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)
Булдакова Т.И. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
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 — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 73

7
2019

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-3D: моделирование произвольных конструкций электроники на механические и тепловые воздействия 291

Солдатов Е.С., Архаров И.А. Анализ термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа 300

Микаева С.А., Микаева А.С., Петренко Ю.П. Ультрафиолетовая СВЧ-лампа 304

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ямашкин С.А., Ладанова Е.О. Моделирование географически распределённой телекоммуникационной сети 307

Пашкова Е.Э., Кабулова Е.Г. Профили мультиагентной системы управления международными конфликтами 313

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Иваненко С.В., Губенко С.В., Шапкин В.С., Далецкий С.В. Влияние аппаратурных ограничений на точность местоопределения воздушных судов с использованием спутниковых радионавигационных систем при переходе от кодовых к фазовым навигационным определениям 317

Фам Суан Чыонг. Проектирование системы управления и навигационного комплекса беспилотных летательных аппаратов 323

Саргсян Г.А., Сотникова С.Ю., Субботин С.А., Белый А.В. Метод обеспечения тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов 330

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

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 73 **7 / 2019**

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Shalumov A.S., Pershin E.O., Shalumov M.A. ASONIKA-M-3D: simulation of arbitrary electronic structures on mechanical and thermal effects 291

Soldatov E.S., Arkharov I.A. The thermodynamic efficiency analysis of the installations for vapors condensation of the liquefied natural gas 300

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Petrenko Yu.P. Ultraviolet Microwave-Lamp 304

MODERN TECHNOLOGIES

Uamashkin S.A., Ladanova E.O. Modeling a geographically distributed telecommunications network 307

Pashkova E.E., Kabulova E.G. Profilesof themulti-agent control system for international conflict 313

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Mikrin E.A., Zubov N.E., Ivanenko S.V., Gybenko S.V., Shapkin V.S., Daletskiy S.V. Influence of instrumental limitations on the accuracy of aircraft positioning by using satellite radio navigation systems during the transition from code to phase navigation definitions 317

Fam Suan Chyong. Designing a control system and navigation complex of unmanned vehicle 323

Sargsyan G.A.,Sotnikova S.Yu., Subbotin S.A., Beliy A.V. The ensuring method of operation thermal modes of optoelectronic devices 330

© «Innovative Mashinostroenie» Publishers, «Automation. Modern technologies», 2019

УДК 621.396.6.019.3

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

ALS140965@mail.ru

АСОНИКА-М-3D: МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены вопросы автоматизированного расчёта механических и тепловых характеристик произвольных конструкций радиоэлектронных средств: интерфейс и препроцессор подсистемы АСОНИКА-М-3D, механические и тепловые расчёты (примеры задания исходных данных и результатов расчётов), постпроцессор АСОНИКА-М-3D.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; механические характеристики; тепловые характеристики; произвольные конструкции радиоэлектронных средств.

The automated calculation questions of mechanical and thermal characteristics for arbitrary designs of radio electronic equipment are considered: interface and preprocessor of the ASONIKA-M-3D subsystem, mechanical and thermal calculations (examples of initial data assignment and calculation results), post-processor ASONIKA-M-3D.

Keywords: radio device; modeling; mechanical characteristics; thermal characteristics; arbitrary designs of electronic equipment.

Интерфейс АСОНИКА-М-3D. Основное окно подсистемы АСОНИКА-М-3D автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) [1—3] (рис. 1) состоит из нескольких частей: рабочей области (1), панели инструментов (2), дерева объектов (3), панели постпроцессора (4) и главного меню (5). Рассмотрим подробнее некоторые из них.

На *рабочей области* отображается геометрия модели.

Дерево объектов имеет иерархическую структуру, содержит все структурные элементы модели, созданные в рамках одного проекта. Объект, выбранный в дереве, будет также отображён и на рабочей области.

В АСОНИКА-М-3D существуют объекты следующих типов:

модель — твердотельная модель конструкции, которая импортируется в подсистему;

сетка КЭ — конечно-элементная (КЭ) модель, которая генерируется средствами подсистемы;

крепления — механические закрепления, требуемые для проведения расчётов на механические воздействия;

детали — список деталей, из которых состоит модель, как правило, представляющая собой сборную конструкцию;

группы деталей — детали, объединённые в группы для удобства работы со сложными моделями;

группы поверхностей — поверхности, объединённые в группы для удобства задания тепловых условий;

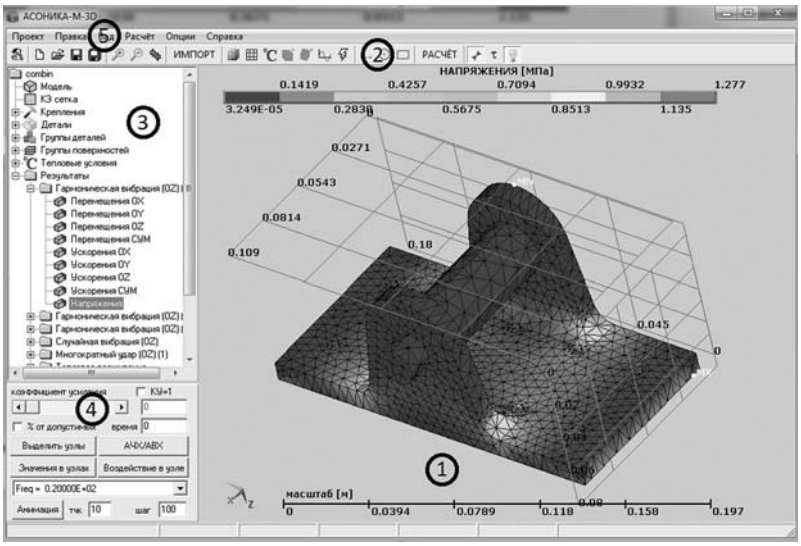


Рис. 1. Окно АСОНИКА-М-3D в процессе работы

тепловые условия — список тепловых ограничений, наложенных на модель перед проведением тепловых расчётов;

давление — нагрузки типа «давление», приложенные к модели перед проведением статического анализа;

результаты — поля напряжений, перемещений, ускорений, температур и других величин, полученные после анализа результатов моделирования конструкций на тепловые и механические воздействия. Все результаты группируются по типу проведённого анализа, т. е. для каждого типа анализа существует свой набор результатов, содержащийся под узлом дерева с названием анализа.

Геометрию модели, отображаемую на рабочей области, можно условно представить в виде иерархической структуры «объём — поверхность — линия — точка». Каждая деталь представляется отдельным объёмом. Каждый объём включает поверхности (плоские или имеющие кривизну), которые его охватывают. Поверхности огибаются линиями (прямыми или кривыми). Каждая линия имеет точки начала и конца.

Панель постпроцессора содержит набор команд, служащих для манипуляций с результатами расчётов: «Вывод графиков амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и амплитудно-временны́х характеристик (АВХ)», «Выбор узлов», «Просмотр результатов в отдельных узлах», «Вывод абсолютных значений результатов», «Анимация результатов» и др.

Проекты и файлы АСОНИКА-М-3D. Работа с каждой моделью ведётся в рамках отдельного проекта, представляющего собой единый именованный блок информации о геометрии модели, КЭ-сетке, свойствах материалов, воздействиях и т. д. Проект создаётся пользователем перед началом работы либо загружается в любой момент работы с программой.

Файлы проектов имеют расширение .rea. Для каждого проекта помимо файла создаётся каталог, имя которого совпадает с именем проекта. В каталоге располагаются файлы с данными проекта, результатами расчётов, а также множество вспомогательных файлов.

Препроцессор АСОНИКА-М-3D. Структуру АСОНИКА-М-3D можно описать, условно разделив её функционал на три части, типичные для систем инженерных расчётов CAE: препроцессор, решатель (или процессор), постпроцессор. Рассмотрим подробно препроцессор. Препроцессор предназначен для подготовки моделей к проведению механического и теплового расчётов.

В препроцессоре решаются следующие основные задачи: импорт трёхмерных моделей деталей и сборок в форматах IGES и STEP, создаваемых в различных CAD-системах; задание материалов; задание механических воздействий; задание креплений; задание тепловых граничных условий; задание параметров КЭ-разбиения; генерация КЭ-сетки. Рассмотрим каждую из этих задач.

Импорт трёхмерных моделей. Решатель АСОНИКА может работать с файлами следующих типов: IGES, STEP и геометрия АСОНИКА.

Импорт моделей. Перед импортом моделей стандартных форматов (IGES и STEP) требуется задать следующие параметры в настройках программы: погрешность склеивания (по умолчанию 0,001) и алгоритм склеивания (по умолчанию подетальное).

В случае возникновения ошибок склейки в процессе импорта программа проинформирует об этом пользователя в соответствующем диалоговом окне (рис. 2). Окно содержит список пар деталей, для которых возникли ошибки при попытке их склеивания в процессе импорта. Пользователю необходимо проверить все пары деталей в этом списке на предмет наличия поверхностей контакта. Пользователь должен вносить правки в исходную модель и повторять процесс импорта до тех пор, пока склеивание не окажется успешным (т. е. пока для всех прилегающих деталей не будут выстроены поверхности контакта).

Импорт файлов блоков стандартных конструкций. В отличие от файлов стандартных форматов (IGES, STEP и др.) перед импортом блоков стандартных конструкций не нужно указывать параметры склеивания деталей (т. е. алгоритм и погрешность склеивания). Программа автоматически настроит параметры склейки для каждого типа блока и соз-

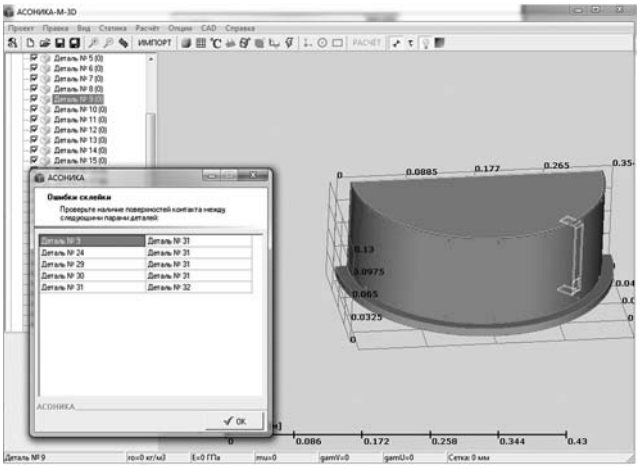


Рис. 2. Диалоговое окно с информацией об ошибках склейки

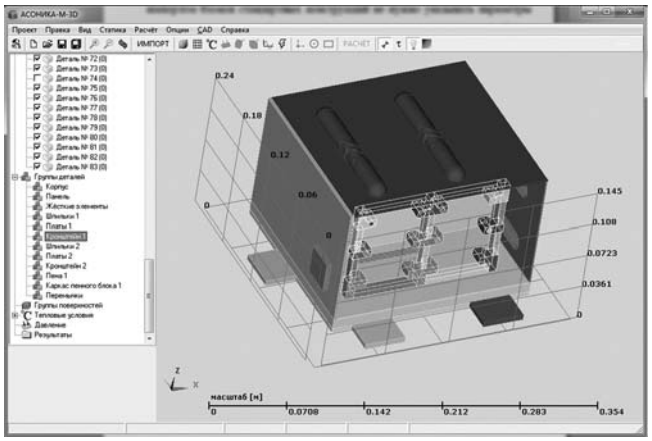


Рис. 3. Импортированная модель блока

даст группы деталей, характерные для каждого типа блока (рис. 3).

Импорт проектов АСОНИКА-ТМ. Перед импортом проектов АСОНИКА-ТМ не нужно указывать параметры склеивания деталей (т. е. алгоритм и погрешность склеивания). Программа настроит параметры склейки автоматически.

После выбора соответствующего файла для импорта на экране отобразится диалоговое окно с параметрами импорта (рис. 4). В окне нужно выбрать электрорадиоизделия (ЭРИ), которые будут включены в модель после импорта. Поскольку печатные узлы в проектах АСОНИКА-ТМ могут содержать сотни ЭРИ самой различной сложности, пользователь, как правило, должен выбрать только те ЭРИ, которые его интересуют с точки зрения проведения КЭ-моделирования.

После импорта модели АСОНИКА-ТМ программа автоматически создаст группы (и супергруппы) деталей, отражающие структуру модели, а также перенесёт крепления из проекта АСОНИКА-ТМ.

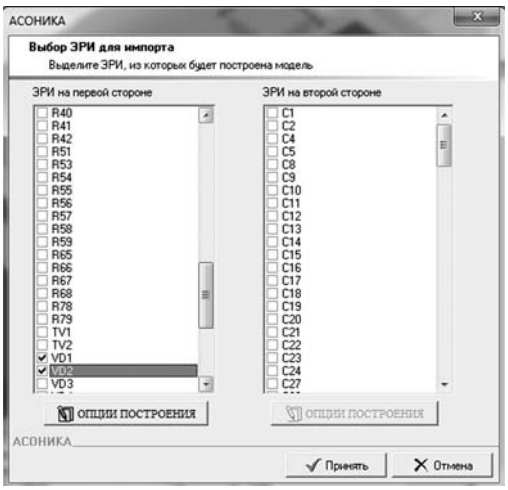


Рис. 4. Диалоговое окно с параметрами импорта

Задание материалов. Кнопка на панели инструментов служит для задания параметров материала для всей конструкции. Параметры материала сгруппированы в три вкладки, содержащие механические, тепловые и усталостные параметры. Вкладки с параметрами материалов «Механические», «Усталостные» и «Тепловые» представлены на рис. 5. Предусмотрена возможность выбора материала из базы данных.

Имеется возможность задания параметров материала как для всей конструкции, так и для её отдельных деталей и групп деталей.

Задание механических воздействий. Интерфейс задания механических воздействий активируется кнопкой на панели инструментов. С помощью графиков можно задавать воздействия гармонической вибрации, случайной вибрации, однократного удара, многократного удара, линейного ускорения. Один из примеров задания воздействий привёден на рис. 6. Все виды механических воздействий можно сохранить в виде текстовых файлов.

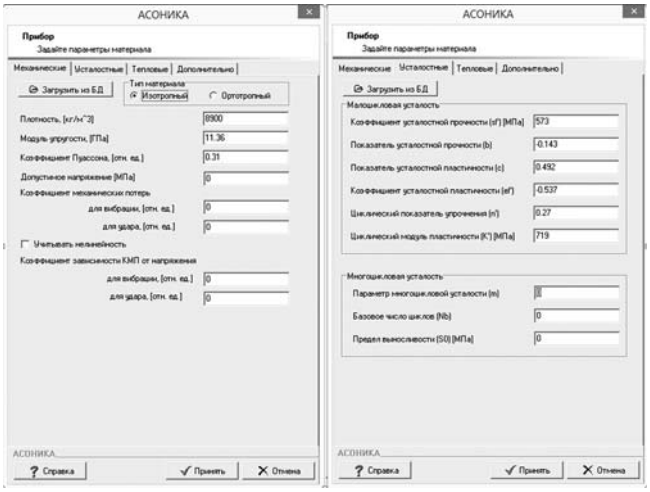


Рис. 5. Интерфейс задания параметров материала

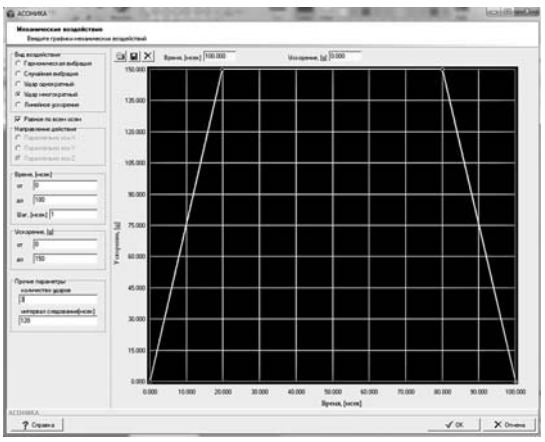


Рис. 6. Интерфейс задания механических воздействий (многократного ударного воздействия)

Задание креплений. В программе реализована возможность задавать крепления следующих типов: по линии или поверхности, в узле, круглое, прямоугольное.

Для всех типов креплений имеются общие параметры, заключённые в раздел «Ограничение степеней свободы» (рис. 7). По умолчанию крепление ограничивает все три степени свободы (x, y и z), по и против направления соответствующей оси. Убирая флажки с названиями осей координат, можно реализовать частичное закрепление, например по двум осям или по одной оси.

Закрепление по направлению позволяет реализовать более сложный вариант закрепления, при котором перемещения фиксируются лишь в одном направлении (по или против направления оси), в то время как в противоположном направлении сохраняется возможность свободного перемещения.

Задание тепловых граничных условий. Для проведения теплового расчёта (стационарного или нестационарного) в АСОНИКА-М-3D есть возможность задавать поверхностные и объёмные тепловые условия.

Поверхностные тепловые условия можно задать для отдельной поверхности, выделенной в рабочей области, и для группы поверхностей, выделенной в дереве объектов.

Объёмные тепловые условия также можно задать как для отдельного объёма (т. е. отдельной детали), выделенного в рабочей области, так и для группы объёмов, выделенной в дереве объектов.

Для поверхностей задаются тепловые условия следующих типов: конвекция с внешней средой, источник температуры, излучение во внешнюю среду, конвекция + излучение во внешнюю среду.

Для объёмов задаются тепловые условия следующих типов: источник мощности, источник температуры.

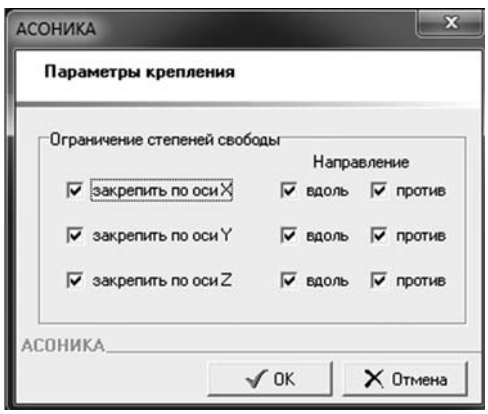


Рис. 7. Пример задания ограничения степеней свободы

Для нестационарного теплового расчёта основные параметры условий (мощность тепловыделения, поддерживаемая температура, температура среды, коэффициент теплоотдачи) могут зависеть от времени. В этом случае нужно ввести соответствующий график зависимости, используя интерфейс ввода, вызываемый кнопкой, расположенной справа от соответствующего параметра.

Задание параметров КЭ-разбиения. Кнопка на панели инструментов служит для задания параметров КЭ-разбиения для всей конструкции.

В разделе «Общие параметры» указываются алгоритм разбиения и точность разбиения. Алгоритм разбиения указывает тип алгоритма, используемого при генерации сетки КЭ: smartsize или desize. Точность разбиения — дополнительный параметр для алгоритма smartsize, определяющий общую густоту КЭ-сетки. Также задаётся параметр средний размер грани КЭ, который служит для непосредственного задания размера сетки в миллиметрах.

В программе имеется возможность задания размера сетки для отдельных деталей и для групп деталей.

Генерация КЭ-сетки. Перед проведением расчёта требуется получить КЭ-модель конструкции. Процесс генерации КЭ-сетки запускается кнопкой на панели инструментов.

Если во время генерации возникнет ошибка, программа сообщит пользователю номер детали, которую не удалось разбить на конечные элементы. Пользователь, чтобы успешно завершить разбиение, имеет возможность изменить параметры сетки для этой детали, как правило, уменьшив её размер, и запустить процесс генерации сетки повторно. Такая последовательность действий пользователя может повторяться (в том числе и для других деталей, которые не удаётся сразу разбить на КЭ) до тех пор, пока программа не выведет сообщение об успешно проведённом разбиении, после которого сетка КЭ отобразится на экране.

Механические расчёты. ***Модальный анализ*** — проводится для определения частот и форм (мод) собственных колебаний конструкций, а также может быть первым шагом для других видов динамического анализа, таких как анализ переходных процессов, гармонический и спектральный анализ.

Расчёт на гармоническую вибрацию. Гармоническая вибрация — это периодическое (синусоидальное) воздействие с некоторой фиксированной частотой. Обычно отклик конструкции на периодическое воздействие также является периодическим. По мере

сближения частоты входного воздействия с одной из собственных частот конструкции возникающие ускорения и перемещения могут принимать опасно большие значения. Это явление принято называть резонансом.

Как правило, частоты, на которых наступает резонанс, не известны заранее. Поэтому расчёт на гармоническую вибрацию проводится поочерёдно для различных частот некоторого диапазона с заданным шагом, например для диапазона от 20 до 500 Гц с шагом 30 Гц. Чем больше рассчитываемый частотный диапазон и меньше шаг, тем выше вероятность не пропустить резонансную частоту.

Чаще всего (хотя и не всегда) резонансная частота совпадает с одной из собственных частот. Программа автоматически включит собственные частоты конструкции в список расчётных частот, если данные собственные частоты попадают в рассчитываемый диапазон. Перед циклом расчётов на гармоническую вибрацию проводится модальный анализ конструкции в целях определения её собственных частот.

Расчёт в частотной области. Результатами расчёта будут амплитудные значения ускорений, перемещений и напряжений на каждой из частот рассчитываемого диапазона.

Воздействие задаётся по точкам в интерфейсе ввода механических воздействий. График представляет собой зависимость амплитуды ускорения входного воздействия от его частоты.

Расчёт во временно́й области. Задание воздействия при расчёте во временно́й области включает следующие этапы:

вводится график зависимости амплитуды ускорения от его частоты;

в разделе «Переходные процессы интерфейса задания механических воздействий» указывается число периодов, а также число расчётных точек по времени на период воздействия. Эти параметры определяют соответственно длительность воздействия, в пределах которой проводится расчёт, и точность расчёта.

Демпфирование. При расчёте на гармоническую вибрацию в частотной и временно́й областях используются две различные модели демпфирования. Этим двум моделям соответствуют два коэффициента демпфирования в параметрах материалов АСОНИКА-М-3D: коэффициент механических потерь (КМП) для вибраций и КМП для ударов. При расчёте в частотной области требуется указать КМП для вибраций, а при расчёте во временно́й области — для ударов.

Для проведения нелинейного анализа, учитывающего зависимость коэффициента механических потерь от напряжения, требуется задать также коэффициент зависимости КМП от напряжения и установить флажок «Учитывать нелинейность» для отдельных деталей и/или для всей конструкции. При этом КМП для вибраций используется совместно с коэффициентом зависимости КМП от напряжения для вибраций, а КМП для ударов — совместно с коэффициентом зависимости КМП от напряжения для ударов.

Нелинейный расчёт будет выполняться при условии, что по крайней мере для одной детали указан коэффициент зависимости КМП от напряжения и установлен флажок «Учитывать нелинейность».

В базе данных АСОНИКА уже содержатся коэффициенты механических потерь, а также коэффициенты зависимости КМП от напряжения для наиболее часто встречающихся в электронике материалов.

Гармоническая вибрация + усталостный расчёт. В настоящее время усталостный расчёт при гармонической вибрации реализован только в рамках метода расчёта в частотной области.

Алгоритм расчёта — многоцикловая усталость, поэтому достаточно задать лишь параметры многоцикловой усталости для тех деталей, для которых планируется расчёт времени до разрушения.

Способ итерации по частоте. Перед проведением расчёта на гармоническую вибрацию как в частотной, так и во временно́й области необходимо указать способ итерации по частоте в окне параметров расчёта.

При расчёте в частотной области задаётся один из трёх способов итерации по частоте: фиксированный шаг; фиксированный шаг + собственные частоты; шаг уменьшается вблизи резонанса.

При расчёте во временно́й области задаётся один из трёх способов итерации по частоте: фиксированный шаг; фиксированный шаг + собственные частоты; список частот.

При запуске расчёта воздействие, заданное графически в интерфейсе задания механических воздействий, будет проигнорировано и вместо него будет использована таблица частот и ускорений.

Расчёт на случайную вибрацию. Случайная вибрация — колебание сложной формы, которое не может быть описано точными математическими соотношениями. Обычно для его описания используют теорию случайных процессов.

Расчёт в частотной области (спектральный анализ). Общепринятой мерой случайной

вибрации является спектральная плотность (Power Spectral Density, PSD), которая определяет распределение среднеквадратических значений ускорений или мощности случайного процесса по частоте. Существует специальный математический аппарат, основанный на преобразованиях Фурье, позволяющий представить случайный процесс в виде непрерывного спектра частот и мощностей (спектральных плотностей). Суть спектрального преобразования заключается в переходе от временно́й (time domain) к частотной области (frequency domain), благодаря чему существенно упрощается представление случайного процесса.

