с вероятностью 88,5 % в МИЛР будет отработано минимальное количество операций сравнения L_{min} , равное 16, при расчётном числе операций сравнения L , равном 22.

Заключение. Таким образом, использование многомерных нечётких интервально-логических регуляторов с механизмом предсказания термов при разработке систем автоматического управления даёт ряд преимуществ в плане снижения вычислений и, как следствие, повышения быстродействия по сравнению с нечёткими регуляторами с довольно объёмной системой продукционных правил, где обработка правил выполняется последовательно и полностью [2, 11].

Ввиду некоторых сложностей, возникающих в процессе разработки ПЛК-программ с использованием МИЛР и нечётких регуляторов в целом, к которым можно отнести формирование системы продукционных правил и оценку эффективности работы, в Стерлитамакском филиале Башкирского государственного университета авторами был разработан комплекс программ, предназначенный для расчёта и анализа параметров МИЛР, визуальной разработки ПЛК-программ МИЛР, а также создания нечётких моделей их работы.

На рис. 6 показано приложение для автоматизированного проектирования многомерных интервально-логических регуляторов, где составление системы продукционных правил осуществляется с помощью специального графического языка программирования STEP-GRAPH, разработанного авторами.

Данное программное обеспечение может применяться специалистами в сфере разработки автоматизированных систем управления сложными технологическими процессами или объектами, не имеющими адекватной математической модели, и обеспечить создание надёжных и эффективных ПЛК-программ МИЛР, сократив при этом сроки их разработки и сопровождения.

Библиографические ссылки

1. Антипин А.Ф. Системы управления технологическими процессами на базе многомерных логических регуляторов // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 1. С. 12—18.
2. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
3. Li Y., Li Y., Ma Z. Computation tree logic model checking based on possibility measures // Fuzzy Sets and Systems. 2015. Vol. 262. P. 44—59.

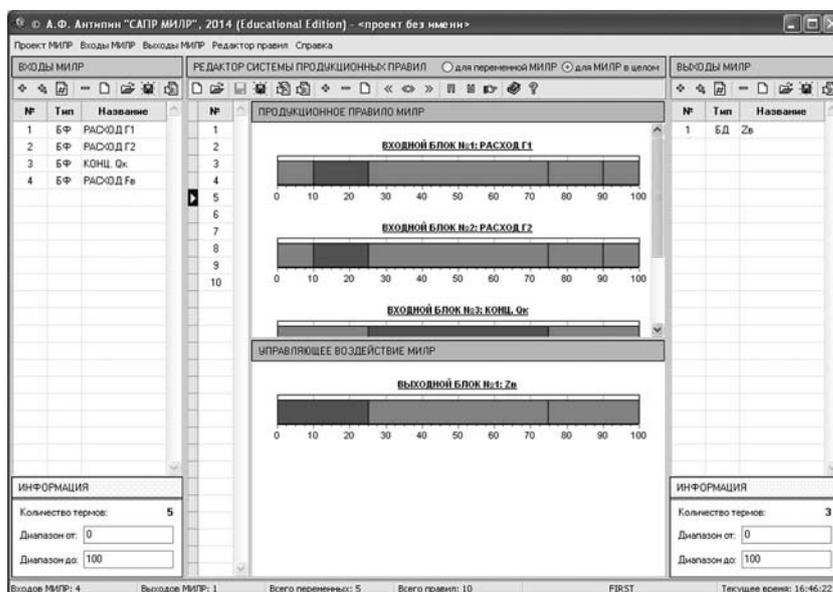


Рис. 6. Приложение для автоматизированного проектирования МИЛР

4. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода. М.: Физматлит, 2002. 256 с.

5. Подколзин А.С. Компьютерное моделирование логических процессов. Архитектура и языки решателя задач. М.: Физматлит, 2008. 1024 с.

6. Усков А.А., Сургучева И.В., Горбунов А.М. Анализ систем обработки информации и управления с помощью групповых нечётких чисел // Программные продукты и системы. 2009. № 3. С. 19—21.