Метод расчёта выходных характеристик (ускорений, перемещений и напряжений) на основании спектральной плотности случайного процесса принято называть спектральным анализом или PSD-анализом. Расчёт на случайную вибрацию на базе спектральной плотности позволяет получить на выходе средние квадратичные отклонения перемещений, ускорений, деформаций и напряжений во всех узлах КЭ-сетки. Все эти величины при стационарном случайном процессе распределены по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю.

В АСОНИКА-М-3D воздействие случайной вибрации задаётся в интерфейсе ввода механических воздействий по точкам. График представляет собой зависимость спектральной плотности ускорения от частоты.

Расчёт в частотной области (спектральный анализ) + усталостный расчёт. Алгоритм усталостного расчёта при случайной вибрации — многоцикловая усталость, поэтому достаточно задать лишь параметры многоцикловой усталости (вкладка «Усталостные» диалогового окна задания параметров материала) для тех деталей, для которых планируется расчёт времени до разрушения.

Временна́я реализация случайной вибрации из спектральной плотности. Следует отметить высокую эффективность спектрального анализа на базе спектральной плотности. Однако существуют ограничения на его применение. В частности, проведению спектрального анализа препятствуют присутствующие в модели крепления по направлению, вносящие высокую степень нелинейности в процесс расчёта.

В АСОНИКА-М-3D может использоваться альтернативный метод расчёта на случайную вибрацию, заключающийся в получении одной из реализаций случайного процесса во временно́й области на основе графика спектральной плотности.

В разделе «Временна́я реализация» интерфейса задания механических воздействий имеются два параметра, отвечающих за процесс генерации воздействий во временно́й области: длительность и частота дискретизации. Первый параметр определяет промежуток времени, на котором будет сгенерировано воздействие, а второй отвечает за точность генерации.

Чтобы расчёт проходил быстрее, нужно минимизировать число временны́х точек, так как для каждой точки рассчитываются все выходные параметры: ускорения, перемещения и напряжения. Рекомендуемое значение параметра частота дискретизации лежит в диапазоне 200...400 %. Полученные в расчёте параметры воздействия нужно сохранить на жёстком диске.

Расчёт на одиночный и многократный удары. Ударное воздействие — это резкое кратковременное воздействие, при котором могут возникать очень высокие ускорения (100...200 *g*) и напряжения, усиливаемые резонансом в различных узлах конструкций.

Ударные воздействия могут привести к разрушению объекта. Часто повреждения, вызываемые ударом, носят характер хрупких разрушений. Однако многократные удары могут приводить и к усталостным разрушениям, особенно в тех случаях, когда периодическое ударное воздействие оказывается способным вызвать резонансные колебания объекта.

В АСОНИКА-М-3D ударный импульс задаётся графически в виде зависимости ускорения от времени. Форма ударного импульса может быть произвольной, однако наиболее типичными являются треугольная, прямоугольная и трапецеидальная.

В случае если ударные импульсы одинаковой формы следуют друг за другом с некоторой периодичностью, такое воздействие называется многократным ударом. Расчёт на многократный удар в отличие от расчёта на одиночный удар имеет свои особенности. В частности, имеется возможность дополнительно провести усталостный расчёт.

Для многократного удара используются два дополнительных параметра: количество ударов и интервал следования, расположенные в разделе «Прочие параметры» интерфейса задания механических воздействий (см. рис. 6).

Многократный удар + усталостный расчёт. Алгоритм усталостного расчёта при многократном ударе — малоцикловая усталость, поэтому необходимо задать все параметры малоцикловой усталости для тех деталей, для которых планируется расчёт времени до разрушения.

Расчёт на линейное ускорение проводится аналогично расчёту на однократный удар.

Различие состоит лишь в том, что вместо типичного ударного импульса задаётся график линейного ускорения.

Статический анализ обеспечивает расчёт напряжённого состояния конструкций под действием статических (т. е. постоянных во времени) нагрузок. Инерция и демпфирование, вызываемые динамическими нагрузками, здесь не учитываются.

Статический анализ может проводиться при статической инерционной нагрузке (например, гравитации), а также нагрузке, заданной в виде распределения температур.

Сила в реальных конструкциях всегда имеет некоторую площадь воздействия. Поэтому основной вид нагрузки для статического анализа — давление, т. е. сила, распределённая по поверхности её воздействия. В АСОНИКА-М-3D используются два способа задания давления: для отдельно взятой поверхности и для группы поверхностей.

Гравитация (сила тяжести) является статической инерционной нагрузкой, прикладываемой ко всей конструкции целиком.

Статический анализ и тепловое расширение. Статический анализ и расчёт на тепловое расширение представляют собой единый расчёт в рамках АСОНИКА-М-3D.

Фактически расчёт на тепловое расширение является разновидностью статического механического анализа, где в качестве нагрузки задаются распределения температур (начальное и конечное). Таким образом, температуры являются здесь исходными данными, а не результатом рачёта, как в тепловых видах анализа. В АСОНИКА-М-3D расчёт на тепловое расширение рассматривается отдельно и условно относится к разряду тепловых расчётов. Однако пользователь имеет возможность совместить нагрузки, характерные для статического анализа (гравитация, давление), с распределением температур и провести комбинированный расчёт, в котором напряжения, вызываются как тепловым расширением конструкции, так и статическими нагрузками.

Тепловые расчёты. ***Расчёт на тепловое расширение.*** Тепловое расширение — явление изменения линейных размеров и формы тела под действием температуры. В качестве характеристики степени теплового расширения твёрдых тел с изменением температуры используется коэффициент линейного теплового расширения. Часто конструкции, прежде всего сборки, неоднородны по составу. Узлы с разными значениями коэффициента теплового расширения под действием температуры расширяются (или сжимаются) в различной степени. На стыке деталей, для которых различие значений коэффициента теплового расширения велико, также возникают высокие напряжения. Следует также обратить внимание на способы закрепления конструкции.

При расчёте на тепловое расширение для всех деталей требуется ввести начальные температуры, т. е. температуры, когда тепловое расширение равно нулю и конструкция находится в ненагруженном состоянии. Также нужно указать конечные температуры, которые вместе с начальными температурами определяют степень теплового расширения-сжатия. Если разность конечной и начальной температур окажется положительной, то конструкция будет расширяться, в противном случае — сжиматься.

Начальные/конечные температуры можно последовательно вводить для каждой детали и сразу для всех деталей.

Стационарный тепловой расчёт позволяет рассчитать установившийся тепловой режим. Для стационарного расчёта допустимы только постоянные (стационарные) тепловые условия, т. е. не зависящие от времени.

Стационарный тепловой расчёт + тепловое расширение. Стационарный тепловой расчёт может совмещаться с расчётом на тепловое расширение. В этом случае распределение температур, полученное в результате теплового расчёта, используется в качестве конечных температур для расчёта на тепловое расширение. Таким образом, от пользователя требуется задать лишь начальные температуры, используя кнопку «Распределение температур» на панели инструментов. В появившемся диалоговом окне можно последовательно ввести начальные температуры для каждой детали или сразу для всех деталей.

Нестационарный тепловой расчёт в отличие от стационарного моделирует протекание тепловых процессов во времени, позволяя оценить переходный процесс установления теплового равновесия. Реализованный в АСОНИКА-М-3D нестационарный тепловой расчёт имеет комплексный характер. Помимо анализа изменений распределения температуры во времени пользователь имеет возможность рассчитать переменное (во времени) тепловое расширение, термические напряжения и термическую усталость.

Для нестационарного расчёта тепловые условия могут быть как постоянными (стационарными), так и переменными (параметры которых зависят от времени). Тепловые условия будут переменными, если хотя бы для одного из параметров задан график временно́й зависимости. Этот график вводится по точкам.

Если для одного и того же параметра задано как числовое значение, так и график временно́й зависимости, то во время нестационарного расчёта постоянное числовое значение будет проигнорировано и будет использован только график. Таким образом, график имеет более высокий приоритет, чем числовая константа.

Нестационарный тепловой расчёт + тепловое расширение. Нестационарный тепловой расчёт может совмещаться с расчётом на тепловое расширение. В этом случае распределение температур, полученное на каждом временно́м шаге нестационарного расчёта, используется в качестве конечных температур для расчёта на тепловое расширение.

Начальные температуры для расчёта на тепловое расширение совпадают с начальным распределением температур нестационарного расчёта. Таким образом, предполагается, что в момент времени 0 с тепловое расширение (или сжатие) отсутствует и модель находится в ненапряжённом состоянии.

Поскольку распределение температур изменяется со временем, то расчёт на тепловое расширение проводится на каждом временно́м шаге нестационарного теплового расчёта. Это означает, что напряжения, вызываемые расширением (термические напряжения), также изменяются во времени.

Нестационарный тепловой расчёт + усталостный расчёт. Термическая усталость — это явление накопления усталостных повреждений под действием циклически повторяющихся термических напряжений. Циклические напряжения обычно появляются в результате циклических изменений температуры (термических циклов) в местах физических неоднородностей (на стыке материалов с различными коэффициентами теплового расширения) либо в жёстко закреплённых участках модели, препятствующих свободному тепловому расширению-сжатию.

В отличие от других усталостных расчётов время до разрушения при нестационарном тепловом расчёте определяется в термических циклах, а не в секундах. Термический цикл — довольно растяжимое понятие. Пользователю предоставлено право самому решать, формируют ли тепловые условия (и вытекающие из них температурные изменения в рассчитываемом временно́м диапазоне) термические циклы или нет.

Алгоритм усталостного нестационарного теплового расчёта — малоцикловая усталость, поэтому необходимо задать все параметры малоцикловой усталости для тех деталей, для которых планируется расчёт времени до разрушения.

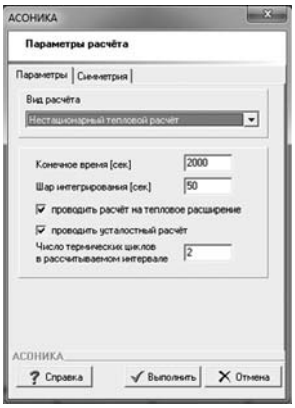


Рис. 8. Интерфейс задания параметров нестационарного теплового расчёта

Расчёт на термическую усталость подразумевает также расчёт на тепловое расширение. Перед началом расчёта нужно убедиться, что установлены флажки «Проводить расчёт на тепловое расширение» и «Проводить усталостный расчёт». Также необходимо задать число термических циклов в рассчитываемом временном интервале (рис. 8).

Постпроцессор АСОНИКА-М-3D. Постпроцессор предназначен для просмотра результатов механических и тепловых расчётов. В нём решаются следующие основные задачи:

вывод полей выходных величин: ускорений, перемещений, напряжений, температур, времени до усталостного разрушения и др.;

получение АЧХ и АВХ требуемых выходных величин;

вывод абсолютных и относительных значений ускорений и перемещений (только для механических расчётов);

получение значений требуемых выходных величин в отдельных узлах КЭ-сетки;

получение значений требуемых выходных величин в деталях и группах деталей;

просмотр деформированного состояния конструкций с учётом фактора усиления;

анимация отклика конструкции на механические воздействия (колебаний конструкции для различных частот при гармонической вибрации, а также для ударов);

экспорт механических воздействий во внешние файлы.

Вывод полей выходных величин. В дереве объектов выбирается название анализа, результаты которого требуется отобразить, а также название выходной величины. Поле значений этой величины появляется на рабочей области (рис. 9). Точки MX и MN при выводе полей выходных величин указывают узлы, в которых выводимая величина принимает максимальное (MX) и минимальное (MN) значения.

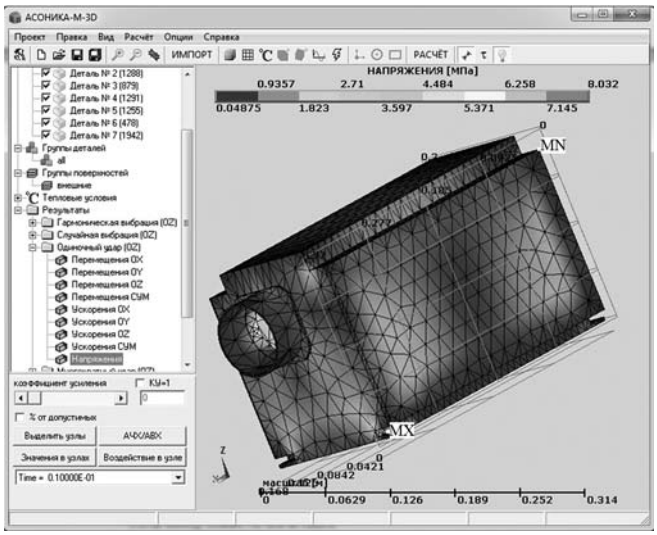


Рис. 9. Отображение поля напряжений

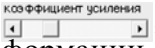
Получение АЧХ и АВХ. С помощью команды «Выделить узлы» на панели постпроцессора выбирается узел (или несколько узлов), для которого требуется получить график частотной либо временно́й зависимости выходной величины. Далее с помощью команды «АЧХ/АВХ» на панели постпроцессора отображаются соответствующие графики в выбранных узлах.

Вывод абсолютных и относительных значений. В АСОНИКА-М-3D существует возможность представления значений перемещений и ускорений относительно креплений в виде относительных и абсолютных величин. Выбор вида представления осуществляется установкой соответствующего флажка на панели постпроцессора.

Получение превышения напряжений над допустимыми значениями. Если среди свойств материалов заданы допустимые напряжения, то можно получить поле превышения рассчитанных напряжений над допустимыми значениями в процентах. Для этого требуется во время просмотра поля напряжений установить флажок «% от допустимых» на панели постпроцессора.

Получение значений выходных величин в узлах КЭ-сетки. На панели постпроцессора в дереве объектов выбирается требуемая выходная величина. С помощью команды «Выделить узлы» выбираются узлы, значения выходных величин в которых интересуют пользователя. Командой «Значения в узлах» на панели постпроцессора выводится диалоговое окно со значениями выходных величин в выбранных узлах.

Получение максимальных и минимальных значений выходных величин в деталях и группах деталей. На рабочей области или в дереве объектов выбирается деталь или группа деталей, командой «Значения в деталях» вызывается диалоговое окно, в котором выводятся максимальные и минимальные значения выходных величин в детали (или группе), выделенной в текущий момент. Используя кнопку в диалоговом окне, можно сохранить результаты в текстовый файл.

Просмотр деформированного состояния конструкций с учётом фактора усиления. Деформированное состояние реальной конструкции обычно не поддаётся визуальному наблюдению. В АСОНИКА-М-3D есть возможность усилить деформации таким образом, чтобы можно было оценить форму и направление прогиба конструкций при механических воздействиях. Перемещая ползунок 

, можно усилить или ослабить деформации. При этом коэффициент усиления деформаций (КУ) отобразится в специальном поле на панели постпроцессора (рис. 10).

Анимация отклика конструкции на механические воздействия. В АСОНИКА-М-3D предусмотрена возможность анимированного представления результатов расчёта для гармонической вибрации. Анимация позволяет визуализировать реальный эксперимент, увидеть формы колебаний конструкции и, таким образом, лучше понять физику процесса. Перед анимацией желательно задать фактор усиления, чтобы гармоническое колебание или отклик от удара был доступен для наблюдения.

Экспорт механических воздействий во внешние файлы. Команда «Воздействие в узле» на панели постпроцессора предназначена для передачи данных между подсистемами, входящими в программный комплекс АСОНИКА. При её активации создаётся текстовый файл, содержащий описание механического воздействия (гармонической вибрации, случайной вибрации или ударного воздействия), кото-

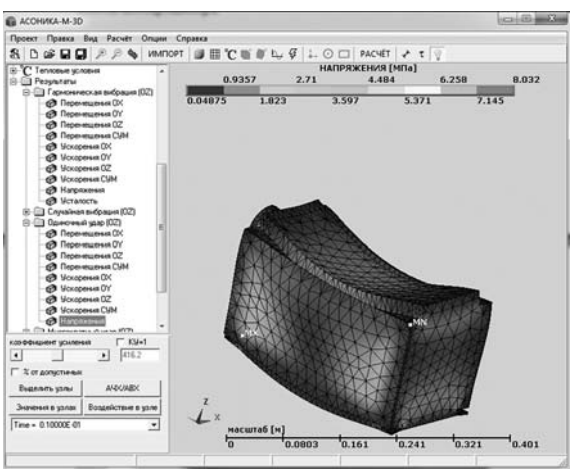


Рис. 10. Отображение усиления деформаций

рое вызвало бы такой же отклик в выделенном узле КЭ-сетки в случае его приложения к этому узлу, т. е. если бы конструкция имела бы в этом узле точку крепления.

В АСОНИКА-ТМ созданный таким образом текстовый файл может быть использован для задания входного воздействия при расчёте печатных узлов.

Библиографические ссылки

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

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

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

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-3D: моделирование произвольных конструкций электроники на механические и тепловые воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 291—300.

УДК 621.59:621.642.8

Е.С. Солдатов, И.А. Архаров, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;
АО «Линде Газ Рус», г. Москва)

gniiivm-s@yandex.ru

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК РЕКОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Представлены результаты исследования термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа, применяемых в криогенных резервуарах долговременного хранения. Показано, что применение предварительного пропанового охлаждения позволяет существенно повысить степень термодинамического совершенства установок, а максимум коэффициента эффективности достигается применением смесевого хладагента в цикле с многопоточным теплообменным аппаратом, при этом наибольшие затраты электроэнергии на производство энтропии приходятся на компрессор и дроссель.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; моделирование реконденсации паров; термодинамическая эффективность; энтропийно-статистический анализ; уравнение материально-энергетического баланса.

The research results of the thermodynamic efficiency of installations for the vapors condensation of liquefied natural gas used in cryogenic long-term storage tanks are introduced. It is shown that the use of preliminary propane cooling allows to increase significantly the thermodynamic perfection degree of installations, and the maximum efficiency ratio is achieved by using a mixed cooling agent in a cycle with a multi-flow heat exchanger. In such a case highest power consumption for entropy production fall on the compressor and throttle.

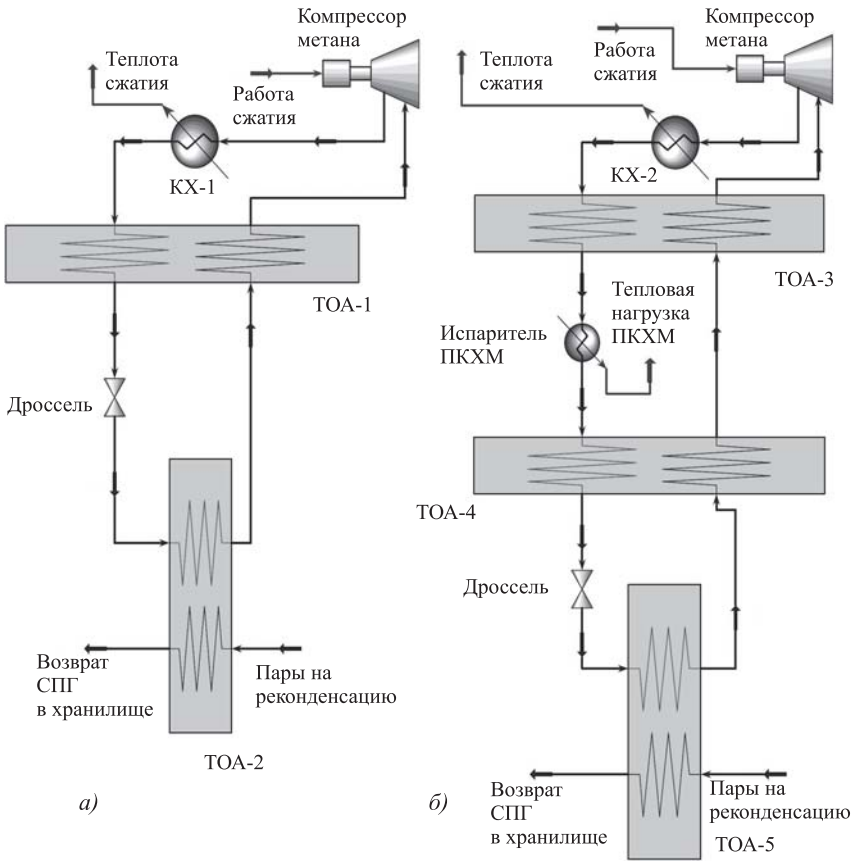
Keywords: liquefied natural gas; vapor condensation simulation; thermodynamic efficiency; entropy-statistical analysis; equation of material and energy balance.

В настоящее время растёт интерес к использованию сжиженного природного газа (СПГ) в качестве эффективного и экологически чистого энергоносителя. Несмотря на существенное возрастание объёмов этого вида топлива на зарубежных рынках энергоресурсов, его распространение в России затруднено по ряду причин, существенная часть которых связана с транспортировкой и хранением СПГ.

Создание серийного производства систем долговременного хранения СПГ является необходимым условием решения проблем газифи-

кации отдалённых регионов России. Между тем в России практически отсутствуют транспортные системы (контейнеры-цистерны) для СПГ с длительным временем бездренажного хранения, с помощью которых можно осуществлять доставку СПГ в удалённые районы. Подобные резервуары, как правило, представляют собой криогенные сосуды объёмом 20, 30, 40 м^3 с максимально допустимым рабочим давлением 1,0, 2,2, 2,4 МПа (в некоторых моделях до 3,6 МПа), смонтированные в раме стандартного ISO-контейнера (танк-контейнера) [1].

Такие контейнеры мультимодальны (с их помощью можно легко перевозить партии сжиженного газа различными видами транспорта без перезаправки), удобны при погрузочно-разгрузочных работах (их можно складировать в несколько ярусов) и могут использоваться как временное стационарное решение для хранения СПГ (при оборудовании системой охлаждения — со временем хранения до 180...200 сут и более) [2]. Их использование поможет успешно решать задачи по газификации удалённых районов нашей страны. Наличие в контейнере системы реконденсации паров обеспечивает противодействие температурному и компонентному расслоению СПГ, которое неизбежно возникает в процессе его долговременного хранения [3], а также практически полностью исключает потери СПГ при транспортировке и хранении.



Расчётные схемы реконденсации паров СПГ в среде Aspen HYSYS на простом дроссельном цикле (*а*) и с предварительным охлаждением (*б*):
ТОА-1, ТОА-4 — основные теплообменные аппараты; ТОА-3 — теплообменный аппарат на температурном уровне предварительного охлаждения; ТОА-2, ТОА-5 — теплообменники-реконденсаторы; КХ-1, КХ-2 — концевые холодильники; ПКХМ — парокомпрессионная холодильная машина

Однако наличие холодильного оборудования ведёт к серьёзному удорожанию системы хранения СПГ, а также обусловливает дополнительные энергетические затраты в процессе её эксплуатации. К тому же применяемая криогенная установка должна быть простой в исполнении и максимально компактной, чтобы быть пригодной для использования в транспортных резервуарах.

Системы охлаждения, предназначенные конкретно для реконденсации паров СПГ в хранилищах небольшого объёма, до сих пор недостаточно изучены и мало распространены. Это обусловливает актуальность поиска технических решений, максимально оптимизированных для резервуаров долговременного хранения. Определяющим фактором при оценивании эффективности рассматриваемых холодильных систем являются удельные затраты электроэнергии, определяемые по результатам анализа термодинамической эффективности установок и циклов с дросселированием в системах реконденсации паров СПГ [4, 5]. Проведение такого анализа с помощью современных методов математического моделирования [6—8] являлось целью исследования.

В качестве рабочего тела современных криогенных установок на базе циклов с дросселированием (рисунок) используют чистый метан (по классификации стандарта ISO-817 — R50) или природный газ, поскольку их дроссель-эффект значительно выше, чем, например, у воздуха или азота [4, 9]. Кроме того, в этом случае отсутствует необходимость приготовления специального хладагента для охлаждающей установки: дозаправку и переза-

правку системы можно осуществлять газом непосредственно из системы долговременного хранения, а циклы используются только в рефрижераторном режиме. Для увеличения эффективности цикла применяют фреоновое или пропановое предварительное охлаждение. Применение пропана (R290) в газотранспортных системах в последнее время становится популярным благодаря относительно невысокой стоимости, отсутствию токсичности, хорошим экологическим характеристикам (потенциал разрушения озонового слоя ODP = 0, потенциал глобального потепления GWP = 3). Пропан хорошо растворяется в минеральном масле и во многих случаях является заменой покидающего рынок фреона R22.

Анализ эффективности циклов с дросселированием, осуществляющих охлаждение СПГ при температуре −160 °С, проведён с помощью энтропийно-статистического метода [9]. Параметры хладагентов и природного газа в характерных точках и соотношения расходов материальных потоков определены путём решения уравнения материально-энергетического баланса установки с помощью среды моделирования Aspen HYSYS v.10 [10]. Рассматриваемый химический состав природного газа представлен в табл. 1.

Минимальная работа $l_{\min}$ для генерации холода в цикле рассчитывалась по формуле [4]

$$l_{\min} = q_{\text{х}}^{\text{полн}} \frac{T_0 - T_{\text{х}}}{T_{\text{х}}},$$

где $q_{\text{х}}^{\text{полн}}$ — полная удельная холодопроизводительность; T_0 — принятая средняя температура окружающей среды, T_0 = 300 К; $T_{\text{х}}$ — температурный уровень охлаждения, $T_{\text{х}}$ = 112,5 К.

Тогда степень термодинамического совершенства установки

$$\eta_t = \frac{l_{\min}}{l_{\Sigma\text{д}}},$$

где $l_{\Sigma\text{д}}$ — действительные удельные затраты работы (электроэнергии) на компенсацию минимально необходимой работы $l_{\min}$ и производство энтропии (удельные величины в расчёте приведены к 1 кг сжимаемого в компрессоре рабочего тела цикла).

Для обеспечения универсальности результатов расчёта, без привязки к контейнеру с конкретным объёмом газового пространства, полученные в результате применения энтропийно-статистического метода значения действительных затрат работы (электроэнергии) были дополнительно приведены к 1 м^3 СПГ в паровом пространстве резервуара долговременного хранения:

$$l_{\Sigma\text{д}\text{СПГ}} = l_{\Sigma\text{Д}} \frac{G_{\text{СПГ}}}{G_{\text{РТ}}} \frac{\rho_{\text{п}}}{3600},$$

где ($G_{\text{СПГ}}/G_{\text{РТ}}$) — отношение расхода реконденсируемого в теплообменном аппарате СПГ к расходу рабочего тела в цикле; $\rho_{\text{п}}$ — плотность паров СПГ.

Результаты расчёта затрат электроэнергии при различных уровнях давления в криогенном резервуаре приведены в табл. 2.

Анализ результатов расчёта затрат работы на получение холода и производство энтропии по элементам установки на базе рефрижераторного цикла простого дросселирова-

Таблица 1

Химический состав природного газа

Компонент	Мольная доля компонента	
	в жидкой фазе	в паровой фазе
Метан	0,9749	0,9185
Этан	0,009	0
Пропан	0,005	0
Бутан	0,0005	0
Пентан	0,0005	0
Азот	0,0101	0,0815

Таблица 2

Затраты электроэнергии на реконденсацию 1 м^3 парового пространства, кВт·ч/м^3, при различных уровнях давления в резервуаре

Вариант реализации цикла охлаждения	Давление в резервуаре, МПа			
	0,3	0,6	1,0	1,6
Обратный цикл Стирлинга	8,95	15,92	24,29	35,31
Рефрижераторный цикл простого дросселирования	5,62	9,99	15,24	22,15
Рефрижераторный цикл с предварительным охлаждением	3,57	6,34	9,67	14,06
Цикл с многопоточным ТОА на смесевом хладагенте	3,05	5,41	8,26	12,01

ния показал, что 40 % затрат приходится на компрессор, 27,2 % — на дроссель, 12 % — на теплообменные аппараты (ТОА) и 1,3 % — на окружающую среду. При этом минимально необходимая работа составляет 19,6 % от общих затрат энергии в цикле.

Затраты работы на получение холода и производство энтропии по элементам установки на базе цикла с предварительным пропановым охлаждением распределились следующим образом: компрессоры — 38,3 %, дроссели — 17,0 %, теплообменники — 9,5 %, окружающая среда — 0,8 %. Минимально необходимая работа составила 34,4 % от общих затрат энергии в цикле.

Оценки степени термодинамического совершенства установок для реконденсации паров СПГ с различными вариантами технической реализации цикла охлаждения оказались равными: обратный цикл Стирлинга — 0,132, рефрижераторный цикл простого дросселирования — 0,196, рефрижераторный цикл с предварительным охлаждением — 0,344, цикл с многопоточным ТОА на смесевом хладагенте [11] — 0,362.

Результаты проведённого исследования могут быть использованы при применении серийных резервуаров-контейнеров для СПГ, оснащённых системой реконденсации.

В стационарных системах электроснабжение двигателя холодильной машины может быть организовано стандартным способом — от заводской электросети. Для транспортных установок должна быть организована система автономного электропитания, эффективность которой является предметом отдельного исследования.

Заключение. Анализ термодинамической эффективности установок, рекомендованных к применению в системах реконденсации паров, показал, что применение предварительного пропанового охлаждения позволяет повысить степень термодинамического совершенства установок с 0,196 до 0,344, при этом максимальный коэффициент эффективности, равный 0,362, достигается с применением смесевого хладагента в цикле с многопоточным ТОА.

Энтропийно-статистический анализ рефрижераторных дроссельных циклов применительно к системам реконденсации паров СПГ показал, что наибольшие затраты электроэнергии на производство энтропии приходятся на компрессор (37...40 %) и дроссель (17...27 %). При этом ориентировочно удельные затраты электроэнергии на реконденсацию 1 $м^3$ парового пространства составляют 3...9 $кВт·ч/м^3$ при низком давлении хранения (3 МПа) и достигают значений 12...35 $кВт·ч/м^3$ при более высоком рабочем давлении (1,6 МПа).

Библиографические ссылки

1. **Lisowski E., Czyzycki W.** Transport and storage of lng in container tanks // J. of Kones Powertrain and Transport. 2011. Vol. 18. No. 3. P. 193—201.

2. **Mokhatab S., Mak J.Y., Valappil J.V., Wood D.A.** Handbook of Liquefied Natural Gas. London: Elsevier, 2014. 593 p.

3. **Бармин И.В., Кунис И.Д.** Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.

4. **Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С.** Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций // Междунар. науч. журн. Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 4—6 (252—254). С. 57—69.

5. **Солдатов Е.С., Архаров И.А.** Анализ схемных решений в системах реконденсации паров сжиженного природного газа для транспортных и стационарных резервуаров долговременного хранения // Известия Тульского гос. ун-та: Сер. Технические науки. 2019. № 2. С. 263—276.

6. **Архаров А.М., Шишов В.В.** Анализ низкотемпературных холодильных циклов с помощью энтропийно-статистического метода // Холодильная техника. 2014. № 8. С. 50—53.

7. **Шибанов Г.П.** Современные технологии проведения обликовых исследований // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 26—33.

8. **Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ушаков И.Б.** Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии. 2004. № 7 (приложение). 32 с.

9. **Архаров А.М.** Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 507 с.

10. **Aspen HYSYS.** AspenONE® V10. URL: https://www.aspentech.com (дата обращения 18.11.2018).

11. **Chang H.M., Lim H.S., Choe K.H.** Effect of multi-stream heat exchanger on performance of natural gas liquefaction with mixed refrigerant // Cryogenics. 2012. No. 52. P. 642—647.

Ссылка для цитирования

Солдатов Е.С., Архаров И.А. Анализ термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 300—303.

УДК 628.94

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц.,
Ю.П. Петренко, канд. техн. наук, доц.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)
mikaeva@npo.lit.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ СВЧ-ЛАМПА

Освещены проблемы экспериментальных исследований ультрафиолетовых сверхвысокочастотных ламп. Описано устройство лампы, дано распределение ультрафиолетового излучения в спектре электромагнитного излучения. Приведена кривая бактерицидного действия ультрафиолетового излучения. Представлены результаты сравнительных испытаний ультрафиолетовых сверхвысокочастотных ламп с различным наполнением.

Ключевые слова: лампа; диапазон излучения; электропитание; серная лампа; ультрафиолетовая лампа; сверхвысокочастотная лампа; состав наполнения.

The experimental studies problems of ultraviolet microwave lamps are covered. The lamp device is described; the distribution of ultraviolet radiation in the spectrum of electromagnetic radiation is given. The bactericidal action curve of ultraviolet radiation is adduced. The results of comparative tests of ultraviolet ultra-high-frequency lamps with different filling are presented.

Keywords: lamp; radiation range; power supply; sulfur lamp; UV lamp; microwave lamp; composition of the filling.

Постоянно растущие требования к качеству продукции и срокам её хранения, рост резистентности микроорганизмов к используемым дезинфектам и моющим средствам заставляют производителей пищевых продуктов искать дополнительные методы дезинфекции, поэтому производители ультрафиолетовых (УФ) источников излучения разрабатывают и предлагают новые или улучшенные УФ-лампы.

Экспериментальные исследования, проведённые со сверхвысокочастотными (СВЧ) лампами, относятся к источникам излучения, электропитание излучения которых осуществляется с частотой в несколько гигагерц, т. е. в СВЧ-диапазоне. Современные источники оптического излучения продолжают совершенствоваться. Примером их модернизации могут служить СВЧ-лампы (например, серная), эффективно используемые в видимом диапазоне. Одной из таких ламп является серная СВЧ-лампа с питанием частотой 1...2,3 ГГц, являющаяся весьма эффективным источником видимого излучения: лампа безэлектродная (т. е. имеет значительный срок службы, соответственно, высокую стабильность излучения и т. п.). Её спектр излучения близок к солнечному при высоких значениях световой отдачи [1]. В работе [1] указано, что СВЧ-разряд весьма эффективно используется и для генерации УФ-излучения в безэлектродных лампах. Но изменение частот излучения (в том числе и в меньшую сторону), улучшение элементов генерации и передачи энергии не исчерпывает весь спектр возможностей этого типа источников излучения. Приоритетом, как и для любого источника излучения, является спектральный состав излучения — заполнение определённых спектральных интервалов, различного рода их вариации и т. п., а также интенсивность излучения в этих интервалах.

Известны УФ СВЧ-лампы, выпускаемые фирмой PRIMARC. Их ассортимент достаточно широк, а в качестве излучающих добавок (кроме инертного газа) используются ртуть, ртуть и индий, ртуть и железо, ртуть и галлий [2].

Прототипом образцов для представленного в данной статье исследования является лампа PRIMARC мощностью 600 Вт типа M6013 (M6014) с внешним диаметром 15 мм и ртутным наполнением [3].

Колбы всех ламп выполнены из кварцевого стекла, а в наполнение ламп входит ртуть. Устройство УФ-лампы представлено на рис. 1. Однако излучение ртути, индия и галлия не заполняет весь УФ-диапазон; нет возможности «управлять» спектром излучения лампы путём изменения условий разряда и т. п.

В настоящее время, к сожалению, не существует какой-либо теории, позволяющей связать такие характеристики ламп, как частота СВЧ-диапазона, излучающие добавки, физико-химические свойства этих добавок и т. д. Именно поэтому весьма проблематично теоретически обосновать какие-либо технические решения в области производства этих ламп, и за основу принимаются экспериментальные данные, полученные иногда с помощью интуиции и большого опыта.

Проведённые нами работы свидетельствуют о том, что дополнение излучения ртути, индия и галлия излучением цинка и кадмия расширит и «усилит» спектральный состав предлагаемого излучателя, т. е. поднимет его на новый качественный уровень.

В настоящей статье представлено экспериментальное исследование УФ СВЧ-источника на базе серной лампы с тем же блоком питания и той же конструкции, однако имеющего иное наполнение. Исследование продемонстрировало повышение интенсивности излучения УФ СВЧ-лампы и расширение спектрального состава излучения в УФ-диапазоне. Это связано с тем, что кварцевая колба УФ СВЧ-лампы помимо ртути, галлия и индия дополнительно наполнена цинком и кадмием в соотношении, приведённом в табл. 1.

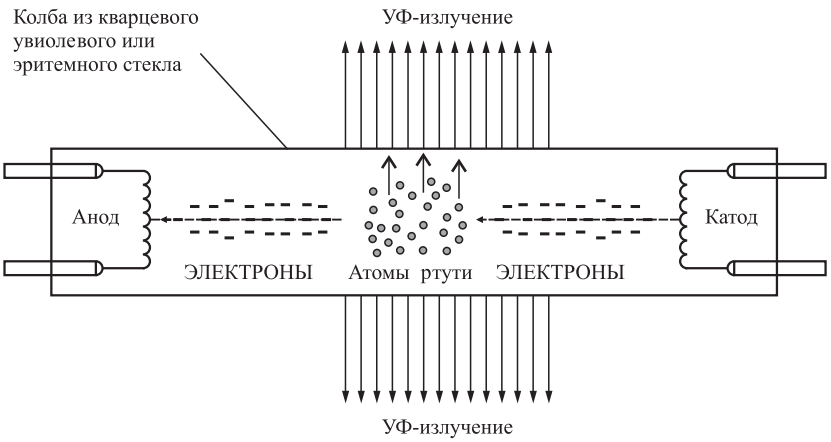


Рис. 1. Устройство ультрафиолетовой лампы

Таблица 1

Компоненты, входящие в состав наполнения УФ СВЧ-лампы

Вещество	Ртуть	Галлий	Индий	Цинк	Кадмий
Содержание, % мас.	30...70	7...12	6...15	10...28	7...15

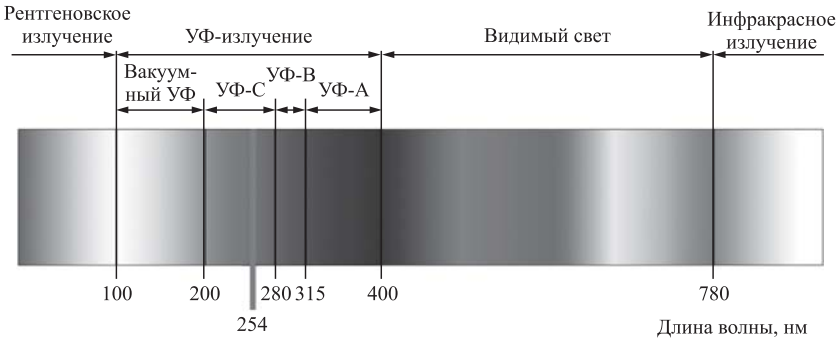


Рис. 2. Ультрафиолетовое излучение в спектре электромагнитного излучения

Длины волн такого наполнения заполняют практически весь ультрафиолетовый диапазон [4]: 185, 214, 229, 254, 308, 326, 403, 410, 417, 451 нм. Распределение ультрафиолетового излучения в спектре электромагнитного излучения представлено на рис. 2. Кривая бактерицидного действия УФ-излучения показана на рис. 3. Если у индия и галлия излучение высвечивается в основном в длинноволновом УФ-диапазоне, то предлагаемое решение позволяет получить излучение и в более коротковолновом (высокоэнергетическом) диапазоне.

Необходимо также отметить, что предлагаемый состав наполнения колбы лампы эффективен в технологическом и экологическом отношении: из предлагаемых компонентов несложно изготовить амальгаму и удобную

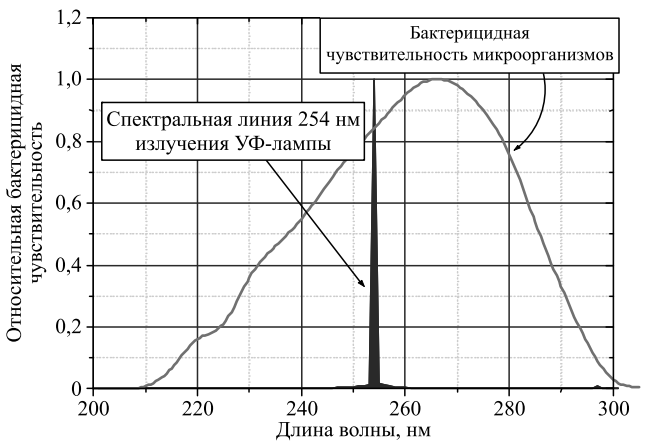


Рис. 3. Кривая бактерицидного действия ультрафиолетового излучения

для дозировки ламп, и менее опасную, чем чистая ртуть.

Число эффективных вариантов наполнения может быть достаточно велико, однако предлагаемый состав обследован и используется в установке для уничтожения запахов на промышленном светотехническом производстве в качестве первого звена, дающего эффективное озоновое ультрафиолетовое излучение [5—9].

В процессе освоения данной тематики для проведения исследования были изготовлены по 10 СВЧ УФ-ламп, колбы всех ламп были выполнены из кварцевого стекла, с каждым из трёх составов наполнителя: состав № 1, % мас.: Hg — 30; Ga — 12; In — 15; Zn — 28; Cd — 15; состав № 2, % мас.: Hg — 50; Ga — 9; In — 12; Zn — 16; Cd — 13; состав № 3, % мас.: Hg — 70; Ga — 7; In — 6; Zn — 10; Cd — 7.

Результаты сравнительных испытаний этих ламп в УФ-диапазонах A, B и C (использовался прибор ТКА-ПКМ(12)) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний УФ СВЧ-ламп с различным наполнением

Наполнение	Hg—25 (прототип)	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3
Интенсивность УФ-излучения (A + B + C), мВт/м^2	189	207	354	212

Из табл. 2 следует что, регулируя состав наполнения УФ СВЧ-ламп, достаточно уверенно можно регулировать их интенсивность излучения в УФ-диапазоне. Проведённые экспериментальные исследования позволяют повысить интенсивность излучения УФ СВЧ-ламп и расширить спектральный состав излучения в УФ-диапазоне.

Только комплексный подход к вопросам санитарно-гегиенического состояния производства обеспечит выпуск качественной и безопасной продукции. Поэтому необходимо сочетать применение дезсредств и УФ-облучения в процессе профилактических и дезинфекционных мероприятий на пищевых производствах.

Библиографические ссылки

1. **Рохлин Г.Н.** Дуговым источникам света 200 лет. М., ВИГМА, 2001. 72 с.

2. **Безэлектродные лампы**. Primarc-Uvintech, uv-lampe.ru>primarc (дата обращения: 28.07.2014).

3. **Колба** из кремниевого кварца очищенного... atd.ru>ATD_press/Flex/Primarc-UV_lamp.pdf (дата обращения: 28.10.2010).

4. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.

5. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки удаления запахов контейнерного типа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 3. С. 28—35.

6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 136 с.

7. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: Московский технологический ун-т (МИРЭА), 2017. 150 с.

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

9. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302—307.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Петренко Ю.П. Ультрафиолетовая СВЧ-лампа // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 304—306.

Уважаемые читатели!

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

УДК 004.72

С.А. Ямашкин, канд. техн. наук, **Е.О. Ладанова**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)
yamashkinsa@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Описано проектирование географически распределённой телекоммуникационной сети вуза, реализованной с применением технологии MPLS. Проведены три эксперимента, в ходе которых MPLS-сеть успешно справилась с нагрузками. Выявлены преимущества MPLS-подхода к построению сети вуза.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети; моделирование; сеть MPLS; технология MPLS; LSP-путь; графовая модель; маршрутизация.

The projecting of a geographically distributed telecommunications network of a university implemented with application of the MPLS technology is described. Three experiments during which the MPLS network successfully coped with the loads are carried out. The advantages of the MPLS-approach to the construction of the university network are indicated.

Keywords: telecommunication networks; modeling; MPLS network; MPLS technology; LSP path; graph model; routing.

Введение. В последнее время в России особенно интенсивно идут процессы реформирования и модернизации в сфере образования и науки. Важнейшими направлениями в системе общего и профессионального образования являются информатизация процессов обучения, создание единого информационного образовательного пространства, техническое и программное оснащение образования. Создаются и успешно развиваются некоммерческие корпоративные компьютерные сети университетов, являющиеся важной составной частью региональных и национальной сетей компьютерных телекоммуникаций для науки и высшей школы. Поддержание работы учреждений, пользующихся данной сетью, — одна из главных целей корпоративной сети. Пользователями корпоративной сети вуза являются сотрудники и студенты.

Цель исследования — разработка надёжной и полнофункциональной структуры корпоративной сети вуза и анализ её характеристик средствами имитационного моделирования. Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

изучение особенностей построения университетских корпоративных сетей, выбор подхода для решения поставленной задачи;

построение модели сети вуза, проведение необходимых экспериментов и анализ результатов.

Особенности построения MPLS-сети вуза. Одной из видимых тенденций последнего времени стало развитие университетских сетей, охватывающих несколько зданий в разных районах города. Причём изменения заметны не только в крупных городах, но и в регионах, где всё большее количество вузов имеет свою вычислительную сеть.

В настоящее время разработаны и используются мощные системы управления корпоративными сетями, что позволяет изучать результаты их работы и определять общие для них положительные и отрицательные стороны. Связано это с необходимостью учитывать особенности работы корпоративной системы, что требует соответствующих методов управления её работой и настроек корпоративной сети. Таким образом, постоянно увеличивается разрыв между возрастающими возможностями систем управления и реальными потребностями при управлении, направленном на конкретные приложения.

Рассмотрим целесообразность применения технологии MPLS при выстраивании инфраструктуры сети вуза. MPLS — это концепция, в соответствии с которой в компьютерных сетях осуществляется переадресация пакетов. Главная её особенность заключается в предложении альтернативы анализу маршрутизаторами типа IPLP заголовков по всем пакетам,

который осуществляется в целях определения направления для их пересылки к следующему компоненту инфраструктуры [1, 2]. Если задействуется данная технология, то анализ заголовка осуществляется однократно при входе в сеть MPLS, а затем инициируется проверка соответствия между параметрами пакета и свойствами потока.

Ключевые преимущества MPLS:

оперативность обработки данных — важнейшее преимущество MPLS, которое заключается в затратах меньшего количества времени на обработку данных, чем при сопоставлении IP-адреса;

универсальность, которая может быть внедрена практически в любые сети IP MPLS и хорошо поддерживается на аппаратном уровне;

масштабируемость, которая характеризуется высокой степенью автономности работы в отношении различных протоколов, посредством которых осуществляется передача данных;

архитектура MPLS — характеризуется устройствами, которые предполагается задействовать в MPLS-сети.

С точки зрения архитектуры, MPLS состоит из двух основных компонентов: ядра и пограничной области. В структуре ядра присутствуют устройства, которые обязательно поддерживают MPLS. Они применяются в качестве компонентов инфраструктуры для маршрутизации трафика в рамках коммутируемого протокола. Основными устройствами, которые задействуются в рамках соответствующей технологии, можно назвать:

маршрутизатор коммутации меток LSR (Label Switching Router) — является «двигателем» домена MPLS, определяется как любое устройство, способное поддерживать протокол MPLS;

граничный маршрутизатор коммутации меток (LER) — стоит на границе домена MPLS (в документации по MPLS не делается различий между LSR и граничным LSR, за исключением их местоположения в домене).

На рис. 1 приведён пример домена MPLS-сети, состоящего из двух граничных (LER1, LER2) и двух внутренних (LSR1, LSR2) маршрутизаторов коммутации меток.

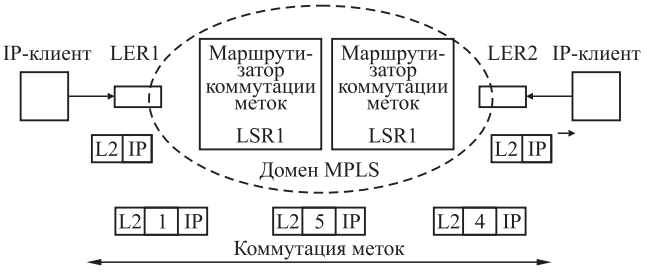


Рис. 1. Пример коммутации пакетов «данные»

Граничный маршрутизатор выполняет функции назначения и удаления меток: LER1 вставляет метку 1 пакета между заголовком IP и заголовком уровня 2 (L2), а LER2 удаляет метку 4 в этом пакете IP. Путь следования пакетов в сети MPLS определяется тем классом эквивалентности при пересылке FEC, который установлен для этого потока во входном граничном маршрутизаторе LER. Такой путь называется коммутируемым по меткам трактом LSP (Label-Switched Path) и идентифицируется набором меток во внутренних маршрутизаторах (LSR), расположенных на пути следования потока от отправителя к получателю.