7. Степашина Е.В. Оптимизация финансовых показателей предприятия на основе нейросетевой модели // Информационные системы и технологии. 2014. № 5. С. 34—42.

8. Антипин А.Ф. Способ фазсификации значений непрерывных величин с предсказанием термов в многомерном чётком логическом регуляторе // Автоматизация в промышленности. 2013. № 9. С. 65—68.

9. Антипин А.Ф. Особенности программной реализации многомерных логических регуляторов с переменными в виде совокупности аргументов двузначной логики // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 2. С. 30—36.

10. Степашина Е.В., Байтимерова А.И., Мустафина С.А. О свойствах решений задач моделирования каталитических процессов с переменным реакционным объёмом // Журнал Средневолжского математического общества. 2010. Т. 12. № 3. С. 122—128.

11. Седова Н.А., Седов В.А. Логико-лингвистическая модель оценки уровня аварийных ситуаций // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. 2016. № 2. С. 65—69.

Ссылка для цитирования

Антипин А.Ф., Антипина Е.В. Многомерный нечёткий интервально-логический регулятор с механизмом предсказания термов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 37—41.

УДК 681.513

М.С. Селезнева, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
m.s.selezneva@mail.ru

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТЕПЕНИ УПРАВЛЯЕМОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОЙСТВА ДУАЛЬНОСТИ

Рассмотрены критерии наблюдаемости и управляемости линейных моделей динамических объектов. Для определения качественных характеристик систем приведены критерии степени управляемости и наблюдаемости. Анализ известных качественных критериев показал эффективность численных критериев степени наблюдаемости переменных состояния и чрезвычайную трудоёмкость предварительных вычислений для определения степени управляемости переменных состояния моделей. Предложено использовать свойство дуальности и численный критерий степени наблюдаемости для вычисления степени управляемости моделей динамических объектов.

Ключевые слова: наблюдаемость; управляемость; критерий степени управляемости; численный критерий степени наблюдаемости; свойство дуальности.

The criteria of observability and controllability of linear models of dynamic objects are considered. The degree controllability criterion and observability are given to determine the qualitative characteristics of systems. An analysis of the known qualitative criterion showed the effectiveness of numerical criteria for the degree of observability of state variables and the extreme labor input of preliminary calculations to determine the degree of controllability of state variables of models. It is proposed to use the duality property and the numerical criterion of the degree of observability to calculate the degree of controllability for models of dynamic objects.

Keywords: observability; controllability; degree controllability criterion; numerical criterion of degree of observability; property of duality.

Введение. Управление динамическими объектами предполагает предварительное исследование принципиальной возможности реализовать процесс управления. Для этого сначала исследуют свойство управляемости, которое даёт ответ на вопрос о принципиальной возможности с помощью выбранного управления переводить объект из исходного состояния в желаемое. При формировании управляющего воздействия на объект используется текущая информация о его состоянии. Обычно непосредственно измеряемая информация подвергается обработке с помощью различных алгоритмов оценивания для восстановления всего вектора состояния и подавления измерительного шума. Реализация алгоритма оценивания предполагает предварительное рассмотрение вопроса о возможности оценивания вектора состояния по выбранным измерениям, т. е. исследование наблюдаемости системы. Для определения наблюдаемости и управляемости применяются различные критерии [1—3], самым известным из которых является критерий Калмана [3, 4]. Эти критерии позволяют определить принципиальную возможность наблюдаемости и управляемости исследуе-

мых систем. Для определения эффективности управления и наблюдения применяются критерии определения качественных характеристик систем — степени наблюдаемости и управляемости [5—8]. Рассматриваются наиболее известные качественные критерии и сделан вывод о трудоёмкости использования критериев степени управляемости и эффективности применения численного критерия степени наблюдаемости переменных состояния.

В статье предложен подход к определению степени управляемости переменных состояния на основе использования свойства дуальности [9, 10] и численного критерия степени наблюдаемости.

Модели исследуемых объектов. Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект,

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1, k} x_k + G_{k+1, k} W_k, \quad (1)$$

где x_k — n -вектор состояния; W_k — r -вектор входного возмущения; $\Phi_{k+1, k}$ — $(n \times n)$ -матрица объекта; $G_{k+1, k}$ — $(n \times r)$ -матрица входа.

Входные возмущения предполагаются r -мерным дискретным аналогом гауссового бе-

лого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей:

$$M[W_j W_k^T] = Q_k \delta_{j,k},$$

где Q_k — неотрицательно определённая матрица размерности $(r \times r)$; $\delta_{j,k}$ — символ Кронекера,

$$\delta_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } j = k; \\ 0, & \text{если } j \neq k. \end{cases}$$

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1} + V_{k+1}. \quad (2)$$

Здесь z_{k+1} — m -вектор измерений; V_{k+1} — m -вектор ошибок измерения; $H_{k+1,k}$ — $(m \times n)$ -матрица измерений. Ошибки измерений предполагаются m -мерным дискретным аналогом гауссового белого шума, для которого $M[V_{k+1}] = 0$,

$$M[V_j V_{k+1}^T] = R_{k+1} \delta_{j,k+1}, \quad (3)$$

где R_{k+1} — неотрицательно определённая матрица размерности $(m \times m)$.

Ошибки измерения (иначе измерительный шум) и входные возмущения (иначе входной шум) некоррелированы:

$$M[V_j W_k^T] = 0 \text{ при любых } j \text{ и } k. \quad (4)$$

Начальное значение вектора состояния полагаем гауссовым случайным вектором с нулевым математическим ожиданием, не зависящим от входных возмущений ошибок измерений: $M[x_0 W_k^T] = 0$; $M[x_0 V_{k+1}^T] = 0$ для любого k .

Ковариационная матрица $M[x_0 x_0^T] = P_0$ представляет собой неотрицательно определённую матрицу размерности $(n \times n)$.

Фильтр Калмана имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k + K_{k+1} v_{k+1}; \\ P_{(k+1)/k} &= \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T + Q_k; \\ K_{k+1} &= P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1}; \\ P_{k+1} &= (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{(k+1)/k}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \hat{x}_k — оценка вектора состояния x_k ; v_{k+1} — обновляемая последовательность или невязка; $P_{k+1,k}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; K_{k+1} — матрица усиления фильтра Калмана; P_{k+1} — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания; I — единичная матрица.

С помощью фильтра Калмана осуществляется не только восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влияние измерительного шума.

Для оценки вектора состояния x с помощью фильтра Калмана необходимо, чтобы выполнялось условие полной наблюдаемости [11, 12]. Возможность построения управления объектом и его осуществления предполагает реализацию такого свойства системы, как управляемость [3, 4].

В данном случае рассматривается сопряжённая система и к ней применяется критерий полной наблюдаемости. Понятия наблюдаемости и управляемости являются структурными свойствами исследуемых систем.

Для определения качественных характеристик процессов наблюдения и управления необходимо воспользоваться критериями степени наблюдаемости и управляемости.

Численный критерий степени наблюдаемости. Качественной характеристикой наблюдаемых компонент вектора состояния является степень наблюдаемости. Степень наблюдаемости — абстрактная характеристика, и известные подходы позволяют определить лишь, какие из компонент вектора состояния наблюдаются лучше. Эти подходы дают только относительную оценку наблюдаемости компонент конкретного вектора состояния исследуемой системы и не позволяют проводить сравнение наблюдаемости компонент векторов состояния различных систем. Поэтому все известные подходы неудобны для использования при сравнении качества наблюдения в общем случае.

Непосредственно измеряемые компоненты вектора состояния имеют максимальную степень наблюдаемости. Качество наблюдения и достоверность информации непосредственно измеряемой компоненты вектора состояния зависят лишь от погрешности измерения, т. е. от измерительного шума. Величина измерительного шума определяется характеристиками внешнего источника информации, а также условиями функционирования, т. е. пассивными и активными помехами. Поэтому, полагая степень наблюдаемости измеряемой компоненты вектора состояния максимальной, имеем в виду то, что степень наблюдаемости равна 100 % с точностью до измерительного шума.