Построение модели MPLS сети вуза. Для успешного внедрения MPLS-технологии целесообразно прибегнуть к имитационному моделированию, т. е. к методу, позволяющему строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. К имитационному моделированию прибегают, когда это требует больших затрат или невозможно экспериментировать на реальном объекте и необходимо сымитировать поведение системы во времени. Несомненно, что проектирование MPLS-сети вуза является именно той задачей, для решения которой нужно прибегнуть к имитационному моделированию.

Исходные данные для моделирования. Для проведения имитационного моделирования был выбран программный продукт Open SimMPLS — кроссплатформенный симулятор работы MPLS-сетей, разработанный в университете Extremadura (Испания). Программный комплекс позволяет строить MPLS-сети сложной топологии, настраивать параметры её узлов, проводить моделирование работы сети и анализировать результаты моделирования на основе графиков. В отличие от других программных продуктов для имитационного моделирования, например, GPSS, система обладает удобным графическим интерфейсом.

Проведём моделирование корпоративной сети вуза на примере Мордовского государственного университета. Вначале определим перечень ключевых объектов учебного заведения, которые должны быть связаны сетью. Отметим, что корпуса университета не локализованы в одном районе города, а географически распределены в разных его частях. Для удобства проектирования MPLS-сети проведём генерализацию и объединим корпуса в 6 ключевых узлов по признаку географической локализации (табл. 1). Сформированные узлы

Таблица 1

Ключевые узлы модели MPLS-сети вуза

№ п/п	Узел модели	Корпуса
1	Центральный (Central)	Административно-библиотечный корпус (ул. Большевистская, 68), корпус № 1 (ул. Большевистская, 68/1), корпус № 2 (ул. Большевистская, 68а), общежитие № 13 (ул. Пролетарская, 61), общежитие № 14 (ул. Пролетарская, 63), корпус № 6 (ул. Полежаева, 143), корпус № 10 (ул. Демократическая, 69), корпус № 16 (ул. Б. Хмельницкого, 39), корпус № 22 (ул. Демократическая, 100), корпус № 24 (ул. Полежаева, 44, корп. 2), корпус № 25 (ул. Полежаева, 44, корп. 1), корпус № 26 (ул. Большевистская, 33), корпус № 27 (ул. Б. Хмельницкого, 39а), корпус № 28 (ул. Полежаева, 44, корп.3)
2	Ленинский (Lenin)	Корпус № 3 (пр. Ленина, 15), дом аспирантов и стажёров (ул. Б. Хмельницкого, 41), общежитие № 3 (ул. Б. Хмельницкого, 31)
3	Советский (Soviet)	Корпус № 4 (ул. Советская, 24), корпус № 5 (ул. Володарского, 22)
4	Юго-Западный (SW)	Корпус № 9 (ул. Республиканская, 2), корпус № 11 (ул. Ульянова, 24), корпус № 13 (ул. Ульянова, 27), корпус № 14 (ул. Ульянова, 26б), общежитие № 8 (ул. Ульянова, 26а)
5	Нижний (Lower)	Корпус № 19 (ул. Невского, 11), общежитие № 1 (ул. Ворошилова, 4), общежитие № 4 (ул. Невского, 15), общежитие № 9 (ул. Невского, 13а), общежитие № 10 (ул. Московская, 74), общежитие № 11 (ул. Ворошилова, 7), общежитие № 12 (ул. Ворошилова, 2), корпус № 12 (ул. Мокшанская, 16)
6	Ялга (Yalga)	Корпус № 15 (ул. Российская, 5), корпус № 17 (ул. Российская, 37), корпус № 21 (ул. Российская, 7), корпус № 23 (ул. Российская, 23), общежитие № 5 (ул. Российская, 33), общежитие № 6 (ул. Российская, 3), общежитие № 7 (ул. Российская, 27)

станут вершинами графа, описывающего MPLS-сеть вуза при имитационном моделировании.

На рис. 2 показаны ключевые узлы модели MPLS-сети вуза на карте г. Саранска. MPLS-сети характеризуются свойствами быстродействия и масштабируемости, поэтому подойдут для организации сети университета, объекты которого территориально распределены в разных районах города.

Проектирование сети. Спроектируем MPLS-сеть университета таким образом, чтобы конфигурация её графа позволяла обеспечить необходимую отказоустойчивость: при отказе какого-либо элемента сети (линии, узла или пути) должен оставаться доступным обходной маршрут. Это правило должно работать для всех направлений передачи трафика в сети вуза. После восстановления основного пути использование обходного прекращается. При этом граф сети не должен быть избыточным, чтобы сократить стоимость сети и обеспечить максимальную простоту её эксплуатации.

Предлагаемый на рис. 3 граф удовлетворяет установленным требованиям. Он содержит 6 граничных маршрутизаторов

Рис. 2. Ключевые узлы модели MPLS-сети вуза на карте г. Саранска

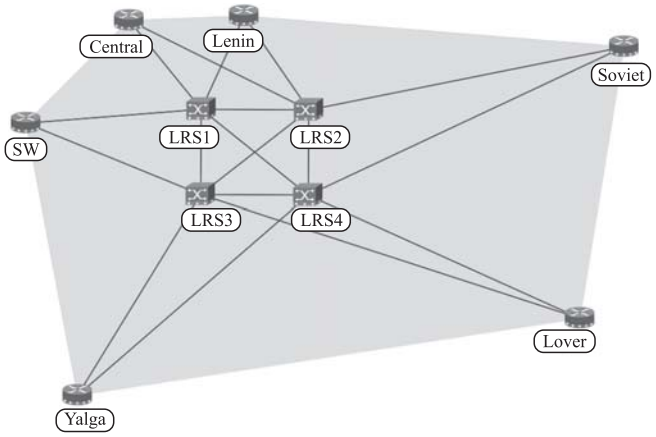


Рис. 3. MPLS-домен сети вуза

Таблица 2

Параметры вершин MPLS-сети вуза

Тип вершины домена	Перечень вершин	Коммутируемая мощность	Размер входного буфера	Размер DMGP-памяти
LRS	LRS1, LRS2, LRS3, LRS4	7680 mbps	768 MB	4 KB
LER	Central, Lenin, Soviet, Lower, Yalga, SW	5120 mbps	512 MB	3 KB

коммутации меток (LER) для каждого выделенного узла модели [3]. Двигателями MPLS-домена сети вуза являются 4 маршрутизатора коммутации меток (LSR). Вершины графа сети связаны так, чтобы обеспечивалось наличие основного и резервного коммутируемых по меткам LSP-путей [4]. При такой архитектуре в случае отказа какого-либо LSR-маршрутизатора коммутации меток или разрыве пути всегда остаётся резервный маршрут для передачи пакетов.

Приступим к конфигурированию параметров вершин графа. В табл. 2 представлены выбранные характеристики LER- и LRS-вершин. Для построения сети решено использовать LRS-устройства высокой коммутируемой мощности и LER-устройства средней мощности [5].

Приведём пример того, как описывается модель MPSL-сети вуза на языке OpenSimMPLS. Сначала указываются метаданные о модели (название, автор, описание, время симуляции). Затем описывается сама топология сети — декларируются вершины графа сети (источники и приёмники трафика, LER-узлы, LRS-узлы, линии связи вершин). В общем случае вершины графа сети описываются кортежем свойств устройства: тип, идентификатор, название, адрес, параметры вершины (пропускная способность, скорость трафика, коммутируемая мощность, размер буфера памяти). Описание линий связи и рёбер графа сети строится следующим образом: тип линии, идентификаторы, адреса и используемые порты конечных вершин, скорость передачи данных) [6].

Отметим, что модель может быть описана в приведённом текстовом виде и составлена с использованием возможностей графического интерфейса. Перейдём к моделированию работы сети, чтобы установить, насколько оправдана предлагаемая архитектура.

Проведём серию экспериментов для оценки эффективности предложенной модели.

Эксперимент 1. Рассмотрим случай, когда из трёх ключевых узлов модели (SW, Central, Lenin) исходит трафик в принимающий узел Yalga со скоростью 3400 Мбит/с. Имитационное моделирование показывает, что в спроектированной MPLS-сети эффективно поддерживается техника инжиниринга трафика: мощные потоки пакетов проходят по различным LSP-путям (рис. 4).

Статистика имитационного моделирования, представленная на рис. 5, позволяет утверждать, что исходящие по равномерному распределению пакеты достигали точки назначения за ожидаемое время. Маршрутизатор LSR3 отклонил 3 пакета из 850 (0,35 %), LSR4 — 6 пакетов из 700 (0,86 %), что вполне приемлемо.

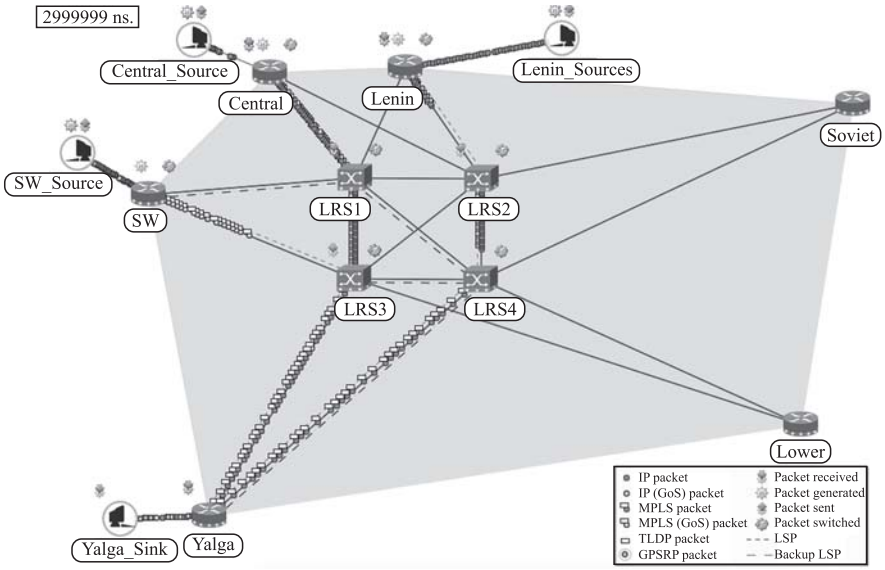


Рис. 4. Движение пакетов по LSP-путям в эксперименте 1

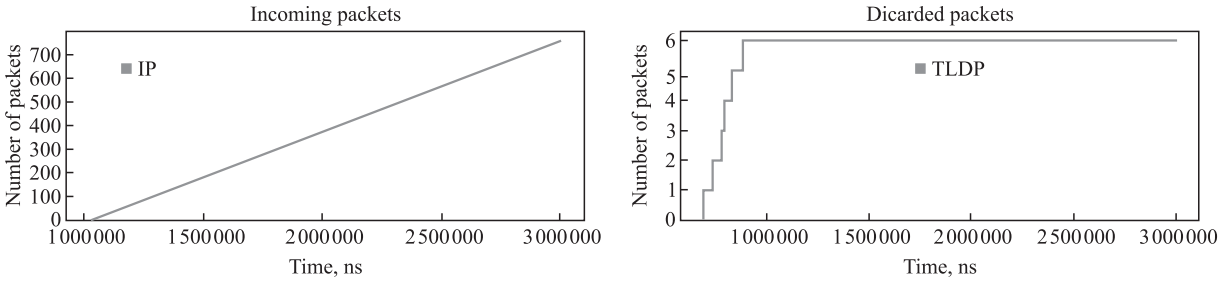


Рис. 5. Статистика получения и отклонения пакетов

Эксперимент 2. Рассмотрим случай, когда из трёх ключевых узлов модели (SW, Central, Lenin) исходит более мощный трафик в принимающий узел Yalga со скоростью 10 240 Мбит/с. На рис. 6 видно, что в процессе моделирования инжиниринг трафика MPLS-сети также способствует распределению потоков трафика по различным LSP-путям.

Самый нагруженный узел MPLS-домена успешно пропускает поступающие в него пакеты, потери которых не превышают 1 %. Статистика входящих и исходящих пакетов для узла LSR4 представлена на рис. 7.

Спроектированная сеть справилась с поставленной задачей по передаче трафика.

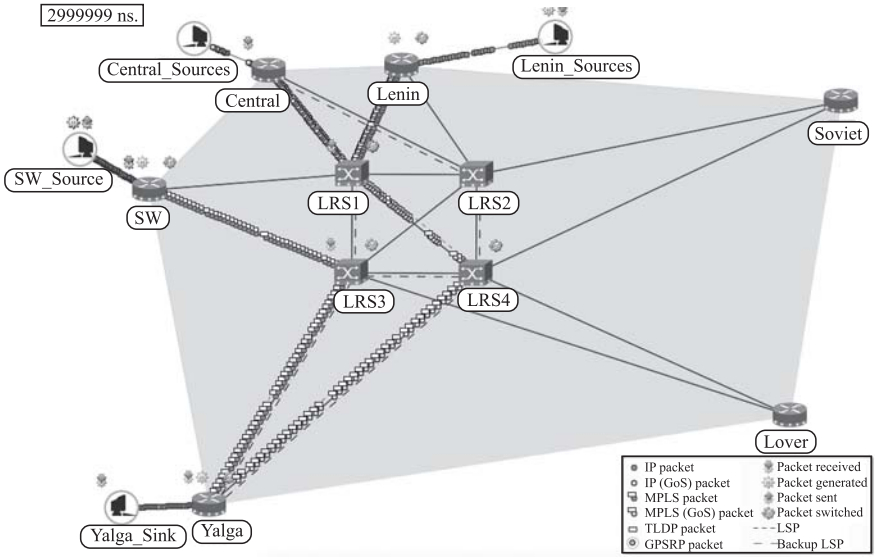


Рис. 6. Движение пакетов по LSP-путям в эксперименте 2

Эксперимент 3. Увеличим нагрузку на сеть. Пустим дополнительный трафик со скоростью 10 240 Мбит/с по следующим трём направлениям (Soviet-Central, Lower-SW, Yalga-Lower) и проверим, как сеть справится с передачей таких потоков трафика.

На рис. 8 видно, что при наличии мощной нагрузки на все узлы сети 4 пути, соединяющие вершины, остались незадействованными. Таким образом, у спроектированной MPLS-сети остаётся резерв, который может быть использован при увеличении трафика.

Число отклонённых пакетов на самом нагруженном узле LSR4 выросло до 18 и составило 0,8 % от общего числа (2300). Статистика отклонения пакетов узлом LSR3 представлена на рис. 9.

Несмотря на то, что нагрузка на сеть серьёзно выросла, пакеты продолжают успешно достигать точки назначения. Статистика получения пакетов принимающим узлом Yalga представлена на рис. 10. Так, в узел они доходят практически бесперебойно, хотя и не с линейной зависимостью, как в первом эксперименте.

Таким образом, спроектированная MPLS-сеть успешно справилась с нагрузками в ходе проведения трёх экспериментов имитационного моделирования. Эксперименты выявили

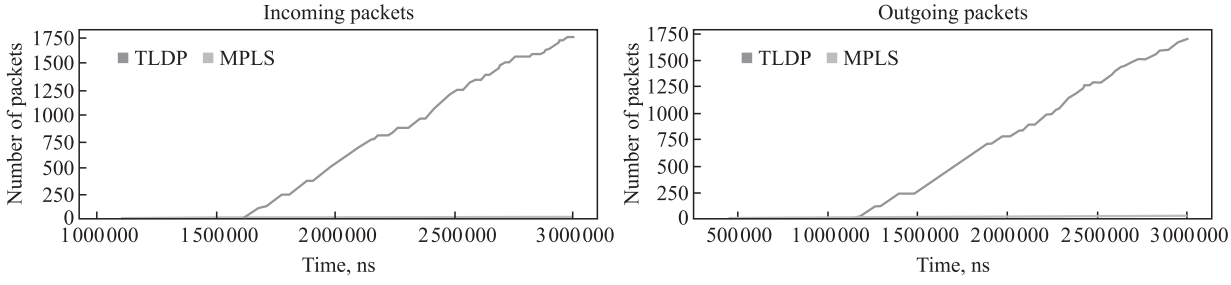


Рис. 7. Статистика входящих и исходящих пакетов для узла LSR4 в эксперименте 2

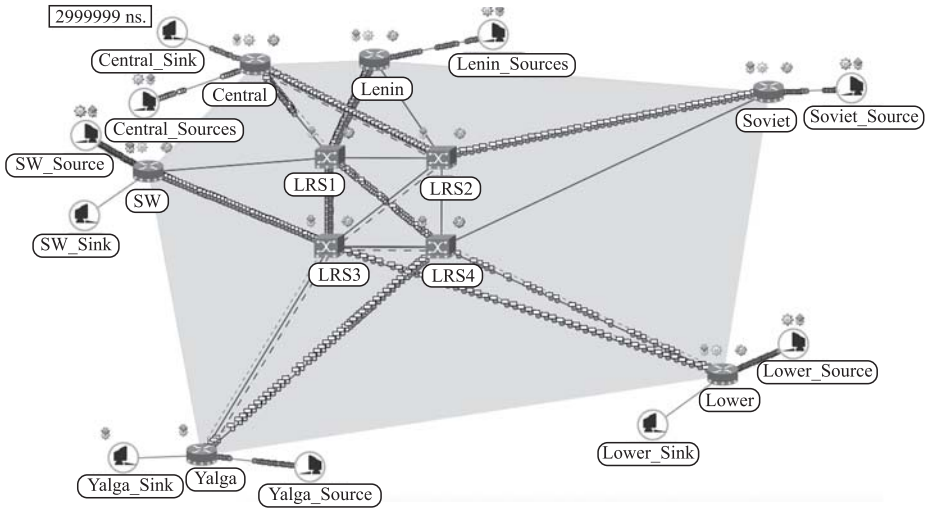


Рис. 8. Движение пакетов по LSP-путям в эксперименте 3

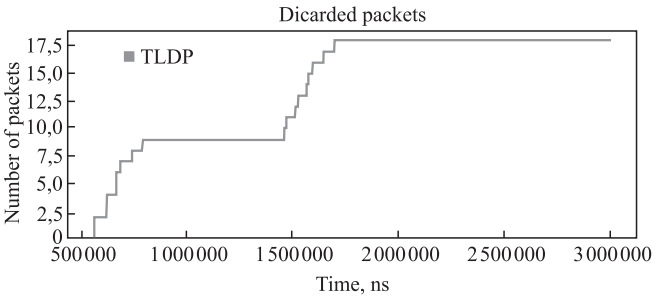


Рис. 9. Статистика отклонения пакетов узлом LSR3 в эксперименте 3

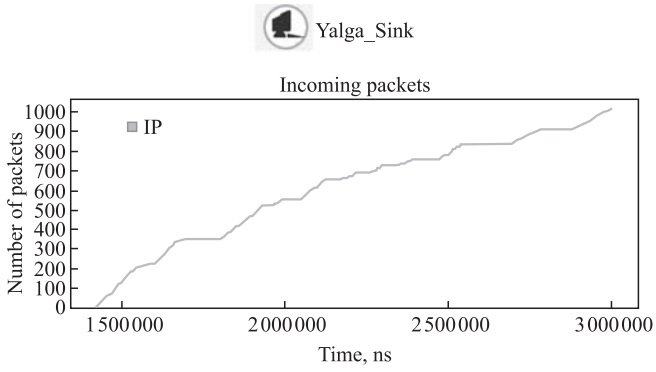


Рис. 10. Статистика получения пакетов принимающим узлом Yalga в эксперименте 1

преимущества MPLS-подхода к построению сети вуза. Поставленная задача проектирования корпоративной сети вуза была успешно выполнена.

Выводы. В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Географически распределённую телекоммуникационную сеть вуза можно эффективно реализовать с применением технологии MPLS, которая обладает рядом обоснованных преимуществ. Для успешного обоснования внедрения сети проведено имитационное моделирование, которое показало, что спроектированная MPLS-сеть успешно справилась с нагрузками в ходе проведения трёх экспериментов. Выявлены преимущества MPLS-подхода к построению сети вуза.

2. В ходе исследования была спроектирована MPLS-сеть университета. Конфигурация описывающего её графа позволяет обеспечить необходимую отказоустойчивость: при отказе какого-либо элемента сети (линии, узла или пути) должен оставаться доступным обходной маршрут. Это правило работает для всех направлений передачи трафика в сети вуза. Предлагаемая архитектура MPLS-домена включает 6 граничных маршрутизаторов коммутации меток (LER) для каждого выделенного узла модели. Двигателями MPLS-домена сети вуза являются 4 маршрутизатора коммутации меток (LSR), а вершины графа сети связаны так, чтобы обеспечивалось наличие основного и резервного коммутируемых по меткам LSP путей. При такой архитектуре в случае отказа какого-либо LSR-маршрутизатора коммутации меток или разрыве пути всегда остаётся резервный маршрут для передачи пакетов.

Важно отметить, что MPLS-сеть была разработана для вуза, моделирование проведено для объектов Мордовского университета, однако результаты исследования могут быть успешно применены для эффективного проектирования сложных корпоративных сетей.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации проекта «Разработка программно-технологической платформы на основе автоматизированных алгоритмов машинного обучения онтологической классификации нормативно-справочной информации (в том числе градиентного бустинга, нейронных сетей) с применением облачных технологий» (Соглашение № 074-11-2018-027 от 11 июля 2018 г.) в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Библиографические ссылки

1. **Davie B.S., Rekhter Y.** MPLS: technology and applications. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000.
2. **Гольдштейн Б.С.** Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
3. **Rosen E.** et al. MPLS label stack encoding // RFC 3032 (Proposed Standard) 2001. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3032.txt (accessed: 11.03.2019).
4. **Xiao X.** et al. Traffic Engineering with MPLS in the Internet // IEEE network. 2000. Vol. 14. P. 28—33.
5. **Лузгачёв М.В., Самуйлов К.Е.** Задача маршрутизации трафика на графе сети MPLS с одноадресными соединениями // Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Математика, информатика, физика. 2009. № 1.
6. **Лемешко А.В., Романюк А.А., Козлова Е.В.** Модель отказоустойчивой маршрутизации в MPLS-сети / Труды Северо-Кавказского филиала Московского техн. ун-та связи и информатики. Ростов н/Д.: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2013. С. 203—206.

Ссылка для цитирования

Ямашкин С.А., Ладанова Е.О. Моделирование географически распределённой телекоммуникационной сети // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 307—313.

УДК 004.89

Е.Э. Пашкова, Е.Г. Кабулова, канд. техн. наук, доц.
(Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова — филиал Национального исследовательского технологического университета МИСиС)

konf.sti@mail.ru

ПРОФИЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНЫМИ КОНФЛИКТАМИ

Поскольку международные конфликты достаточно трудно урегулировать, применяя классический математический инструментарий, предлагается использовать принципиально новый метод решения задач в данной области — мультиагентные технологии. Полученные динамические профили позволили разработать структурную схему действий функциональных составляющих как самоуправляемых агентов в системе управления международными конфликтами. Практическая значимость работы заключается в новых научных результатах в области исследования сложных динамических систем, которыми являются международные конфликты, функционирующих в условиях неопределённостей, выявлении связей и закономерностей, позволяющих формализовать и организовать поддержку принятия решений органов государственной власти по международным конфликтам.

Ключевые слова: моделирование; прогнозирование; управление; система; международный конфликт.

International conflicts are quite difficult to resolve using the classical mathematical tools. A fundamentally new method for solving problems is proposed to be used in this area — multi-agent technologies. The practical significance of the work consists in new scientific results in the field of the study of complex dynamic systems, which are international conflicts operating in conditions of uncertainty, identifying links and patterns. They allow you to formalize and organize support for decision-making by public authorities on international conflicts.

Keywords: modeling; forecasting; control; system; international conflict.

Введение. Применение искусственного интеллекта для подготовки и принятия решений при возникновении международных конфликтов, внешнеполитическое прогнозирование, анализ и составление многовариантного развития событий мирового масштаба требуют применения обоснованных научных методов. Целью работы является построение организационно-функциональной структуры оперативного управления в условиях международных конфликтов и математической модели её элементов. Методологическую основу исследования составляют методы системного анализа и математического моделирования, мультиагентный подход с использованием научных выводов, полученных в политологии и конфликтологии. Элементами новизны представленной работы является построение динамического профиля функциональных составляющих как самоуправляемых агентов с учётом их динамических параметров. Решается важная проблема совершенствования

информационной поддержки процесса принятия решений в области прогнозирования международных конфликтов.