Пусть объект описывается уравнением вида

$$x_k = \Phi x_{k-1} + G w_{k-1}, \quad (6)$$

где x_{k-1} — вектор состояния; w_{k-1} — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; Φ — $(n \times m)$ -матрица системы; G — $(n \times l)$ -матрица входного шума.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (7)$$

где z_k — m -вектор измерений; H — $(m \times n)$ -матрица измерений; v_k — m -вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причем v и w некоррелированы между собой (т. е. $M[v_j w_k^T] = 0$).

Не теряя общности постановки задачи, предположим, что измеряется одна компонента вектора состояния, т. е. $H = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$.

Разобьём каждый шаг измерений на n подтактов и выразим эти измерения через вектор состояния на первом подтакте измерений:

$$\begin{aligned} z_1 &= Hx_1 + v_1; \\ z_2 &= H\Phi x_1 + Hw_1 + v_2; \\ &\dots \\ z_n &= H\Phi^{n-1}x_1 + H\Phi^{n-2}w_1 + \dots + Hw_{n-1} + v_n \end{aligned} \quad (8)$$

или в матричной форме

$$z^* = Sx_1 + v^*, \quad (9)$$

$$\text{где } z^* = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \dots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix};$$

$$v^* = \begin{bmatrix} v_1 \\ Hw_1 + v_2 \\ \dots \\ H\Phi^{n-2}w_1 + \dots + Hw_{n-1} + v_n \end{bmatrix}.$$

Выразим из уравнения объекта вектор состояния в первом подтакте измерения:

$$x_1 = S^{-1}z^* + S^{-1}v^*. \quad (10)$$

Введём обозначение $y = S^{-1}z^*$ и запишем уравнение в скалярном виде:

$$y^i = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_n z_n, \quad (11)$$

где y^i — элемент вектора y ; a_i — i -я строка матрицы S^{-1} .

Для произвольной компоненты вектора состояния приведённый измерительный шум в соответствии с уравнением (11) имеет вид

$$v^{i*} = a_1 v_1 + a_2 v_2 + \dots + a_n v_n. \quad (12)$$

Дисперсия приведённого к i -й компоненте измерительного шума определяется коэффициентами a_1, a_2, \dots, a_n , т. е.

$$r^{*i} = M[v^{*i}] = [a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2]r, \quad (13)$$

где $r = M[v^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума v .

Критерий, по которому определяется степень наблюдаемости, имеет вид

$$\lambda^i = \frac{P_0^i r}{P_0 r^{*i}}, \quad (14)$$

где P_0 — дисперсия начального значения непосредственно измеряемой компоненты вектора состояния z .

В критерии степени наблюдаемости (14) мерой наблюдаемости является скаляр. Эта особенность выгодно отличает представленный критерий от известных, так как позволяет проводить сравнение степеней наблюдаемости компонент различных векторов состояния.

Критерии степени управляемости. Критерий управляемости Калмана позволяет определить, управляем ли весь вектор состояния системы.

Критерий, предложенный в работах [3, 13], позволяет определить, какие компоненты вектора состояния управляемы и выделить компоненты, которыми можно управлять наилучшим образом. Исключив из вектора состояния неуправляемые компоненты, можно достичь полной управляемости исследуемой системы

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \quad z(t) = Hx(t), \quad (15)$$

или

$$\dot{x}(t) = -A^T x_c(t) - H^T u_c(t); \quad z_c(t) = B^T x_c(t),$$

где x — n -вектор состояния; u — m -вектор управления; z — вектор измерений; A, B — $(n \times m)$ -матрицы системы и управления; H — матрица измерений.

В данном случае рассматривается сопряжённая система и к ней применяется критерий полной управляемости. Для того чтобы воспользоваться этим критерием, необходимо перейти от матричного уравнения к системе скалярных уравнений. Затем перевести скалярные уравнения из пространства оригиналов в пространство изображений по Лапласу и разрешить полученную систему уравнений относительно каждой переменной. Анализуются найденные по правилу Крамера определители.

Исследуем критерий управляемости вида

$$C_1\Delta_1 + C_2\Delta_2 + \dots + C_n\Delta_n \neq 0. \quad (16)$$

Данный критерий позволяет получить непосредственную связь между компонентами вектора состояния и вектора управления. Эта связь позволяет выносить суждение о степени по той или иной переменной состояния. В случае одинаковой структуры выражений для Δ по коэффициентам этих выражений можно судить о степени управляемости.

Например, если $\Delta_1 = k\Delta_2$, где $\Delta_i = f(u_1, u_2, \dots, u_n)$, то хотя система и управляема по координатам x_1, x_2 , эффективная управляемость достигается только по одной из них.

Степень управляемости можно определить, исследовав систему канонического вида, т. е. систему уравнений, в которой отсутствует связь по переменным состояния.

Запишем первое уравнение (15) в канонической форме:

$$\dot{x}_c^k(t) = A^k x_c^k(t) + H^k u_c^k(t), \quad (17)$$

где $A^k = -V^{-1}A^T V$; $H^k = -V^{-1}H^T$; V — матрица канонического преобразования, $V = [v_1 \dots v_n]$; v_i — собственные векторы исследуемой системы.

Система является полностью управляемой, если матрица H^k канонической системы (17) не содержит строк, все элементы которых равны нулю. Следует отметить, что данный критерий можно применять лишь в случае отсутствия кратных собственных значений системы. Степень управляемости характеризуется модули элементов строк матрицы H^k . Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять, лучше или хуже управляемы компоненты вектора состояния по сравнению друг с другом. Лучше управляемы те компоненты вектора состояния, у которых модули

суммы элементов строки матрицы больше модулей сумм элементов других строк.

Численный критерий степени управляемости конкретных переменных состояния [13, 14] динамического объекта позволяет получить численную оценку степеней управляемости компонент вектора состояния.

Рассмотрим критерий степени управляемости, который предполагает исследование системы канонического вида (17).

Определим каноническую матрицу управляемости и исследуем суммы элементов каждой её строки. Обозначим h_i — суммы модулей элементов каждой строки этой матрицы, которые позволяют судить о степени управляемости компонент вектора состояния.

Максимальной степенью управляемости обладает компонента вектора состояния с наибольшей суммой модулей элементов соответствующей строки канонической матрицы управления h_{\max} . Степени управляемости других компонент вектора состояния определяются путём сравнения сумм модулей элементов строк канонической матрицы соответствующих исследуемым компонентам вектора состояния с максимальным значением суммы модулей элементов канонической матрицы. Сравнение степеней управляемости можно проводить, воспользовавшись критерием вида [13]

$$\gamma = \frac{h_i}{h_{\max}}, \quad (18)$$

где h_i — модуль суммы элементов, которые находятся в i -й строке матрицы B^* ; h_{\max} — максимальное значение h_i .

Предложенный критерий γ степени управляемости позволяет определить степень управляемости каждой конкретной компоненты вектора состояния в численном виде.

Однако, чтобы воспользоваться критерием (18), необходимо проведение предварительных трудоёмких преобразований, что существенно ограничивает его применение в практических приложениях.

Определение степени управляемости с использованием свойства дуальности. В связи с тем, что численные критерии степени управляемости требуют проведения предварительных достаточно сложных вычислений, для упрощения процедуры определения целесообразно применять другой подход. Например, для определения степени управляемости переменных состояния системы можно воспользо-

ваться свойством дуальности и простым численным критерием степени наблюдаемости (14). При исследовании свойства дуальности Калман доказал, что изменение матриц P и K происходит у исследуемой системы так же, как и у сопряжённой системы, только в обратном времени [9, 10]. Поэтому при использовании для определения степени управляемости переменных состояния необходимо применять численный критерий степени наблюдаемости, включающий эти матрицы или одну из них, например критерий степени наблюдаемости (14), включающий матрицы P .