Основная часть. При разрешении динамично развивающихся международных конфликтов (МК) особое внимание стоит уделить алгоритму оперативного управления (ОУ МК). Устройство механизма ОУ МК представляет собой взаимосвязанные составляющие и является иерархичной организационной системой. Следует учесть, что субъекты механизма обладают инерционными свойствами, а значит профиль динамических действий функциональных составляющих как самоуправляемых агентов необходимо построить с некоторыми допущениями, а также выделить динамические модели каждого субъекта функциональных составляющих по отдельности. Важно принять во внимание координационные цели при регулировании и разрешении МК: координацию центром деятельности функциональных составляющих, а также координацию руководителем функциональных составляющих деятельности функциональных агентов.

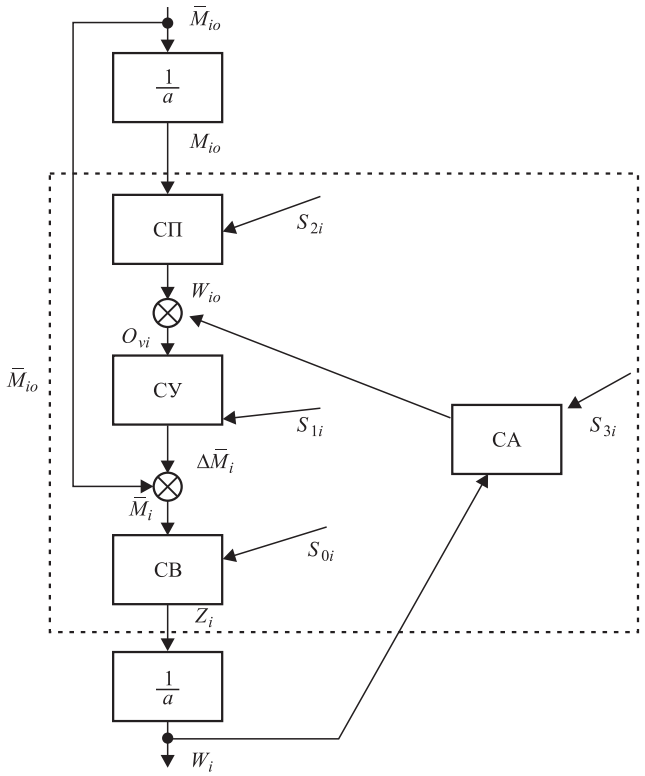


Рис. 1. Профиль динамических действий ФС как самоуправляемых агентов:

СП — субъект планирования; СУ — субъект управления; СВ — субъект выполнения; СА — субъект анализа; $\bar{M}_{io}$ — плановый темп расхода ресурсов; $\bar{M}_i$ — фактический темп расхода ресурсов; $\Delta\bar{M}_i$ — дополнительный темп расхода ресурсов

Основываясь на организационной системе механизма оперативного управления в условиях международных конфликтов [1], построим математическую модель её элементов.

Профиль динамических действий функциональных составляющих (ФС), как самоуправляемых агентов, представлен на рис. 1.

Субъекты механизма обладают инерционными свойствами и на систему воздействуют внешние факторы $S_i(x)$, значит объём планируемых работ не будет соответствовать выполняемым, т. е. $W_i \neq W_{io}(x)$. Может возникнуть отклонение $O_{vi}(x)$, следовательно, в механизме управления выделяется канал обратной связи, а СУ корректирует плановый расход ресурсов $M_{io}(x)$ для сохранения равновесия $W_i = W_{io}(x)$. СП формирует плановый объём $W_{io}(x)$ работ и сроки выполнения, СВ формирует темпы выполняемых работ $\bar{W}_i(x)$ и количество расходуемых ресурсов. Представленная структура является строением ФС как самоуправляемого агента и построена со следующими допущениями:

непрерывный процесс выполнения объёма работ;

характеристики СВ могут видоизменяться из-за характера выполняемых работ;

неизменные параметры СВ вследствие малого временного интервала.

Построив ДП ФС, представим динамические модели каждого субъекта ФС. ДП СВ представляет собой технологический процесс выполнения конкретного объёма работ [2, 3]. Входная переменная — темп расхода ресурсов $\bar{M}(x)$, выходные переменные — темп $\bar{W}_i(x)$ и объём выполняемых работ $W_i(x)$.

Данные переменные можно связать дифференциальным уравнением:

$$F_{oi}\frac{d^2W_i(x)}{dx^2} + \frac{dW_i(x)}{dx} = \\ = y_{oi}\left[F_i\frac{\bar{M}(x-z_i)}{dx} + \bar{M}_i(x-z_i)\right] + S_{oi}(x), \quad (1)$$

где F_{io} — величина, характеризующая инерционность динамического перехода темпа выполнения работ (от одного к другому); F_i — величина, отражающая характеристики деятельности СВ (профессионализм человеческих ресурсов, современные технологии, степень подготовки работ); z_i — временное запоздание, затраченное на анализ ситуации; y_{oi} — влияние темпа расхода ресурсов на выполнение работ; S_{oi} — влияние внешних факторов, снижающих темпы работ.

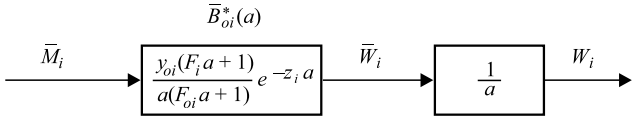


Рис. 2. ДП СВ как объекта управления

Используем преобразование Лапласа к уравнению (1), принимая во внимание нулевые начальные критерии. Определим следующий параметр в форме передаточной функции:

$$B_{oi}(a) = \frac{y_{oi}(F_i a+1)}{a(F_{oi}a+1)} e^{-z_i a}. \qquad (2)$$

Опишем ДП из двух частей, одна из которых представляет модель относительных темпов выполнения работ $\bar{W}_i(x)$ (рис. 2).

Применяя указанные допущения, коэффициент передачи СА равен 1. ДП СУ в форме передаточной функции примет следующий вид:

$$B_{ci}(a) = \frac{y_{\bar{c}i}(F_{ci}a+1)}{a(z_{2i}a+1)} e^{-z_{ci}a} \qquad (3)$$

(неподвижный алгоритм управления);

$$B_{ci}(a) = \frac{y_{\bar{c}i}\left(F_{ci}a+1\right)}{z_{2i}a+1} e^{-z_{ci}a} \qquad (4)$$

(подвижный алгоритм управления),

где y_{ci} — показатель восприимчивости СУ к отклонениям o_{vi} или $\bar{o}_{vi}$; z_{2i} — величина, характеризующая инерционность принятия решений; F_{ci} — величина, определяющая степень профессионализма подготовки работ по управлению [4]; z_{ci} — чистое время на принятие решения.

На СУ может оказывать влияние воздействие $S_{1i}(x)$ — внешние факторы, отрицательно воздействующие на процесс принятия решения (недостаточность информации о МК, недостаточный опыт управления МК).

ДП элемента планирования отражает связь между планируемым объёмом работ $\bar{W}_{i0}$ и планируемым объёмом расхода ресурсов M_{i0}, темпом расхода ресурсов $\bar{M}_{i0}$ и может быть представлена в следующем виде:

$$W_{i0} = y_{hi} M_{i0}; \qquad (5)$$

$$M_{i0} = \omega \bar{M}_{i0} dx; \qquad (6)$$

$$\bar{W}_{i0} = y_{hi} \bar{M}_{i0}, \qquad (7)$$

где y_{hi} — коэффициент планирования.

Динамический процесс отражает следующая передаточная функция:

$$B_{hi}(a) = \frac{W_{i0}}{M_{i0}} = \frac{y_{hi}(F_{hi}a+1)}{z_{1i}a+1} e^{-z_{hi}a}, \qquad (8)$$

где z_{1i} — величина, описывающая инерционность процесса планирования; F_{hi} — степень профессионализма процесса планирования.

ДП СУ показывает связь между планируемым объёмом работ W_{i0} и плановым темпом расхода ресурсов M_{1i} при выполнении данных работ, которую представим в виде передаточной функции:

$$B_{hyi}(a) = y_{ri} a, \qquad (9)$$

где y_{ri} — коэффициент формирования плановых темпов расхода ресурсов, учитывая план, характеристики СВ и объекты управления [5—7], следовательно,

$$y_{ri} = \frac{1}{y_{0i}}.$$

Полученные ДП позволяют построить структурную схему действий ФС как самоуправляемых агентов (рис. 3).

Следует отметить, что внутри ДП действий ФС может функционировать подсистема поддержки заданного темпа $\bar{W}_{i0}$ (рис. 4). При этом объём $\bar{M}_{i0}$, отражающий темп расходования ресурсов, будет пропорционален $\bar{W}_{i0}$:

$$\bar{W}_{io} = y_{hi} \bar{M}_{io}.$$

Передаточная функция $B_{Fi}(a)$ отражает механизм управления темпом выполнения работ.

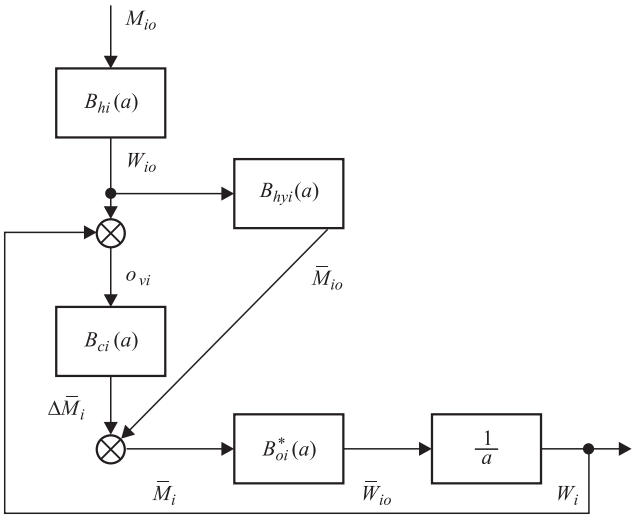


Рис. 3. ДП действий ФС как самоуправляемых агентов

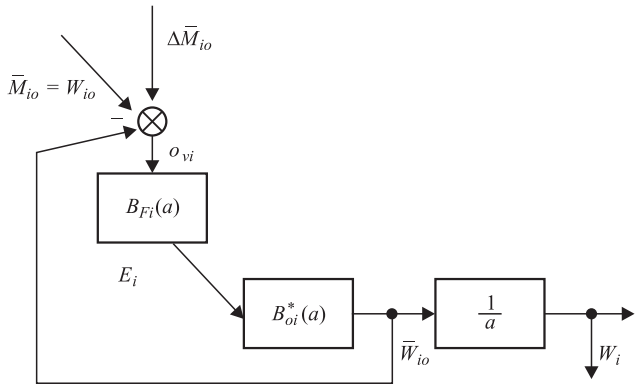


Рис. 4. ДП подсистемы регулирования темпа выполнения работ

Все системы оперативного управления обладают комбинированным принципом управления [8]. Это означает, что управление, основанное на обратной связи, комбинируется с управлением по разъединённому механизму.

Здесь целями управления [9] могут являться:

поддержка установленных темпов выполнения работ $\bar{W}_o(a)$;

поддержка установленных объёмов выполнения работ $W_o(a)$;

поддержка установленного объёма с учётом темпов выполнения работ $W(x)$.

Алгоритмы оперативного управления выполнением работ ФС по разрешению МК представлены на рис. 5 [10], где коэффициент β отражает эффективность выполняемых работ по урегулированию МК.

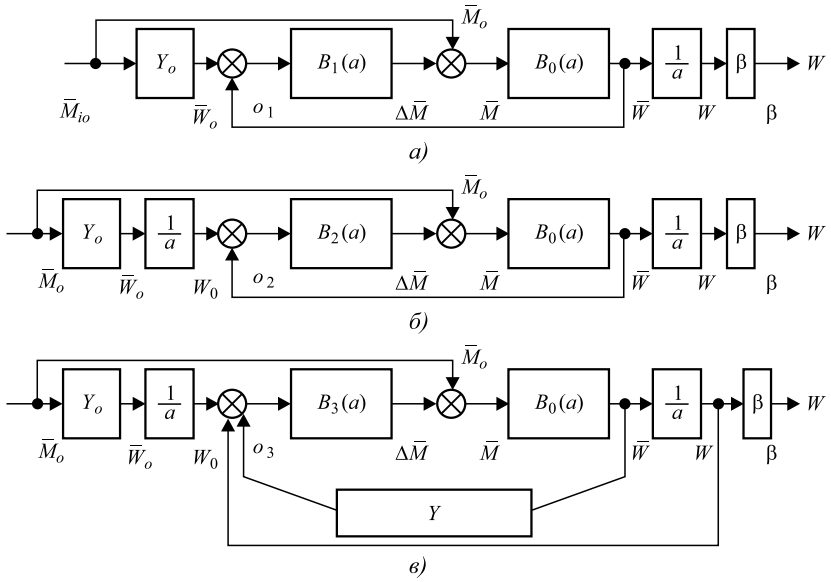


Рис. 5. Структурные схемы ОУ ФС по регулированию МК, в которых целями уровня являются:

а — поддержание заданных темпов выполнения мероприятий; *б* — поддержание заданного объёма выполнения мероприятий; *в* — поддержание заданного объёма с учётом темпов выполнения мероприятий

Заключение. Динамические профили ФС разработаны с учётом динамических параметров агентов, из которых складывается ФС. Полученные динамические профили позволили разработать структурную схему действий функциональных составляющих как самоуправляемых агентов в системе управления международными конфликтами. Предложена система урегулирования международных конфликтов с учётом коэффициента эффективности выполняемых работ, а также внешних факторов, отрицательно воздействующих на процесс принятия решений. Представлены статический и астатические алгоритмы управления.

Библиографические ссылки

1. **Барановский Е.Г., Владиславлева Н.Н.** Методы анализа международных конфликтов. М.: Научная книга, 2002. 240 с.

2. **Минаев В.А.** Информационно-аналитические системы обеспечения безопасности: проблемы и решения // Системы безопасности связи и телекоммуникаций. 2001. № 42(6). С. 20.

3. **Акимкин Е.М., Котов Н.М.** Экспертные системы оценки конфликтных ситуаций: проблемы создания / Конфликтология в трансформирующемся Российском обществе: теория и практика: Тезисы и материалы всероссийской конференции. М.: Изд-во Института социологии РАН, 1998. С. 60—65.

4. **Светлов В.А.** Введение в единую теорию анализа и разрешения конфликтов. М.: Либроком, 2009. 304 с.

5. **Bloomfield L.P., Moulton A.** Managing International Conflict: From Theory to Policy: A Teaching Tool Using Cascon. New York: St. Martin's Press, 1997. 230 p.

6. **Lincoln P.** Bloomfield and Allen Moulton Managing International Conflict: From Theory to Policy. New York: St. Martin's Press, 1997. 85 p.

7. **Neisser U.** Cognitive Psychology. New York: Appleton Century Crofts, 1967. P. 89.

8. **Саати Т.Л.** Принятие решений: метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 277 с.

9. **Абаев Л.Ч.** Об актуальных подходах к моделированию международных отношений // Проблемы национальной стратегии. 2011. № 2. С. 31.

10. **Бабинцев В.С.** Методика слежения за развитием международных конфликтов и прогнозирование их развития // Моделирование процессов мирового развития и сотрудничества. 1991. № 4. С. 87.

Ссылка для цитирования

Пашкова Е.Э., Кабулова Е.Г. Профили мультиагентной системы управления международными конфликтами // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 313—316.

УДК 621.396

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, проф., академик РАН, **Н.Е. Зубов,** д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
С.В. Иваненко, С.В. Губенко, В.С. Шапкин, С.В. Далецкий
(Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, г. Москва)
Nikolay.Zubov@rsce.ru

ВЛИЯНИЕ АППАРАТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ КОДОВЫХ К ФАЗОВЫМ НАВИГАЦИОННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЯМ

Рассмотрено влияние асимметрии спектра помехи, вызванного неточной настройкой входного фильтра аппаратуры потребителей (АП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) с частотным разделением каналов типа ГЛОНАСС, на точность фазовых навигационных определений координат воздушного судна (ВС). Показано, что смещение оценки фазы сигнала, обусловленное асимметрией спектра помехи, может достигать значений, существенно превышающих инструментальную погрешность фазовых измерений. Описано влияние замены фазы смеси сигнала и помехи её цифровым эквивалентом в виде измеряемого количеством счётных импульсов временного интервала между нулевыми переходами смеси и опорного сигнала на точность фазовых навигационных определений ВС с использованием АП СРНС. Отмечено, что такая обработка приводит к смещению оценки фазы сигнала, которая может достигать значительной величины (это свидетельствует об ограничениях, присущих цифровым методам обработки сигнала, при переходе в АП СРНС от кодовых навигационных определений к фазовым).

Ключевые слова: воздушное судно; спутниковая радионавигационная система; навигационные определения; оценка фазы сигнала; смещение оценки; помеха; асимметрия спектра; измерение фазы; цифровая обработка; плотность вероятностей.

The asymmetry influence of the interference spectrum caused by inaccurate tuning of the consumer equipment (CE) input filter of satellite radio navigation systems (SRNS) with frequency division of GLONASS type channels on the phase navigation determination accuracy of the coordinates of the aircraft is considered. It is shown that the shift in the estimate of the signal phase, due to the asymmetry of the interference spectrum, can reach values that significantly exceed the instrumental error of the phase measurements. The effect of replacing the signal mixture and interfering phase with its digital equivalent in the form of the time interval between zero transitions of the mixture and the reference signal, measured by the number of phase transitions on the phase navigation determination accuracy of the aircraft by using the AP SRNS is described. It is marked that such processing leads to a shift in the estimate of the signal phase which can reach a significant amount (this indicates the limitations inherent in digital signal processing methods when transition from navigation code definitions to phase definitions in the CE SRNS).

Keywords: aircraft; satellite radio navigation system; navigation definitions; signal phase evaluation; bias assessment; interference; spectrum asymmetry; phase measurement; digital processing; probability density.

В принципе работы спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа ГЛОНАСС и GPS [1] заложена принципиальная возможность повышения точности навигационных определений (НО) путём перехода от кодовых НО к фазовым. Потребность в таком переходе вызвана расширением круга навигационных задач (НЗ), требующих повышенной точности НО. К ним, в частности, относятся обеспечение посадки воздушных судов (ВС) по третьей категории ИКАО и на палубу морского судна, дозаправка ВС в полёте, местоопределение при проведении топогеодезических работ и др.

Особенностью СРНС ГЛОНАСС в отличие от СРНС GPS является использование не кодового, а частотного разделения каналов [2]. При этом в аппаратуре потребителей (АП) СРНС ГЛОНАСС при её изготовлении

производится компенсация фазовых набегов в каналах радиоприёмного устройства (РПУ). В этой связи представляет интерес оценка эффективности такой процедуры в условиях воздействия на РПУ помех при его эксплуатации.

Причиной дополнительных фазовых сдвигов в каналах РПУ, приводящих к снижению точности фазовых НО, может служить неточность настройки фильтров в частотных каналах, приводящая к асимметрии спектра помехи на их выходах.

При этом из рассмотрения следует исключить фазовый сдвиг, обусловленный влиянием фазочастотной характеристики неточно настроенного фильтра, поскольку он устраняется при компенсации фазовых набегов в каналах РПУ на чистом сигнале.

Рассматривается лишь дополнительная погрешность, возникающая при действии помехи, обусловленная асимметрией спектра помехи на выходе фильтра относительно частоты сигнала.

В СРНС ГЛОНАСС и GPS используется фазоманипулированный сигнал. Рассмотрение проведём применительно к элементарной посылке такого сигнала, представленной в виде квазигармонического сигнала

$$S(t) = A(t)\cos(\omega t + \varphi),\ 0 \leqslant t \leqslant \tau, \qquad (1)$$

фаза которого подлежит оценке в условиях гауссовой помехи $n(t)$ с несимметричным спектром. Для общности рассмотрения помеху будем полагать нестационарной. Корреляционная функция такой помехи может быть представлена в следующем виде [3]:

$$B(t,\ u) = \\ = b_1(t,\ u)\cos\omega(t-u) - b_2(t,\ u)\sin\omega(t-u). \qquad (2)$$

При этом функционал отношения правдоподобия, необходимый для оценки фазы сигнала (1), имеет вид

$$L[x(t)|\varphi] = \exp\left[-\frac{1}{2}\int_0^\tau A(t)f_1(t)dt\right]\times \\ \times\exp\left[2\cos\varphi\int_0^\tau x(t)v_1(t)dt + 2\sin\varphi\int_0^\tau x(t)v_2(t)dt\right], \qquad (3)$$

где $x(t) = s(t) + n(t)$, $v_1(t) = f_1(t)\cos\omega t + f_2(t)\sin\omega t$, $v_2(t) = f_1(t)\cos\omega t - f_2(t)\sin\omega t$,

а функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ определяются из решения интегральных уравнений:

$$\int_0^\tau b_1(t,u)f_1(u)du = A(t); \qquad (4)$$

$$\int_0^\tau b_1(t,u)f_2(u)du = \int_0^\tau b_2(t,u)f_1(u)du. \qquad (5)$$

Используя критерий максимума правдоподобия для оценки фазы сигнала, получаем

$$\varphi* = \operatorname{arctg}(Y/X) + p\pi, \qquad (6)$$

где $X = \int_0^\tau x(t)v_1(t)dt$, $Y = \int_0^\tau x(t)v_2(t)dt$, $p = \begin{cases}0, & X > 0,\\ 1, & X < 0.\end{cases}$

Поскольку параметры X и Y связаны со смесью сигнала и помехи $x(t)$ и, соответственно, с нормально распределённой помехой $n(t)$ линейными преобразованиями, они также являются нормально распределёнными. При этом их средние значения, дисперсии и коэффициент корреляции между ними можно записать так:

$$\bar{X} = d_1\cos\tau - d_2\sin\varphi;\ \bar{Y} = d_1\sin\varphi + d_2\cos\varphi;$$
$$\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = d_1;\ R_{XY} = R = d_2/d_1,$$

где

$$d_i = \int_0^\tau A(t)f_i(t)dt,\ i = 1,2. \qquad (7)$$

Рассматривая случайные величины X и Y в качестве декартовых координат некоего вектора в комплексной плоскости, аргумент которого является оценкой фазы сигнала $\varphi*$, с использованием стандартных преобразований [4], получаем выражение для её плотности вероятностей в виде

$$W(\varphi^*) = \frac{1}{2\pi(1-R^2)^{1/2}(1-R\sin 2\varphi^*)}\times \\ \times\exp\left[-\frac{d_1}{2}(1+R^2)(1-2\sin\psi)\right] + \\ +\left(\frac{d_1(1+R^2)}{2\pi(1-R^2)}\right)^{1/2}\frac{\cos(\varphi^*-\psi) - R\sin(\varphi^*+\psi)}{(1-R\sin 2\varphi^*)^{3/2}}\times \\ \times\exp\left\{-\frac{d_1(1+R^2)}{2(1-R\sin 2\varphi^*)}\times\right. \\ \left.\times\left[\sin^2(\varphi^*-\psi) - R^2(1-2\psi\cos 2\varphi^*)\right]\right\}\times \\ \times F\left\{\left(\frac{d_1(1+R^2)}{1-R\sin 2\varphi^*}\right)^{1/2}\times\right. \\ \left.\times[\cos(\varphi^*-\psi) - R\sin(\varphi^*+\psi)]\right\},\ |\varphi^*| \leqslant \pi, \qquad (8)$$

где $\psi = \varphi + \operatorname{arctg} R$, $F\{.\bullet.\}$ – функция Лапласа.

При этом для наиболее интересного с практической точки зрения случая высокой точности оценки фазы сигнала и малой асимметрии спектра помехи, т. е. при $b_2(t, u) \ll b_1(t, u)$ в выражении (2), плотность вероятностей (8) переходит в нормальное соотношение с дисперсией и смещением оценки, определяемыми выражениями

$$\sigma^2_{\varphi^*} = d_1^{-1}; \qquad (9)$$

$$\delta\varphi^* = \operatorname{arctg}(d_2/d_1). \qquad (10)$$

Как видно из выражения (10), в отсутствие асимметрии помехи, т. е. при $b_2(t, u) \equiv 0$, оценка фазы является несмещённой, поскольку, как видно из уравнений (5) и (7), $f_2(t) \equiv 0$, $d_2 \equiv 0$.