Таким образом, предлагаемый подход к определению степени управляемости переменных состояния состоит из трёх этапов: 1) построение сопряжённой системы; 2) определение матриц P и/или K ; 3) вычисление степени наблюдаемости переменных состояния сопряжённой системы с помощью численного критерия. При использовании критерия степени наблюдаемости (14) на втором этапе определяются матрицы P для сопряжённой системы, а также элементы i -й строки матрицы S^{-1} .

Заключение. Рассмотрены критерии определения качественных характеристик динамических объектов — критерии степени наблюдаемости и управляемости. На основе результатов исследований Калмана свойств сопряжённых систем предложен подход к определению степени управляемости переменных состояния с помощью критерия степени наблюдаемости. Выбран удобный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния и представлены этапы определения степени управляемости конкретных компонент вектора состояния динамического объекта.

Библиографические ссылки

1. **Воронов А.А.** Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М.: Наука, 1979. 336 с.

2. **Ham F.M., Brown R.G.** Observability, eigenvalues, and Kalman filtering // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. AES-19. Iss. 2. March 1983. P. 269—273.

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

4. **Неусыпин К.А.** Исследование критериев управляемости и наблюдаемости навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 9. С. 18—22.

5. **Brown R.G.** Not just observable, but how observable? // National Electronics Conference Proceedings 22. 1966. P. 409—714.

6. **Ablin H.L.** Criteria for degree of observability in a control system // Retrospective Theses and Dissertations. Paper 3188. Iowa State University, 1967.

7. **Жирибок А.Н.** Анализ степени управляемости дискретных динамических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 2. С. 7—14.

8. **Шэнь К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Исследование степени наблюдаемости погрешностей автономных инерциальных навигационных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 1. С. 24—30.

9. **Kalman R.E.** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of the ASME — J. of Basic Engineering. 1982 (ser. D). P. 35—45.

10. **Kalman R.E., Bucy R.S.** New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // J. of Basic Engineering. 1961. P. 95—108.

11. **Gauthier J.P., Kupka I.** Deterministic observation theory and applications. Cambridge University Press, 2001. 240 p.

12. **Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S.** Controllability of linear dynamical systems // Contributions to the Theory of Differential Equations. 1963. Vol. I. No. 2. P. 189—213.

13. **Неусыпин К.А., Фам С.Ф.** Численный критерий степени управляемости переменных состояния // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 7. С. 24—26.

14. **Шэнь К., Неусыпин К.А.** Исследование критериев степеней наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 723—731.

Ссылка для цитирования

Селезнева М.С. Подход к определению степени управляемости с использованием свойства дуальности // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 1. С. 42—46.

Уважаемые читатели!

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



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Выбор передаточного числа бортовой передачи трансмиссий лёгких гусеничных машин с учётом особенностей распределения передаточных чисел силовых узлов. *Вестник машиностроения.* 2019. № 5.

На базе анализа кинематических схем, конструкций бортовых передач и технических характеристик узлов изделий обоснована разработка методики выбора передаточного числа бортовой передачи и расчёта на ЭВМ прочностных показателей узлов трансмиссии лёгкой гусеничной машины в зависимости от передаточного числа бортовой передачи и частоты вращения конструктивных элементов. Разработана методика оценки расчётов по основным прочностным параметрам, обеспечивающая быстроту расчётов при изменении конструктивных элементов, материалов, скоростных и нагрузочных показателей.

Технические решения для совершенствования привода технологического оборудования. *Вестник машиностроения.* 2019. № 5.

Исследована эффективность использования оборудования с рабочими элементами в виде гибких тяговых связей, в которых движение осуществляется в результате деформирования гибкого звена. Проанализированы схемы волновых механизмов и кинематика их рабочих органов. На основании несимметричной диаграммы движения гибкой связи разработан инерционный конвейер с пружинным компенсатором.

Опыт применения аддитивных технологий при восстановлении изношенной сферической поверхности конуса дробилок КСД и КМД для продления ресурса. *Вестник машиностроения.* 2019. № 5.