Для оценки влияния степени асимметрии спектра помехи на величину смещения оценки фазы сигнала (1) проиллюстрируем полученные результаты на конкретном примере. Для упрощения рассмотрения гауссову помеху будем полагать стационарной с корреляционной функцией вида [5]:

$$B(t-u) = \sigma^2 \exp(|-\alpha|t-u|) \times \\ \times [\cos\omega(t-u) + (\alpha/\omega)\sin\omega(t-u)], \qquad (11)$$

где σ^2 — дисперсия помехи.

Такой вид имеет корреляционная функция случайного процесса на выходе низкодобротного колебательного контура при подаче на его вход широкополосной помехи в виде белого шума. При этом степень асимметрии спектра на выходе контура характеризует отношение α/ω.

Совместное решение уравнений (4) и (5) в предположении, что $\alpha/\omega \ll 1$, с учётом выражений (6), (9) и (10) даёт следующие выражения для оценки фазы сигнала, её дисперсии и смещения:

$$\varphi^* = \operatorname{arctg} \frac{\int_0^\tau x(t) r_2(t)\, dt + C_1(0)x(0) + C_2(\tau)x(\tau)}{\int_0^\tau x(t) r_1(t) dt + (1/\omega) \times \left[C_1'(0)x(0) + C_2'(\tau)x(\tau)\right]} + \rho\pi, \qquad (12)$$

где

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{при знаменателе} > 0, \\ 1 & \text{при знаменателе} < 0, \end{cases}$$

$$r_1(t) = a(t)\cos\omega t + \left[\frac{a'(t)}{\omega}\right]\sin\omega t,$$

$$r_2(t) = \left[\frac{a(t)}{\omega}\right]\cos\omega t - a(t)\sin\omega t;$$

$$a(t) = \alpha^2 A(t) - A''(t);$$

$$C_1(t) = \alpha A(t) - A'(t); \quad C_2(t) = \alpha A(t) + A'(t);$$

$$\sigma^2_{\varphi^*} = \frac{2\alpha\sigma^2}{\left(\int_0^\tau \{\alpha^2 A^2(t) + [A'(t)]^2\} dt + \alpha[A^2(0) + A^2(\tau)]\right)};$$

$$\delta^2_{\varphi^*} = \operatorname{arctg} \frac{C_2^2(\tau) - C_1^2(0)}{2\omega\left(\int_0^\tau \{\alpha^2 A^2(t) + [A'(t)]^2\} dt + \right.} \\ \left. + \alpha[A^2(0) + A^2(\tau)]\right). \qquad (13)$$

При гауссовой форме огибающей сигнала вида

$$A(t) = A_0 \exp[-\mu(t - \tau/2)^2], \qquad (14)$$

где $\tau = 2/(\mu \lg e)^{1/2}$ — длительность импульса сигнала, определяемая на уровне 0,1 от максимума его огибающей, получаем зависимость смещения оценки (13) от отношения α/ω, характеризующего степень асимметрии спектра смеси сигнала и помехи (табл. 1).

Таблица 1

Смещение оценки фазы сигнала при действии помехи с несимметричным спектром

α/ω	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$\delta\varphi^*$, град.	0,5	1,30	2,5	4,60	6,3

Как видим, величина смещения оценки фазы сигнала увеличивается с повышением степени асимметрии спектра помехи, достигая значений, превышающих инструментальную погрешность фазовых измерений, что следует учитывать, определяя потенциальную точность навигационных определений при переходе в СРНС ГЛОНАСС от кодовых к фазовым определениям.

Результаты проведённого исследования влияния асимметрии спектра помехи на точность фазовых измерений могут быть использованы также для оценки точностных характеристик АП СРНС с фазовыми навигационными определениями при воздействии на неё узкополосной помехи с частотой, близкой к рабочей частоте АП.

Широкое внедрение цифровых методов обработки сигнала в радиоэлектронном оборудовании (РЭО) средств связи и навигации делает актуальным анализ влияния неэквива-

лентности фазы и её цифрового эквивалента на точностные характеристики АП СРНС, особенно при переходе от кодовых к фазовым навигационным определениям.

Обычно в цифровых фазометрах цифровым эквивалентом фазы является временной интервал между «нулями» входного и опорного сигналов – импульсами, формируемыми в моменты переходов через нулевой уровень указанных сигналов.

При этом процесс цифрового измерения фазы входного сигнала осуществляется путём расчёта числа тактовых импульсов во временном интервале между «нулями» входного и опорного сигналов, фиксируемом с помощью спускового устройства типа двухвходового триггера.

Однако такая процедура измерения фазы в условиях наличия помех не обеспечивает полной эквивалентности фазы и её цифрового эквивалента. Это связано с появлением под действием помех в отдельных периодах сигнала так называемых «лишних» нулей [6] либо, наоборот, с исчезновением нулей.

Для оценки влияния указанного эффекта на точность измерения фазы сигнала описанным способом необходимо найти плотности вероятностей $W(\tau)$ временного интервала до первого нуля смеси сигнала и помехи, следующего за нулём опорного сигнала, поскольку используемый для фиксации временного интервала триггер на последующие нули (вплоть до его сброса очередным нулём опорного сигнала) не реагирует.

Далее после перехода от временного интервала к фазе путём умножения на частоту ω аргумента $W(\tau)$ необходимо сравнить полученное распределение с распределением фазы смеси сигнала и помехи, которую полагаем гауссовой.

Сформулированная задача отыскания $W(\tau)$ является частным случаем рассмотренной в работе [7] задачи определения функции распределения времени первого достижения случайным процессом $x(t)$ заданной границы x_τ с положительной производной. Общее решение этой задачи имеет вид

$$W(\tau, x_\tau, t_0) = \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^{r-1} \int_0^{t_0+t_1} \dots \int_0^{t_0+\tau} \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \dot{x}_1 \dots \dot{x}_r W_{2r}(x_1, \dot{x}_1, \dots, x_r, \dot{x}_r, t_1, \dots, t_{r-1}, \tau) \Big|_{x_1 = \dots x_r = x_\tau} d\dot{x}_1 \dots d\dot{x}_r dt_1 \dots dt_{r-1}, \quad (15)$$

где t_0 — начало реализации процесса; $W_{2r}(x_1, \dot{x}_1, \dots, x_r, \dot{x}_r, t_1, \dots, t_{r-1}, \tau)$ — совместная плотность вероятностей случайного процесса и его производной в r моментов времени.

Полагая случайный процесс $x(t)$ узкополосным и, как следствие, что число «лишних» нулей на интервале наблюдения $[0, \tau]$ не более одного, при граничных условиях $t_0 = 0$ и $x_\tau = 0$ из решения (15) получаем искомое выражение для $W(\tau)$:

$$W(\tau) = W_1(\tau) - \int_o^{\tau} W_2(t_1, \tau) dt_1, \quad (16)$$

где $W_1(\tau)$ и $W_2(t_1, \tau)$ – одномерная и двумерная дифференциальные вероятности нулей, которые в соответствии с решением (15) запишем в виде

$$W_1(\tau) = \int_0^{\infty} \dot{x} W_2(x, \dot{x}, \tau) \Big|_{x=0} d\dot{x}; \quad (17)$$

$$W_2(t_1, \tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dot{x}_1 \dot{x}_2 W_4(x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, t_1, \tau) \Big|_{x_1 = x_2 = 0} d\dot{x}_1 d\dot{x}_2. \quad (18)$$

Выражения для $W_1(\tau)$ и $W_2(t_1, \tau)$ применительно к смеси гармонического сигнала и гауссовой помехе были получены в работах [6] и [8] соответственно. Переходя далее в выражении (16) от временных интервалов τ и t_1 к фазам $\theta = \omega\tau$ и $\theta_1 = \omega t_1$ и производя замену переменных $\varphi = \theta - \pi$ и $\varphi_1 = \theta_1 - \pi$, получаем приближённое выражение для плотности вероятностей цифрового эквивалента фазы смеси сигнала и помехи в виде

$$W(\varphi) \cong W_1(\varphi) - \int_{-\pi}^{\varphi} W_2(\varphi_1, \varphi) d\varphi_1. \quad (19)$$

Здесь выражения для $W_1(\varphi)$ и $W_2(\varphi_1, \varphi)$, полученные путём замены переменных из выражений $W_1(\tau)$ и $W_2(t_1, \tau)$, запишем так:

$$W_1(\varphi) = \frac{(1+k^2)^{1/2}}{2\pi} \times \left(\exp\left\{ -\frac{s^2}{2} \left[\frac{\cos^2(\varphi - \varphi_c)}{1+k^2} + \sin^2(\varphi - \varphi_c) \right] \right\} + \left(\frac{2\pi}{1+k^2} \right)^{1/2} s \cos(\varphi - \varphi_c) F\left[\frac{s \cos(\varphi - \varphi_c)}{(1+k^2)^{1/2}} \right] \times \exp\left[-\frac{s^2 \sin^2(\varphi - \varphi_c)}{2} \right] \right); \quad (20)$$

$$W_2(\varphi_1,\varphi_2)=\frac{D_{23}}{2\pi(1-R^2)^{1/2}}\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{s^2}{2D}\sum_{m=0}^{1}\sum_{p=0}^{1}\sum_{r=0}^{1}\sum_{l=1}^{2}\frac{D(2m+l)(2p+r)}{(1+k^2)^{(m+p)/2}}\times\right. \quad (21)$$

$$\left.\times\sin\left(\varphi_l-\varphi_c+m\frac{\pi}{2}\right)\sin\left(\varphi_r-\varphi_c+p\frac{\pi}{2}\right)\right]\times$$

$$\times\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n b_n(\gamma_1)b_n(\gamma_2)(D_{23}/D_{34})^n/n!;$$

$$b_0(\gamma_i)=(2\pi)^{-1/2}-\gamma_i F(-\gamma_i)\exp(\gamma_i^2/2);$$

$$b_1(\gamma_i)=(2\pi)^{-1/2}\gamma_i-(1+\gamma_i^2)F(-\gamma_i)\exp(\gamma_i^2/2);$$

$$b_n(\gamma_i)=\gamma_i b_{n-1}(\gamma_i)-\gamma_i^{n-1}F(-\gamma_i)\exp(\gamma_i^2/2)+$$

$$+\sum_{\mu=0}^{n-2}\gamma_i^{\mu}F^{(n-\mu-1)}(0),\ n\geqslant 2,$$

где $k=\Delta\omega_{\text{п}}/\omega$, $\Delta\omega_{\text{п}}=[-R_0''(0)]^{1/2}$ — эффективная ширина спектра помехи; $R_0(\tau)$ — «огибающая» коэффициента корреляции помехи $R(\tau)=R_0(\tau)\cos\omega_0\tau$; s — отношение амплитуды гармонического сигнала к среднеквадратическому значению помехи; φ_c — фаза сигнала; $F(x)$ — функция Лапласа, табулированная в работе [4]; табулированные в работе [9] коэффициенты

$$\gamma_i=-s\left[D_{33}/(1-R^2)\right]^{1/2}\sum_{m=0}^{1}\sum_{l=1}^{2}\frac{D_{(2m+l)(2+l)}}{(1+k^2)^{m/2}}\times$$

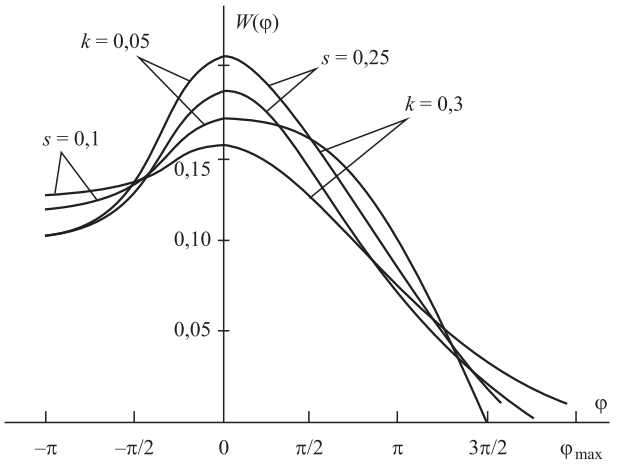
$$\times\sin(\varphi_l-\varphi_c+m\pi/2),\ i=1,2;$$

$$D=\begin{vmatrix}1 & R(\tau) & 0 & R'(\tau)/\omega_1\\ R(\tau) & 1 & -R'(\tau)/\omega_1 & 0\\ 0 & -R'(\tau)/\omega_1 & 1 & R''(\tau)/\omega_1^2\\ R'(\tau)/\omega_1 & 0 & R''(\tau)/\omega_1^2 & 1\end{vmatrix}$$ —

определитель корреляционной матрицы помехи и её производной [4]; $\omega_1=\omega(1+k^2)^{1/2}$; D_{ik} — алгебраические дополнения определителя корреляционной матрицы D.

При этом аргумент функции $R(\tau)$ следует положить равным $\tau=(\varphi_2-\varphi_1)/\omega$.

На рисунке приведены кривые плотности вероятностей цифрового эквивалента фазы смеси гармонического сигнала и гауссовой помехи (19) для двух значений отношения сигнал/помеха s и отношения эффективная ширина спектра помехи/центральная частота спектра помехи (совпадающая с частотой сигнала) k. Как видим, плотность вероятностей цифрового эквивалента фазы смеси сигнала и помехи в виде временного интервала между



Плотность вероятностей цифрового эквивалента фазы смеси гармонического сигнала и гауссовой помехи

«нулями» входного и опорного сигналов в отличие от плотности вероятностей фазы смеси [4] несимметрична. При этом степень асимметрии увеличивается с повышением относительной ширины спектра помехи и уменьшением отношения сигнал/помеха.

Другим отличием плотности вероятностей цифрового эквивалента фазы от плотности вероятностей фазы является то, что плотность вероятностей цифрового эквивалента выходит за пределы интервала $[-\pi,\pi]$. Это связано с конечной вероятностью исчезновения нулей смеси сигнала и помехи в отдельных периодах опорного сигнала.

Асимметрия плотности вероятностей цифрового эквивалента фазы приводит к смещению оценки фазы сигнала φ_c. Например, при измерении фазы следящим измерителем её оценка определяется как математическое ожидание измеренных значений фазы смеси сигнала и помехи:

$$\varphi_c^*=\int_{-\pi}^{\varphi_{\max}}\varphi W(\varphi)d\varphi. \quad (22)$$

При этом смещение оценки постоянной на интервале времени наблюдения фазы сигнала следящим измерителем может быть оценено из соотношения

$$\delta\varphi_c\cong\int_{-\pi}^{\varphi_{\max}}\varphi W(\varphi)\Big|_{\varphi_c=0}d\varphi. \quad (23)$$

Для трёх значений отношения сигнал/помеха и двух значений отношения эффективная ширина спектра помехи/центральная частота спектра помехи оно приведено в табл. 2.

Таблица 2

Смещение оценки фазы сигнала при использовании её цифрового эквивалента

k	$\delta\varphi_c$		
	$s = 0{,}1$	$s = 0{,}25$	$s = 1$
0,05	4,4°	0,2°	0,02°
0,30	68°	−1,3°	−0,1°

Как видим, при слабом сигнале ($s \ll 1$) и большой относительной ширине спектра помехи ($k > 0{,}05$) смещение оценки фазы сигнала вследствие замены фазы её цифровым эквивалентом может достигать значительной величины, что свидетельствует об ограничениях, присущих цифровым методам обработки сигнала, при переходе в АП СРНС от кодовых навигационных определений к фазовым.

Во избежание смещения оценки фазы сигнала, вызванного заменой фазы её цифровым эквивалентом рассматриваемого вида для АП, предназначенной для работы в условиях интенсивных помех, представляется целесообразным использование фазовых измерений, основанных на оценке амплитуд синфазной X^* и квадратурной Y^* составляющих сигнала с последующим вычислением по ним оценки его фазы в соответствии с алгоритмом [5]:

$$\varphi_c^* = \operatorname{arctg}(Y^*/X^*). \qquad (24)$$

Библиографические ссылки

1. **Соловьев Ю.А.** Системы спутниковой навигации. М.: Радио и связь, ИТЦ «Эко-Трендз», 2000.

2. **Кинкулькин И.Е.** Современная аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. 1996. № 2.

3. **Гаткин Н.Г., Далецкий Ю.Л., Красный Л.Г.** Обнаружение сигналов на фоне нестационарных помех // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1970. № 3.

4. **Левин Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 1. М.: Советское радио, 1974.

5. **Хелстром К.** Статистическая теория обнаружения сигналов. Т. 1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963.

6. **Коровин Ю.К., Лутченко А.Е.** Распределение нулей узкополосного случайного процесса // Вопросы радиоэлектроники. Сер. XII. 1963. № 13.

7. **Левин Б.Р., Фомин Я.А.** Распределение времени первого достижения заданной границы // Радиотехника и электроника. 1966. Т. XI. № 9.

8. **Рубцов В.Д.** О статистических характеристиках нулей и фазы узкополосного случайного процесса // Вопросы радиоэлектроники. 1970. Сер. ОТ. № 15.

9. **Тихонов В.И.** Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1967.

Ссылка для цитирования

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Иваненко С.В., Губенко С.В., Шапкин В.С., Далецкий С.В. Влияние аппаратурных ограничений на точность местоопределения воздушных судов с использованием спутниковых радионавигационных систем при переходе от кодовых к фазовым навигационным определениям // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 317—322.

Требования по оформлению библиографических ссылок

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

УДК 681.513

Фам Суан Чыонг
(Ханойский государственный технический университет им. Ле Куи Дон)
truongpx@mta.edu.vn

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Исследована задача проектирования системы управления и навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата (БЛА). Представлен общий подход к синтезу алгоритма управления для системы управления при движении БЛА по маршруту. В качестве навигационного комплекса использован селективный комплекс с интеллектуальной компонентой в виде акцептора действия П.К. Анохина. Представлен анализ геофизических полей для использования в навигационном комплексе. Полученные решения носят универсальный характер и могут быть использованы для БЛА различных классов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; система управления; система маршрутной коррекции; навигационный комплекс; алгоритм управления; акцептор действия; геофизические поля.

The task of designing a control system and navigation complex of an unmanned aircraft (UA) is researched. A general approach to the synthesis of the control algorithm for the control system during the UA movement along the route is introduced. As a navigation complex, a selective complex with an intellectual component in the form of an action acceptor of the P.K. Ankhin is used. The analysis of geophysical fields for use in the navigation complex is introduced. The obtained solutions have universal nature and can be used for UA of various classes.

Keywords: unmanned aircraft; control system; route correction system; navigation complex; control algorithm; action acceptor; geophysical fields.

В настоящее время существует класс беспилотных летательных аппаратов (БЛА), осуществляющих длительные полёты (1...3 дня) в атмосфере. К этому классу относятся БЛА Heron (производитель Израиль, время полёта 2 дня), X47B (производитель США, время полёта 2 дня), «Сайхун 5» (производитель КНР, время полёта 3 дня). Такие БЛА многофункциональны и реализуют различные режимы полёта: взлёт и посадку (X47B осуществляет посадку на авианосец), полёт по заданному маршруту в целях выхода в заданную область пространства с требуемыми точностями [1, 2]. Аналогичные режимы полёта, но с существенно меньшими скоростями и высотами реализуют БЛА, представляющие собой различные типы дирижаблей [3], а с бóльшими скоростями — ракеты разных классов [4].

Для выполнения полёта БЛА снабжён системой управления (СУ). Формирование управляющих воздействий осуществляется на основе информации, поступающей с навигационного комплекса (НК) БЛА. Точность выполнения БЛА поставленных задач зависит от эффективности СУ и точности НК.

Для разработки высокоточных СУ и НК целесообразно исследовать основные режимы функционирования БЛА и для каждого режима обосновать и разработать наилучшие варианты СУ и НК.

При осуществлении посадки БЛА на аэродром целесообразно проводить довыставку [1, 2, 5] инерциальной навигационной системы (ИНС) для более точного захода на глиссаду, а далее использовать системы, обеспечивающие посадку пилотируемого летательного аппарата. При посадке БЛА на движущийся авианосец после выставки ИНС также необходимо осуществлять операцию довыставки. Затем оптическая система позволит БЛА держаться на глиссаде. Завершение посадки БЛА на палубу авианосца осуществляется с помощью аэрофинишера, состоящего из четырёх тросов. В случае использования БЛА типа дирижабль для доставки груза на корабль осуществляются его точный вывод в точку дислокации корабля и зависание над ним. После чего грузы опускают на палубу [1—3].

При осуществлении БЛА полёта по заданному маршруту сигнал управления рассчиты-

вается заранее и является программным. Система управления БЛА на маршевом участке полёта решает следующие основные задачи: отработку программной траекториии с требуемыми точностями; поддержание требуемого углового положения аппарата на траектории полёта; коррекцию бортового НК.

Разработку НК БЛА предполагается проводить на основе анализа точностных характеристик используемых измерительных систем. В основу НК положены известный селективный подход [5, 6] и теория функциональных систем П.К. Анохина [7, 8]. Селективный подход позволяет выбирать рабочий контур НК, обеспечивающий максимально возможную точность навигационной информации. Теория функциональных систем использована для формирования акцептора действия НК, который даёт возможность выбрать наилучший рабочий контур НК на прогнозируемое время полёта БЛА.

В статье исследованы аспекты разработки СУ и НК для высокоскоростных БЛА. Но методика исследования и результаты разработки НК могут быть использованы и для низколетящих высокоманевренных дирижаблей.

Постановка задачи исследования. Поскольку основные манёвры БЛА совершает в вертикальной плоскости, очевидно, что наибольшее значение в алгоритме управления имеет канал тангажа. Нельзя не учитывать, что даже незначительное изменение высоты полёта БЛА на сверхзвуковой скорости ведёт к изменению атмосферных условий, а значит, изменяются внешние воздействия на объект управления, его аэродинамические характеристики, эффективность рулей и другие важные для управления параметры движения. Эти изменения могут повлиять на устойчивость БЛА, а следовательно, и на его управляемость. Исследование физической и математической моделей системы стабилизации БЛА представляет сложную комплексную задачу. Это обусловлено тем, что управление полётом БЛА — это управление в общем случае пространственным положением упругого тела переменной массы, находящегося под действием гравитационных, инерционных, аэродинамических сил и моментов и тяги двигательной установки, а движение такого тела описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений высокой размерности с переменными коэффициентами, которые зависят от конструкции аппарата, параметров полёта и характеристик атмосферы.

Объект исследования является неотъемлемой частью системы управления БЛА.

Среди многочисленных задач, связанных с созданием высокоточных БЛА, большое внимание уделяется выведению БЛА с требуемыми точностями в область пространства, определяемую целью его применения. Приведение БЛА в область начала конечного наведения на маршевом участке полёта осуществляется по данным НК.

В основе НК БЛА лежит бесплатформенная ИНС (БИНС). Её основной недостаток — интегральное накопление ошибки. При достаточно больших расстояниях полёта это не позволяет использовать такую навигационную систему для решения задачи наведения БЛА на цель. Для решения указанной проблемы используют дополнительную подсистему коррекции работы БИНС. Корректирующая подсистема получает информацию от различных датчиков системы. Её совместная обработка в НК позволяет значительно повысить точность навигационных определений БЛА.

Наиболее распространённым способом коррекции БИНС является коррекция от ГЛОНАСС путём комплексирования данных, поступающих с её спутников. Такой подход позволяет обеспечить требуемую точность, однако он неприменим при отсутствии сигнала от ГЛОНАСС. Кроме того, ГЛОНАСС имеет низкую помехозащищенность. Это обусловливает необходимость разработки альтернативных способов коррекции БИНС.

Таким образом, задача построения НК является актуальной в рамках реализации маршрутной навигации БЛА.

Уравнение продольного движения БЛА в атмосфере. Рассмотрим продольное движение БЛА в атмосфере.

При движении в вертикальной плоскости обращаются тождественно в ноль силы, моменты и углы, описывающие изменение боковых параметров. Таким образом, $\varphi = 0$, $\psi = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = \gamma_c = 0$, $\Sigma F_z = 0$, $\Sigma M_{xa} = \Sigma M_{ya} = 0$, $\omega_x = \omega_y = 0$, где φ — угол места; ψ — угол рыскания; β — угол скольжения; γ — угол крена; γ_c — угол сноса; ΣF_z — сумма проекций всех сил, действующих на подвижную ось OZ; ΣM_{xa}, ΣM_{ya} — суммарные аэродинамические моменты относительно осей OX_a, OY_a соответственно; ω_x, ω_y — проекции угловой скорости вращения БЛА на соответствующие оси связанной системы координат. На рис. 1 представлена схема БЛА и действующие на него силы.

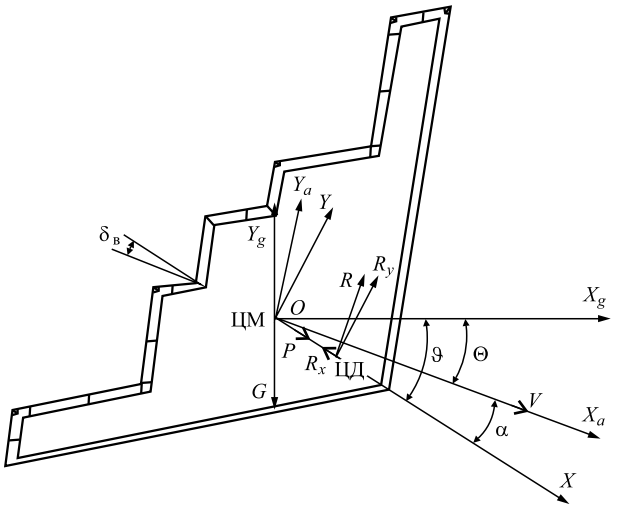


Рис. 1. Силы, действующие на БЛА во время движения: $OX_gY_gZ_g$ — нормальная система координат; $OX_aY_aZ_a$ — скоростная система координат; $OXYZ$ — связанная система координат; R — результирующая сила (результирующая система сил, действующих на летательный аппарат, в общем случае аэродинамических и тяги, за исключением гравитационных сил, инерциальных сил и сил, возникающих при контакте с Землей); R_x — вектор тангенциальной силы (проекция вектора R на ось OX); R_y — вектор нормальной аэродинамической силы (проекция вектора R на ось OY); $G = mg$ — вектор силы тяжести; P — тяга двигателя; $\delta_в$ — угол отклонения руля высоты; ϑ — угол тангажа; α — угол атаки; Θ — угол наклона траектории; ЦМ — центр масс; ЦД — центр давления

Система уравнений продольного движения имеет вид

$$
\begin{aligned}
&m\frac{dV_x}{dt} = -R_x + G_x + m\omega_z V_y;\\
&m\frac{dV_y}{dt} = R_y + G_y - m\omega_z V_x;\\
&I_z\frac{d\omega_z}{dt} = M_{za};\\
&\dot{X}_g = V_x\cos\vartheta - V_y\sin\vartheta;\\
&\dot{Y}_g = V_x\sin\vartheta + V_y\cos\vartheta;\\
&V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2};\\
&\dot{\vartheta} = \omega_z;\\
&\alpha = -\operatorname{arctg}\left(\frac{V_y}{V_x}\right);\\
&\vartheta = \Theta + \alpha,
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где m — масса БЛА; V — вектор воздушной скорости; V_x, V_y — проекции вектора воздушной скорости БЛА на соответствующие подвижные оси; R — вектор результирующей силы, действующей на аппарат; R_x, R_y — проекции вектора R на оси OX и OY соответственно; $G = mg$ — вектор силы тяжести; G_x, G_y проекции вектора G на оси OX и OY соответственно; ω_z — угловая скорость вращения БЛА относительно оси OZ; I_z — момент инерции БЛА относительно оси OZ; M_{za} — составляющая вектора момента аэродинамической силы по оси OZ_a; X_g, Y_g — проекции вектора аэродинамических сил на оси нормальной системы координат; ϑ — угол тангажа; α — угол атаки; Θ — угол наклона траектории.

На начальном этапе проектирования системы стабилизации широко используются линеаризованные стационарные уравнения движения. Линеаризация дифференциальных уравнений предполагает, что решение можно представить в виде суммы двух решений, одно из которых рассматривается как базовое, а второе является достаточно малым, для того чтобы в степенном разложении можно было бы с приемлемой точностью ограничиться лишь членами ряда степени не выше первой (линейными членами). Для уравнений движения это означает, что движение можно представить в виде опорной траектории и малых отклонений от неё («возмущенного» движения).

Для вывода линеаризованных уравнений установим зависимости сил и моментов от величин Θ, ϑ, ω_z, α. Тяга, аэродинамические силы и их моменты являются сложными нелинейными функциями кинематических параметров движения и углов отклонения органов управления.

Пусть в некоторый момент времени вследствие возмущений, действующих на БЛА, имеем

$$
\begin{aligned}
&\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta;\\
&\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta;\\
&\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha,
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где Θ_0, ϑ_0, α_0 — значения кинематических параметров в невозмущенном движении; $\Delta\Theta$, $\Delta\vartheta$, $\Delta\alpha$ — малые приращения соответствующих параметров.

Для упрощения записи введём для производных сил и моментов следующие обозначения:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial X}{\partial V} = X^{*V};\quad \frac{\partial Y}{\partial V} = Y^{V};\quad \frac{\partial M_z}{\partial V} = M_z^{V};\\
&\frac{\partial X}{\partial \alpha} = X^{*\alpha};\quad \frac{\partial Y}{\partial \alpha} = Y^{\alpha};\quad \frac{\partial M_z}{\partial \alpha} = M_z^{\alpha};\\
&\frac{\partial X}{\partial \delta_в} = X^{*\delta_в};\quad \frac{\partial Y}{\partial \delta_в} = Y^{\delta_в};\quad \frac{\partial M_z}{\partial \delta_в} = M_z^{\delta_в},
\end{aligned}
$$

где H — высота полёта; $\delta_в$ — угол отклонения руля высоты.

Разложив аэродинамические силы X^*, тягу P и момент M_z в ряды Тейлора по малым приращениям и ограничиваясь линейными членами, получим

$$\begin{aligned}
&\frac{dV}{dt} = \frac{P^V - X^{*V}}{m}V + \frac{-P^\alpha - X^{*\alpha}}{m}\alpha - \\
&- g\Theta\cos\Theta - \frac{X^{*\delta_в}}{m}\delta_в; \\
&\frac{d\Theta}{dt} = \frac{P^V - Y^V}{mV}V + \frac{P^\alpha - Y^\alpha}{mV}\alpha + \\
&+ \frac{g\sin\Theta}{V}\Theta + \frac{Y^{\delta_в}}{mV}\delta_в; \\
&\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{M_z^V}{I_z}V + \frac{M_z^{\omega_z}}{I_z}\alpha + \frac{M_z^{\omega_z}}{I_z}\omega_z + \\
&+ \frac{M_z^{\dot\alpha}}{I_z}\dot\alpha + \frac{M_z^{\delta_в}}{I_z}\delta_в; \\
&\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z; \\
&\frac{dx}{dt} = V\cos\Theta - V\Theta\sin\Theta; \\
&\frac{dH}{dt} = V\sin\Theta + V\Theta\cos\Theta; \\
&\alpha = \vartheta - \Theta.
\end{aligned} \tag{3}$$

Управление движением БЛА осуществляется с помощью СУ, которая реализует заданный алгоритм. В алгоритме управления используется математическая модель движения БЛА. Алгоритм управления обычно синтезируется отдельно для каждого канала управления.

Оптимальность управления понимается в смысле минимума функционала вида

$$\begin{aligned}
&\Im = \int_{t_0}^{T^*} (X^{\mathrm{т}}QX + U^{\mathrm{т}}RU)dt + X^{\mathrm{т}}(T^*)SX(T^*); \\
&X(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t))^{\mathrm{т}}; \\
&U(t) = (u_1(t), u_2(t), \ldots, u_n(t))^{\mathrm{т}},
\end{aligned} \tag{4}$$

где $t \in [t_0, T^*]$ — анализируемый период времени; X — вектор состояния БЛА; U — вектор управления; t_0 — начальный момент времени функционирования объекта; T^* — момент времени окончания функционирования объекта; Q — матрица весовых коэффициентов, характеризующая качество переходного процесса; R — матрица весовых коэффициентов, характеризующая ограничения энергетики; S — матрица весовых коэффициентов, характеризующая штраф за конечное отклонение от регулируемого процесса.

Математическая модель исследуемого процесса имеет следующий вид:

$$\dot X = A(t)X + B(t)U, \tag{5}$$

где $A(t)$ — матрица модели; $B(t)$ — матрица управления; U — вектор управления.

Управление исследуемым объектом имеет вид [9]

$$U = -R^{-1}B^{\mathrm{т}}\Gamma X. \tag{6}$$

В уравнении (6) Г — симметричная матрица, являющаяся решением уравнения

$$\dot\Gamma = -\Gamma A - A^{\mathrm{т}}\Gamma + \Gamma BR^{-1}B^{\mathrm{т}}\Gamma - Q, \tag{7}$$

где $\Gamma(T) = S$.

В практических приложениях обычно матрицы весовых коэффициентов задаются в диагональной форме.

При реализации алгоритмов оптимального управления в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) целесообразно использовать их в дискретной форме.

Модель движения БЛА в дискретной форме имеет вид

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + B_k U_k, \tag{8}$$

где Φ_k — линейная матрица модели; k — номер шага вычислений.

В этом случае функционал качества

$$\Im = X_N^{\mathrm{т}}SX_N + \sum_{k=1}^{N}(X_k^{\mathrm{т}}Q_kX_k + U_N^{\mathrm{т}}R_kU_k), \tag{9}$$

где N — номер конечного шага вычислений.

Оптимальное управление запишется в виде

$$U_k = -(R_k + B_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}B_k)^{-1}B_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}\Phi_kX_k. \tag{10}$$

Матрица Г определяется в результате решения разностного матричного уравнения:

$$\begin{aligned}
\Gamma_k &= -\Phi_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}\Phi_k + Q_k - \\
&- \Phi_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}B_k(R_k + B_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}B_k)^{-1}B_k^{\mathrm{т}}\Gamma_{k+1}\Phi_k,
\end{aligned} \tag{11}$$

где $\Gamma_N = S$.

Реализации на борту БЛА подлежит оптимальное управление U_k.

При использовании другого типа БЛА и, соответственно, других моделей движения БЛА структура управления не изменяется. Изменяются только значения коэффициентов усиления в управляющем сигнале. Это обусловлено тем, что коэффициенты усиления (матрица усиления) зависят от матрицы модели (в непрерывном случае A и в дискретном — Ф), а также от матрицы управления B. Коэффициенты этих матриц изменяются в соответствии с моделью и затем используются в классическом алгоритме управления БЛА.

Навигационный комплекс. В связи с усложнением задач, решаемых с использованием навигационных систем, применяется множество различных систем и датчиков навигационной информации. Поэтому необходимо осуществлять её комплексную обработку. Совместная обработка информации от нескольких датчиков или систем называется комплексированием. Совокупность алгоритмически связанных навигационных систем и датчиков называется навигационным комплексом.

В состав навигационных комплексов входят системы и датчики, в основу действия которых положены различные физические принципы. Эти системы объединены алгоритмически.

Селективные измерительные комплексы и датчики предполагают определение наиболее достоверной информации и последующую её обработку с помощью алгоритма оценивания. С выхода алгоритма оценивания оценка вектора состояния поступает в выходную информацию комплекса для коррекции последней.

При проектировании НК рассматривается его возможный состав, т. е. все системы, которые могут быть использованы для получения навигационной информации. Выбирается базовая навигационная система. Она должна быть наиболее точной и универсальной. Обычно в качестве такой системы выбирается ИНС.

Во время функционирования БЛА постоянно происходит переключение конфигурации измерительного комплекса в целях получения наиболее достоверной измерительной информации, т. е. на разных интервалах работы с ИНС комплексируются различные внешние измерительные системы. Переключение на ту или иную структуру осуществляется на основе прогноза [10]. Для формирования прогноза необходимо использовать прогнозирующую модель, которая может быть получена, например, с помощью алгоритма самоорганизации [11, 12].

В селективном НК обычно используются бортовые радиолокационные системы (РЛС), наземные РЛС ближнего и дальнего наведения, астрокорректоры, спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС и др.

Одной из наиболее эффективных структур НК является НК с интеллектуальной компонентой [5, 8, 10]. В качестве такой компоненты используется акцептор действия, который включает в себя алгоритм построения прогнозирующей модели погрешностей ИНС, алгоритмы прогноза и сравнения текущих измерений с прогнозируемыми. Структура НК с интеллектуальной компонентой представлена на рис. 2.

В БКС формируются измерения для алгоритма оценивания (БО) и построения прогнозирующих моделей (АПМ), а также проводится сравнение текущей апостериорной информации с результатами прогнозирования. Полученная в АПМ математическая модель погрешностей ИНС используется в БО для оценки погрешностей ИНС, а также для их прогнозирования на некотором интервале времени, который выбирается в соответствии с режимом функционирования БЛА. БО реализован в виде адаптивной модификации нелинейного фильтра Калмана [13, 14], а в проектируемом НК БЛА — в качестве БО использована линейная адаптивная модификация фильтра Калмана [15, 16]. Блок АПМ — представляет собой алгоритм самоорганизации, на выходе которого получается нелинейная прогнозирующая модель погрешностей БИНС.

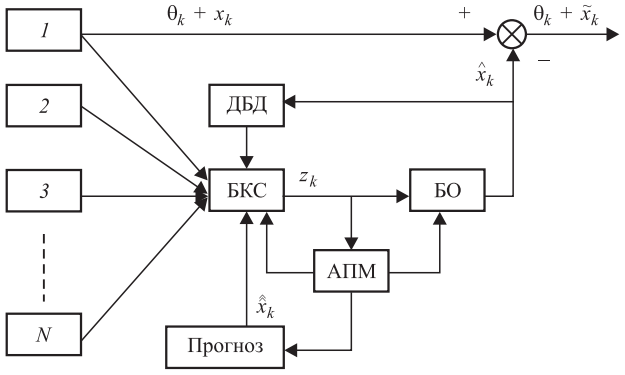


Рис. 2. Структура измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой:

1 — базовая навигационная система, обычно ИНС; *2*, ..., *N* — датчики и измерительные системы внешней информации; БКС — блок комплексирования и сравнения; БО — блок оценивания; АПМ — алгоритм построения модели; θ_k — истинная навигационная информация; x_k — погрешности ИНС; z_k — измерения; $\hat{x}_k$ — оценки погрешностей ИНС; $\tilde{x}_k$ — ошибка оценивания; $\hat{\hat{x}}_k$ — прогноз погрешностей ИНС

Анализ возможных геофизических полей, используемых при функционировании систем коррекции. При анализе принципиально возможных геофизических полей (ГФП) для функционирования систем коррекции определяющими являются следующие факторы: радиус корреляции навигационного поля, который в значительной степени определяет точность наведения; устойчивость характеристик ГФП в течение суток и года при воздействии факторов нестабильности и помех (естественных и искусственных); изученность ГФП и наличие технических средств его измерения и регистрации.

При анализе принципиально возможных ГФП для функционирования системы маршрутной коррекции (СМК) основными факторами являются возможность синтеза векторного информационного параметра (ИП) и оценка потенциальной точности наведения.

Геофизические поля разделяются на две основные группы: поверхностные и пространственные.

Пространственные ГФП, как правило, имеют нормальные и аномальные компоненты. Нормальной компонентой поля называется составляющая, имеющая практически регулярный (гладкий) в пространственном отношении характер по всей поверхности Земли или её крупных регионов. Данные, полученные с помощью нормального компонента поля, представляют собой ограниченную информацию: магнитный курс и вертикаль. В корреляционно-экстремальной навигации используются аномальные ГФП, содержащие высокочастотные или мелкоструктурные в пространственном отношении составляющие.

Научно-технические достижения последних трёх десятилетий позволили перевести в практическую плоскость задачу создания высокоточных систем наведения (СН) по некоторым ГФП, к числу которых относят:

поверхностные ГФП: поле рельефа Земли, оптическое (видимого и инфракрасного диапазонов), радиотепловое, радиолокационное;

пространственные ГФП: аномальные магнитное и гравитационное навигационные поля, аномальное электромагнитное поле Земли.

Два навигационных поля — поле рельефа Земли и аномальное гравитационное навигационное поле — составляют одну группу, так как по своей физической природе являются скалярными.

Для остальных ГФП — оптического, радиотеплового, радиолокационного, а также аномальных магнитного и электромагнитного полей Земли — может быть синтезирован векторный информативный параметр.

Гравитационное поле Земли (ГПЗ) образовано всей массой Земли и массами искусственных образований на её поверхности. ГПЗ характеризуется однозначным распределением силы тяготения по земной поверхности и внешнему пространству. На объекты действует также центробежная сила, вызванная суточным вращением Земли. В силу принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс силы тяготения неразделимы физическими методами, поэтому введено понятие поля силы тяжести, под которым понимается пространство, в котором каждой точке околоземного пространства соответствует единственное значение силы тяжести.

Таким образом, поле силы тяжести отличается от поля тяготения (ГПЗ) наличием эффекта центробежной силы, а его напряжённость в каждой точке численно равна ускорению силы тяжести в той же точке. В соответствии с устоявшейся терминологией, говоря о силе тяжести, подразумевают напряжённость силового поля Земли, т. е. ускорение силы тяжести.

При использовании ГПЗ в качестве навигационного поля поле силы тяжести разделяют на нормальную составляющую, имеющую практически регулярный характер, и аномальную часть, представляющую собой мелкоструктурную составляющую. В качестве информативных параметров ГПЗ могут быть использованы нормальное значение силы тяжести и её аномалии.

Так как радиус корреляции данного ГФП может составлять от сотен метров до десятков километров, то потенциальная точность наведения составляет 0,5...5 км (3σ), что делает данное ГФП малоценным для СН БПЛА.

Магнитное поле Земли (МПЗ) имеет четыре составляющих:

магнитное поле (МП) диполя, образуемого круговыми токами в жидком ядре Земли;

МП, образуемое магнитоактивными источниками (ферроактивными рудами), расположенными в коре Земли;

МП, образуемое локальными магнитными аномалиями;

МП, образуемое ионосферными токами различной природы.

Суммарное МПЗ представляет собой суперпозицию всех этих полей. Первые две составляющие в сумме дают нормальное МПЗ, представляющее собой «гладкое» поле с радиусом корреляции от десятков до сотен километров. В силу этого для высокоточного на-

ведения нормальное МПЗ практически непригодно, хотя и имеет высокую стабильность параметров по месту и времени. Тем не менее необходимо точное измерение параметров нормального МПЗ для выделения в полном МПЗ аномального поля.

Третья составляющая представляет собой аномальное МПЗ с радиусом корреляции от сотен метров до десятков километров и достаточно высокой временно́й и пространственной стабильностью. Это наиболее информативная часть МПЗ и единственная, которая может использоваться для СМК.

Четвёртая составляющая представляет собой регулярные и нерегулярные вариации МПЗ и рассматривается как помеха работе СМК по аномальному МПЗ. Величина вариаций может составлять от 10 до 100 % полезного сигнала, а в ряде случаев (магнитные бури) превосходит его на 1...2 порядка.

В качестве информативного параметра МПЗ в настоящее время используют ортогональные составляющие вектора индукции МПЗ или градиенты данных составляющих, которые можно использовать при синтезе векторного ИП. Но так как радиус корреляции данного ГФП может составлять от сотен метров до десятков километров, то потенциальная точность наведения ~0,5...5 км (3σ), в связи с чем данное ГФП является малоценным для наведения БЛА.

Заключение. Исследована задача проектирования СУ и НК БЛА различных классов, осуществляющих полёт по маршруту, с высокоточным выведением в заданную точку пространства. Представлен общий подход к разработке алгоритма управления СУ БЛА. Обоснован выбор ГФП для НК БЛА. Таким образом, показаны принципы формирования СУ и НК БЛА.

Библиографические ссылки

1. **Никулин А.С., Алексеев А.Н., Ангуладзе В.А., Селезнева М.С., Тенюшев Е.Н.** Начальная выставка инерциальных навигационных систем летательных аппаратов корабельного базирования // Прикладная физика и математика. 2018. № 1. С. 59—64.

2. **Никулин А.С., Алексеев А.Н., Ангуладзе В.А., Селезнева М.С., Тенюшев Е.Н.** Комплекс средств, обеспечивающих подготовку к вылету и посадку самолетов авианосного базирования // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 2. С. 36—49.

3. **Щербаков Ю.В.** Теория полета дирижаблей. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 80 с.

4. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Современные системы наведения и управления ракетами: учеб. пособие. М., МГОУ, 2012. 162 с.

5. **Бабиченко А.В., Пролетарская В.А., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами // Инженерная физика. 2018. № 5. С. 94—102.

6. **Селезнева М.С., Клычников В.В., Неусыпин К.А., Хэ Юн.** Исследование перспективных измерительных комплексов летательных аппаратов // Достижения вузовской науки. Труды Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 28—35.

7. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Разработка акцептора действия измерительного комплекса с использованием концепции динамического системного синтеза // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 2. С. 73—77.

8. **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.

9. **Сейдж Э.П., Уайт Ч.С.** Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.

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

11. **Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Пролетарский А.В., Шэнь К.** Алгоритм построения модели ИНС/ГНСС интегрированной навигационной системы с использованием критерия степени идентифицируемости // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: сб. материалов / под ред. В.Г. Пешехонова. 2018. С. 30—34.

12. **Селезнева М.С., Оглоблина Ю.С.** Построение самоорганизующейся модели с высокой степенью наблюдаемости // Научный взгляд. Труды Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 250—253.

13. **Фам С.Ф., Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Разработка компактного алгоритма самоорганизации // Наука сегодня: проблемы и пути решения: материалы Междунар. науч.-практич. конф. 2016. С. 64—65.

14. **Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—11.

15. **Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9—18.

16. **Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 428—432.

Ссылка для цитирования

Фам Суан Чыонг. Проектирование системы управления и навигационного комплекса беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 323—329.

УДК 004.942+621.38

Г.А. Саргсян, С.Ю. Сотникова, С.А. Субботин, А.В. Белый
(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва)
gsargsyan@hse.ru, sotnikova4548@mail.ru

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Предложен алгоритм метода обеспечения тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов — лазерных гироскопов для измерения угловой скорости летательных аппаратов, на которых они устанавливаются в системах инерциальной навигации. Метод решает одну из проблем, с которой сталкиваются разработчики бесплатформенных инерциальных навигационных систем — обеспечение заданной точности работы при высоких тепловых нагрузках, в том числе при внутренних тепловыделениях на электронных компонентах печатных узлов лазерных гироскопов. Применение разработанного метода при проектировании электронных навигационных приборов позволяет осуществить системный подход и повысить показатели надёжности и точности работы до требуемого уровня.

Ключевые слова: математическое моделирование; тепловые режимы; модель тепловых процессов; оптоэлектронные приборы; АСОНИКА.

The ensuring method algorithm of operation thermal modes for optoelectronic devices — laser gyroscopes for measuring the angular velocity of aircraft, on which they are placed in inertial navigation systems is proposed. The method solves one of the problems faced by the developers of inertial navigation systems without platform — ensuring the specified accuracy of operation at high thermal loads, including internal heat dissipation on electronic components of laser gyros printed nodes. The application of the developed method in the design of electronic navigation devices allows you to realize a systematic approach and improve the reliability and accuracy indices of the operation to the desired level.

Keywords: mathematical modeling; thermal conditions; thermal process model; optoelectronic devices; ASONIKA.

Введение. В настоящее время методы проектирования и конструирования оптоэлектронных приборов, в частности, лазерных гироскопов, применяемых в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС), активно развиваются благодаря новому программному обеспечению. Повышаются требования к их безотказной работе при установке на подвижных объектах, особенно в авиационной, ракетной и космической технике. Работоспособность БИНС обусловлена различными внешними и внутренними дестабилизирующими факторами. В данной работе основное внимание уделено исследованию влияния одного из распространённых воздействий на работоспособность БИНС, а именно теплового фактора.

Лазерный гироскоп является одним из важных оптоэлектронных приборов, входящих в БИНС. Он должен обладать высокой надёжностью, к нему предъявляются повышенные требования к прочности, устойчивости и стойкости к тепловым воздействиям [1]. Для достижения соответствия этим требованиям при проектировании лазерных гироскопов необходимо оценивать тепловые режимы каждого электронного компонента (ЭК) и проверять коэффициенты тепловых нагрузок, т. е. сравнивать температуру для каждого ЭК с максимально допустимой температурой на них, приведённой в технических условиях.