Разработана технология восстановления на основе механизированной наплавки в защитных газах сферической поверхности корпуса конуса из стали 35Л без предварительного нагревания детали и нагревания при наплавке. Получены покрытия необходимой толщины и требуемого химического состава с заданной структурой без пор и трещин, прочно соединённые с поверхностью детали.

Определение рациональных режимов осадки с кручением заготовок титана ВТ1-0 с применением метода активного эксперимента. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 5.

Определены термомеханические режимы осадки заготовок, обеспечивающие максимальные механические характеристики материала. Обработка заготовок давлением включала всестороннюю ковку с последующей осадкой кручением с различными температурами нагрева заготовок и инструмента. Представлены результаты механических испытаний на растяжение и металлографических исследований титана ВТ1-0. Приведены зависимости предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и достигнутой деформации от заданных технологических параметров.

Повышение пластичности при одновременном увеличении прочности Cr—Ni—Mo-сталей в результате изотермической обработки. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 5.

Исследовано изменение фазового состава сталей в процессе изотермической закалки в бейнитном интервале температур. Определены механические свойства сталей после такой обработки. Изучено влияние алюминия и кремния (до 1,5 %) на механические свойства стали, показано повышение прочностных и пластических свойств, при этом более высокий комплекс свойств обеспечивает добавка кремния.

Восстановление эксплуатационных свойств шаровых пальцев автомобилей пластической деформацией. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 5.

Представлена технология восстановления шаровых пальцев большегрузных автомобилей пластической деформацией, позволяющая полностью восстановить работоспособность и ресурс детали, обеспечив при этом значительную экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Энергетическая модель обеспечения качества покрытий в вибрационных технологических системах. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 5.

Представлены результаты экспериментально обоснования энергетической модели обеспечения качества покрытий в вибрационных технологических системах. Установлена приемлемость модели для практического применения на стадии технологической подготовки производства для управления механохимическим синте-

зом процесса в целях решения ряда оптимизационных технологических задач, направленных на повышение качества и эксплуатационных свойств поверхности деталей.

Повышение эффективности спиральных свёрл путём применения многослойных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 5.

Представлены результаты исследований механических свойств износостойких покрытий. Показано влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент при сверлении. Предложена конструкция многослойного покрытия и показана его эффективность.

Инновационные методы комбинированной обработки. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 5.

С использованием алгоритмических процедур «искусственного технологического интеллекта» специалистами кафедры МТ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана синтезированы конкурентоспособные методы комбинированной обработки инструментами с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях различных технологий применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского».

Автоматизация процесса сварки при ремонте парогенераторов реакторных установок атомных ледоколов. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2019. Т. 20. № 5.

Рассмотрена возможность применения автоматической сварки для ремонта парогенераторов атомных ледоколов. Разработаны специали-

зированное сварочное оборудование и технология ремонта путём глушения негерметичных модулей парогенератора и сварки заглушки в условиях ограниченного доступа и радиационного излучения.

Процессы метрологического обеспечения сборочного производства. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2019. Т. 20. № 5.

Представлены вопросы и процессы метрологического обеспечения и измерений при сборке. На примере измерений линейных размеров и наружного диаметра вала рассмотрен выбор методов и средств измерений с учётом характеристики реальных условий, в которых будут выполняться измерения, и с использованием характеристик погрешности. Найдя по известному допуску и номинальному размеру допускаемые погрешности измерения для наружного диаметра вала и внутреннего диаметра отверстия втулки, можно выбрать конкретные средства измерений, которые будут использованы в сборочном производстве.

Численное моделирование процесса деформации теплообменных труб под действием внешней распределённой нагрузки. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2019. Т. 20. № 5.

Представлены результаты численного моделирования процесса деформации теплообменных труб, выполненных из меди марки МЗр. Проведён анализ распределения эквивалентных напряжений под действием внешней распределённой нагрузки при помощи метода конечных элементов. Выявлена зависимость изменения критического давления, требуемого для деформации трубы, от геометрических размеров начального прогиба.

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 24.10.2019.

Подписано в печать 17.12.2019.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

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

Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».

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