В статье предлагается метод обеспечения допустимых тепловых режимов работы ЭК лазерного гироскопа. Метод предполагает использование современных отечественных программ моделирования тепловых процессов в электронной аппаратуре, что демонстрируется на примере теплового моделирования лазерного гироскопа МТ-404МЭ.

Описание предлагаемого метода. Алгоритм предлагаемого метода обеспечения допустимых тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов БИНС представлен на рис. 1. Программный продукт, выбранный для моделирования тепловых процессов — автоматизированная система обеспечения надёжности

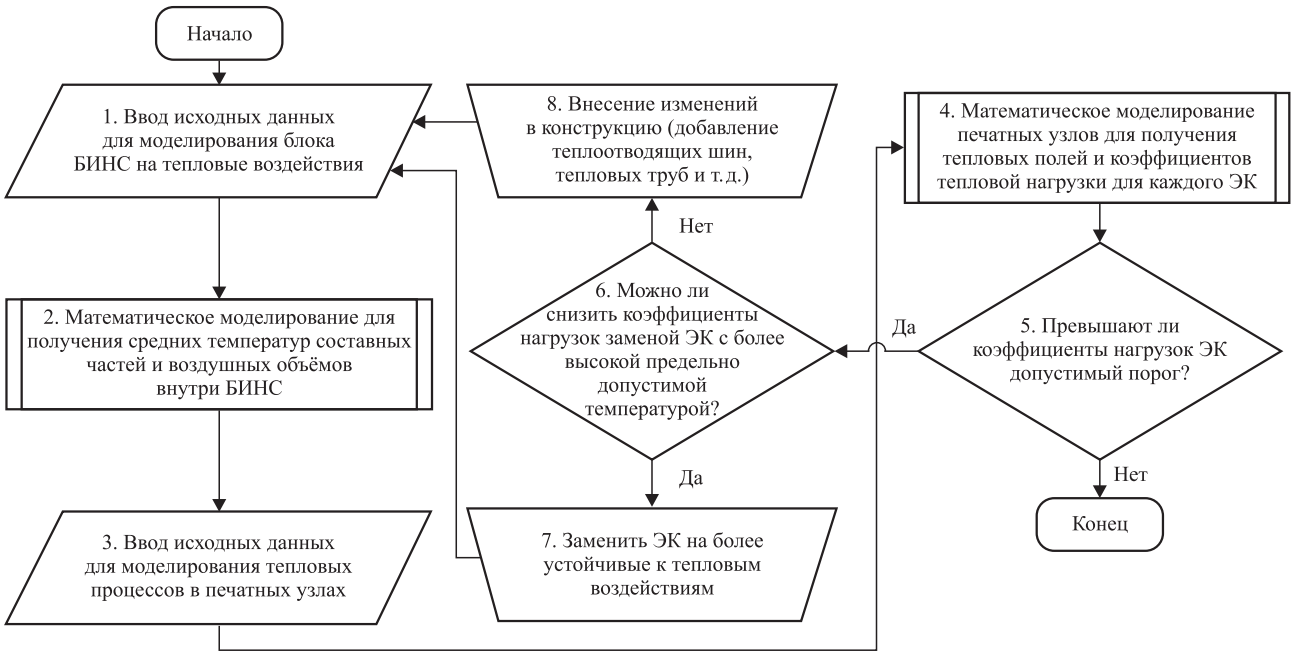


Рис. 1. Алгоритм метода обеспечения допустимых тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов бесплатформенных инерциальных навигационных систем

и качества аппаратуры (АСОНИКА). Система рекомендуется специальными руководящими документами Министерства обороны Российской Федерации [2]. Преимуществом системы АСОНИКА является наличие встроенных баз данных, которые содержат параметры ЭК и конструкционных материалов в соответствии с национальными стандартами.

Согласно предложенному методу моделирование выполняется в два этапа «сверху вниз». Первоначально исследуется конструкция БИНС для расчёта средних значений температуры всех элементов конструкции электронного блока (печатных узлов — ПУ, воздушных объёмов между ПУ и стенками блока). То есть первому этапу на рис. 1 соответствуют блоки 1 и 2. На втором этапе (блоки 3—8) отдельно рассматривается каждый печатный узел для получения его теплового поля и коэффициентов тепловой нагрузки на каждом ЭК (исходные данные для расчёта берутся из расчёта на первом этапе моделирования) [2, 3]. Коэффициент фактической тепловой нагрузки рассчитывается по формуле [4]

$$k_i^{\Phi} = T_i^{\Phi} / T_i^{\text{ТУ}};\ \ i = 1, \ldots, n, \qquad (1)$$

где T_i^{Φ} — температура i-го ЭК, которая определяется в результате расчёта в подсистеме АСОНИКА-ТМ; $T_i^{\text{ТУ}}$ — предельная допустимая температура ЭК, взятая из технических условий на него; n — количество ЭК.

Предельное значение коэффициента фактической тепловой нагрузки устанавливается главным конструктором по направлению и зависит от типа создаваемых приборов. В данной работе принято $k_i^{\Phi} \leqslant 0,8$.

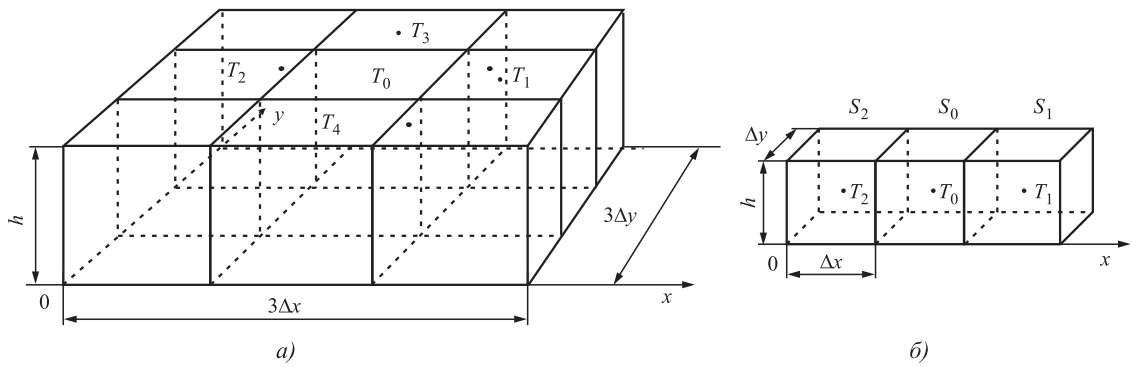
Необходимо отметить, что в подсистеме АСОНИКА-ТМ топологическая модель тепловых процессов для ПУ строится автоматически по предварительно введённому в подсистему чертежу ПУ. При вводе входной информации (см. блок 3 на рис. 1) задаётся количество шагов по осям координат. Таким образом, данная модель представляет собой двухмерную сетку из тепловых сопротивлений, построенную с использованием метода электротепловой аналогии.

Для примера рассмотрим дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье — Кирхгофа для решения стационарной задачи в применении к ПУ. Данное уравнение в декартовой системе имеет следующий вид [5, 6]:

$$\lambda \nabla^2 T + P_S = 0, \qquad (2)$$

где T — температура; λ — коэффициент теплопроводности материала изотропного твёрдого тела; $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа; P_s — мощность источников энергии за счёт тепловыделений ЭК, расположенных на ПУ.

Для того чтобы уравнение (2) представить в конечных разностях, нужно от непрерыв-



а) *б)*

Рис. 2. Условное разбиение печатного узла ортогональными плоскостями на элементарные объёмы (*а*) и пример выделенной совокупности элементарных объёмов вдоль оси *x* (*б*)

ного описания перейти к дискретному. Для наглядности последующих рассуждений разделим ПУ на 9 дискретных объёмов: $S_i = \Delta x \Delta y h$, $i = 1, ..., 9$ (рис. 2, *а*). Каждый объём является условно изотермическим, т. е. в каждой точке объёма температура одинаковая, включая те части ЭК, которые размещены на поверхности данного объёма. Толщина ПУ h имеет небольшое значение (обычно 1...2 мм) по сравнению с размерами печатной платы (длина $3\Delta x$ и ширина $3\Delta y$), поэтому ось z не будем рассматривать. В реальных задачах при делении платы на изотермические объёмы по оси x назначается от 10 до 20 шагов, по оси y назначается 8...15 шагов в зависимости от размеров печатной платы. ЭК учитываются только по своей массе в АСОНИКА-ТМ, если требуется провести нестационарный расчёт.

Рассмотрим совокупность объёмов по оси x. Для этого выделим объёмы S_0 и соседние — S_1, S_2 (рис. 2, *б*). Условно обозначим температуру этих объемов как T_0, T_1, T_2. В объёме S_0 содержатся внутренние источники энергии, учитывающие тепловыделения в установленных ЭК на верхней грани объёма. В расчёте принимаем, что тепловыделения равномерно распределены по объёму с удельной мощностью p_0.

После проведения ряда преобразований получим следующее выражение:

$$G_x (T_1 - 2T_0 + T_2) + G_y (T_3 - 2T_0 + T_4) + P_0 = 0, \quad (3)$$

где $G_x = \frac{\lambda h \Delta y}{\Delta x}$, $G_y = \frac{\lambda h \Delta x}{\Delta y}$ — тепловые проводимости между соседними элементарными объёмами ПУ по осям x и y соответственно, Вт/К; h — толщина печатной платы, являющаяся третьим размером объёма; $P_0 = p_0 h \Delta x \Delta y$ — тепловая мощность, которая рассеивается в элементарном объёме S_0 [5, 6].

Уравнение (3) является конечно-разностным и описывает теплообмен в элементарном объёме твёрдого тела ПУ [2, 5]. Для нашего примера таких уравнений будет 9 по количеству выделенных элементарных объёмов. В общем виде система уравнений типа (3) выглядит следующим образом:

$$G_i (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + G_j (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) + P_{i,j} = 0, \quad (4)$$

где $i = 1, ..., m$; $j = 1, ..., n$ — количество шагов разбиения по осям координат.

При моделировании решение данной системы уравнений (4) осуществляется в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

С помощью предложенного метода на этапе технического проектирования обеспечиваются значения коэффициентов тепловых нагрузок на каждом ЭК БИНС.

Применение метода обеспечения тепловых режимов работы оптоэлектронного прибора. Проиллюстрируем применение разработанного метода для уменьшения коэффициентов тепловых нагрузок на одном из печатных узлов оптоэлектронного прибора трёхосного лазерного гироскопа МТ-404МЭ. Данный гироскоп предназначен для использования в качестве датчика положения объекта в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Он широко применяется в навигационных системах средней точности для управления движением объектов установки. Лазерный гироскоп МТ-404МЭ разрабатывается на предприятии АО НИИ «Полюс», являющемся главным поставщиком лазерных гироскопов в стране.

Вид внутреннего устройства МТ-404МЭ показан на рис. 3. Корпус лазерного гироскопа выполнен из дюралюминия АК-94. В соответствии с техническим заданием (ТЗ) он должен

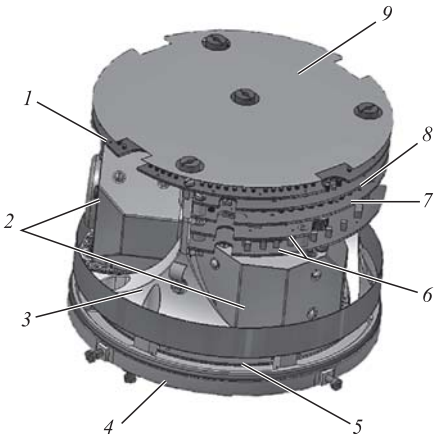


Рис. 3. Внутреннее устройство лазерного гироскопа МТ-404МЭ:
1 — цифровая плата; *2* — датчик ЭК-104С; *3* — крестовина МТ-404; *4* — основа блока вторичного источника питания; *5* — вторичный источник питания; *6* — блок питания; *7* — стабилизатор тока; *8* — система регулировки периметра; *9* — прокладка

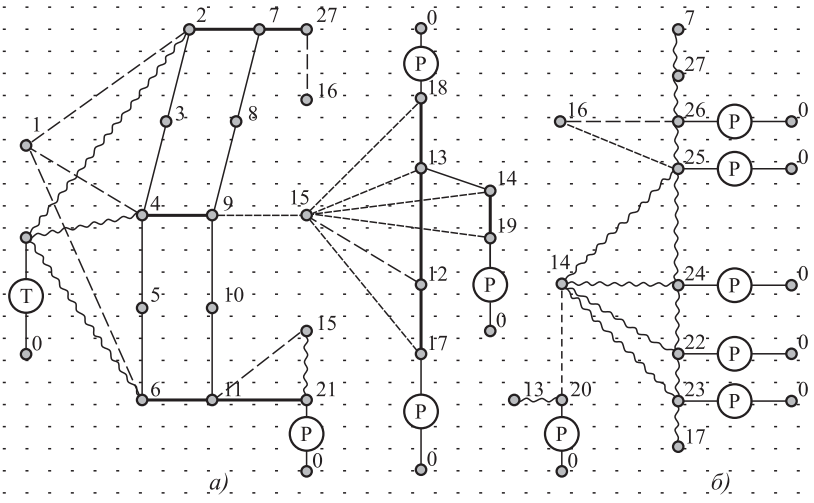


Рис. 4. Топологическая модель тепловых процессов лазерного гироскопа МТ-404МЭ

Таблица 1

Обозначение ветвей тепловых моделей

№ п/п	Тип ветви	Обозначение ветви в топологических моделях	Пояснение
1	2		Кондукция
2	16		Излучение
3	11		Контактный теплообмен
4	26		Естественная конвекция
5	27		Естественная конвекция с цилиндрической поверхности
6	111	T	Источник с заданной температурой, °С
7	101	P	Источник с заданной мощностью, Вт

работать при температуре окружающей среды от −40 до +60 °С. В блоке отсутствует принудительное охлаждение. В данном лазерном гироскопе между элементами конструкции происходят следующие тепловые процессы: лучистый, конвективный и кондуктивный теплообмены. При этом необходимо учитывать проводимость тепла через воздушные объёмы между печатными узлами и стенками блока [7].

Для теплового моделирования на первом этапе (см. рис. 1, блоки 1 и 2) были подготовлены следующие исходные данные: тепловые параметры материалов несущих конструкций (удельная теплопроводность и теплоёмкость), взятые из баз данных и технических условий; внутреннее тепловое сопротивление, тепловое сопротивление крепления и суммарная мощность тепловыделений всех ЭК отдельно для каждого ПУ [8].

После анализа конструктивных особенностей проекта МТ-404МЭ в подсистеме АСОНИКА-Т была построена топологическая модель тепловых процессов для блока (рис. 4). Описание ветвей приведено в табл. 1, а узлов модели — в табл. 2.

Топологическая модель для наглядности разделена на две части (рис. 4, *а* и *б*), при этом применён принцип расщепления узлов, т. е. ряд узлов дублируется, что разрешается подсистемой АСОНИКА-Т. В левой части модели (рис. 4, *а*) показано взаимодействие тепловых потоков между составными частями корпуса лазерного гироскопа, а именно между верхней и нижней крышками, верхним, средним и нижним кожухами и т. д. В правой части модели (рис. 4, *б*) представлены тепловые потоки между ПУ, находящимися внутри гироскопа, а также суммарная мощность каждого ПУ и т. д.

Результаты значений средней температуры печатных узлов и других блоков, представленные в табл. 2, являются граничными условиями для второго этапа моделирования, на котором исследуются тепловые процессы печатных узлов, входящих в БИНС.

Моделирование печатных узлов на втором этапе осуществляется в подсистеме АСОНИКА-ТМ, на котором выявляются ЭК, температура кото-

рых даёт превышение предельно допустимого значения коэффициента тепловой нагрузки.

Для теплового моделирования на втором этапе (см. рис. 1, блоки 3...8) были подготовлены исходные данные, полученные при моделировании на первом этапе: тепловые параметры материалов печатной платы и её геометрические параметры с учётом всех ЭК; мощность тепловыделений в каждом ЭК; средняя температура окружающих стенок, печатных узлов и воздушных объёмов, которые окружают исследуемый ПУ.

Для демонстрации второго этапа моделирования с применением подсистемы

Таблица 2

Средняя температура составных частей и воздушных объёмов лазерного гироскопа МТ-404МЭ

Номер узла	Наименование узла	Температура, °С
1	Окружающая среда (ОС)	60,0
2	Крышка корпуса (верхняя часть)	69,8
3	Крышка корпуса (нижняя часть)	69,7
4	Внешняя стенка	69,6
5	Прокладка (верхняя)	69,8
6	Внутренняя стенка	69,9
7	Кожух (верхняя часть)	69,8
8	Кожух (средняя часть)	69,8
9	Кожух (нижняя часть)	69,7
10	Внутренний экран вторичного источника питания (ВИП)	69,8
11	Основа блока ВИП	70,0
12	Основание каркаса	78,5
13	Длинный каркас	78,5
14	Короткий каркас	78,6
15	Воздух (основа блока ВИП — основание каркаса)	72,8
16	Воздух (верхняя крышка — ПЦ)	79,1
17	Датчик ЭК104-С (1)	78,5
18	Датчик ЭК104-С (2)	78,5
19	Датчик ЭК104-С (3)	78,6
20	Печатный узел БЧП (блок частотной подставки)	93,5
21	Печатный узел ВИП (вторичный источник питания)	71,5
22	БП (блок питания лазера 1)	78,9
23	БП (блок питания лазера 2)	79,1
24	Печатный узел СТ-ММ (стабилизатор)	80,9
25	Печатный узел СРП (система регулировки периметра)	91,6
26	Печатный узел ПЦ-МТ404 (обработка сигналов)	83,8
27	Прокладка	70,0

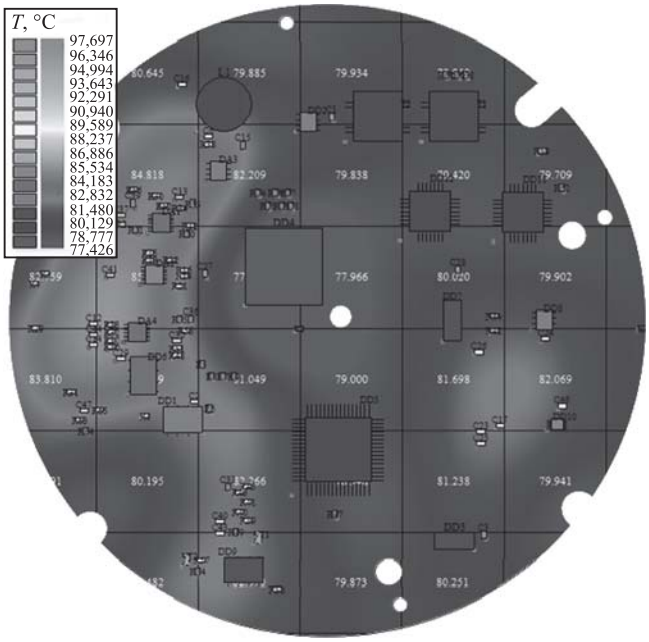


Рис. 5. Тепловое поле исследуемого печатного узла в результате его моделирования в подсистеме АСОНИКА-ТМ

АСОНИКА-ТМ и актуальности предлагаемого метода был выбран один из печатных узлов лазерного гироскопа — ПЦ-МТ404. Данный печатный узел принимает сигналы с датчиков, обрабатывает их, преобразует в цифровой вид и отправляет на приёмник. Он является наиболее интересным для моделирования из-за большого количества установленных на нём ЭК.

В результате моделирования были получены следующие результаты: температурное поле (рис. 5) и часть карты тепловых режимов печатного узла ПЦ-МТ404 (табл. 3). Отметим, что в карту помещены результаты моделирования только наиболее теплонагруженных ЭК.

Анализ полученных результатов (см. табл. 3) показывает, что у ЭК DD10, DD2, DD8, DA3 оказались нарушенными условия коэффициентов фактической тепловой нагрузки, т. е. коэффициенты превышают предельно допустимую отметку 0,8.

Согласно методу в таких случаях, когда отмечаются превышения назначенного по ТЗ коэффициента тепловой нагрузки (см. рис. 1, блок 5), нужно перейти к следующему блоку 6. Как видно из проверки, блок 6 (см. рис. 1) имеет два выхода, а именно на блок 7 и блок 8. Так как приведённые ЭК (см. табл. 3) являются микросхемами, то было принято решение уменьшить коэффициенты тепловых нагрузок, используя рекомендации блока 7 (см. рис. 1). Для обеспечения коэффициента тепловых нагрузок для элемента DD10 было ре-

Таблица 3

Карта тепловых режимов работы электронных компонентов при стационарном тепловом воздействии

№ п/п	Обозначение ЭК	Температура ЭК		Коэффициент тепловой нагрузки ЭК	Превышение максимальной допустимой температуры ЭК с учётом запаса
		расчётная, °С	максимальная допустимая по ТУ, °С		
1	DD10	70,88	85	0,83	Есть превышение
2	DD2	69,44	85	0,82	Есть превышение
3	DD8	69,43	85	0,82	Есть превышение
4	DA3	69,03	85	0,81	Есть превышение

Таблица 4

Карта тепловых режимов работы ЭК при стационарном тепловом воздействии (после внесения корректив)

№ п/п	Обозначение ЭК	Температура ЭК		Коэффициент тепловой нагрузки ЭК	Превышение максимальной допустимой температуры ЭК с учётом запаса
		расчётная, °С	максимальная допустимая по ТУ, °С		
1	DD10	66,31	85	0,78	Нет превышения
2	DD2	63,27	85	0,74	Нет превышения
3	DD8	63,22	85	0,74	Нет превышения
4	DA3	63,20	85	0,74	Нет превышения

шено использовать элемент Пельтье, принцип действия которого базируется на возникновении разности температур при протекании электрического тока. Для трёх ЭК (DD2, DD8, DA3) при их установке было решено применить термопасту с более высокими теплопроводящими характеристиками.

Данные изменения были учтены в модели тепловых процессов. Повторное моделирование с помощью подсистемы АСОНИКА-ТМ показало, что введённые конструктивные изменения позволили обеспечить уменьшение коэффициентов тепловой нагрузки на тех же ЭК ниже 0,8. Окончательные результаты моделирования представлены в табл. 4.

Заключение. Предложенный метод позволяет проводить анализ рабочих температурных режимов оптоэлектронных приборов, в частности, лазерных гироскопов и их составляющих: блоков и печатных узлов, входящих в БИНС. Как показал рассмотренный пример, данный метод позволяет на ранних этапах проектирования получить температуру каждого электронного компонента, входящего в оптоэлектронные приборы. Сравнение с предельно допустимыми температурами для этих электронных компонентов позволяет выявить тепловые перегрузки, и на начальных этапах проектирования внести изменения в схемы и конструкции БИНС.

Разработанный метод обеспечен известным программным комплексом АСОНИКА. Он может быть реализован также с другими программами теплового моделирования оптоэлектронных приборов. Метод отличается своей простотой и может быть применён для достижения высокой стойкости БИНС к повышенным тепловым воздействиям.

Библиографические ссылки

1. **Чернов В.Ю., Никитин В.Г., Иванов Ю.П.** Надёжность авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2004. 96 с.

2. **Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Увайсов С.У.** и др. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

3. **Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Y., Lemanskiy D.A.** Method of computer modelling accuracy increase for electronic means based on interconnection of different physical processes proceeding / Innovative Information Technologies: materials of the International scientific—practical conference. Part 2. Ed. by S.U. Uvaysov. M.: HSE, 2014. P. 616—620.

4. **Кофанов Ю.Н.** Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1991. 360 с.

5. **Шалумов М.А.** Разработка автоматизированной подсистемы моделирования тепловых процессов в радиоэлектронных средствах произвольной конструкции: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2014. 171 с.

6. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Энергия, 1972. 316 с.

7. **Дульнев Г.А., Сигалов А.В.** Поэтапное моделирование теплового режима сложных систем // Инж.-физ. журн. 1983. Т. 45. № 4. С. 651—656.

8. **Кофанов Ю.Н.** Автоматизированная система АСОНИКА в проектировании радиоэлектронных средств. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012. 58 с.

Ссылка для цитирования

Саргсян Г.А., Сотникова С.Ю., Субботин С.А., Белый А.В. Метод обеспечения тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 330—336.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина

Издание 6-е, переработанное и дополненное 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизикохимическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ
по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

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 24.04.2019.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 18.06.2019.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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