

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Булдакова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НППАП
им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)
Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

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

Адрес редакции:

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 75

9
2021

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

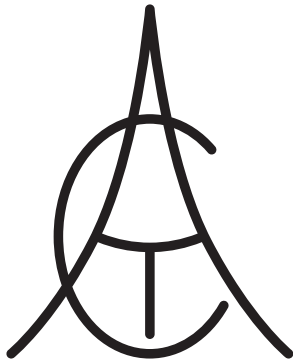
- Волобуев С.В., Рябцев В.Г.** Автоматизированное проектирование средств самотестирования модулей памяти 387
- Коваленко О.Ю., Мартынова Е.М., Микаева С.А., Журавлева Ю.А.** Макетный образец лампы на основе светодиодной матрицы 391
- Боровлев А.О., Скрипников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В.** Условия зрительной плавности пространственных кривых при автоматизированном проектировании лесовозных автомобильных дорог 395
- Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С.** Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента 398
- Шалумов А.С., Шалумова Н.А., Шалумов М.А.** Цифровой двойник авиационной электроники: моделирование физических процессов при формировании электронной модели 403

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Галактионов М.В., Николаев С.В.** Построение области возможных атак воздушной цели при различных методах наведения на воздушную цель 416
- Найнг М.Т., Гаврилов А.И., Ньян Л.Т., Кхант К.З., Ньи Н.Х.** Система распознавания лиц на основе метода глубокого обучения при слабой освещённости 421

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

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

EDITORIAL COUNCIL:

- Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MIREA—RTU
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI
Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie»
Publishers» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative
Mashinostroenie» Publishers»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician of RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China
Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 75 $\frac{9}{2021}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Volobuev S.V., Ryabtsev V.G.** Automated design of self-testing
means of memory modules 387
- Kovalenko O.Yu., Martynova E.M., Mikaeva S.A., Zhuravleva Yu.A.**
Dummy lamp based on LED matrix 391
- Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Bryukho-
vetskiy A.N., Nikitin V.V.** Conditions for visual smoothness of
spatial curves in the automated design of logging highways . . . 395
- Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M., Shatagin D.A., Anosov M.S.**
Neural network modeling of the wear process of a carbide
cutting tool 398
- Shalumov A.S., Shalumova N.A., Shalumov M.A.** Aviation elec-
tronics digital twin: simulation of physical processes in the forma-
tion of an electronic model 403

MODERN TECHNOLOGIES

- Galaktionov M.V., Nikolaev S.V.** Building the area of possible
attacks of an air target with various methods of aiming at an air
target 416
- Naying M.T., Gavrillov A.I., Nyan L.T., Khant K.Z., Nyi N.Kh.**
Face recognition system method-based low light deep learning . . . 421

EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

- Morgunov A.V., Astrakov K.S.** Evaluation of the effectiveness of
the information system for document management of a scientific
and educational institution 427



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

sergey-aspir14@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ САМОТЕСТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ ПАМЯТИ

Раскрыты особенности маршрута автоматизированного проектирования, который определяет этапы проектных процедур, используемых на всех стадиях разработки, начиная от выработки и формализации идеи до тестирования готовых образцов. При проектировании средств самотестирования модулей памяти используются библиотеки логических элементов, которые адаптируются со схематическим представлением компонентов. Результаты прототипного проектирования с реализацией проекта на ПЛИС позволяют проверить правильность проектных решений по составу и структуре, которые можно в будущем реализовать в готовом приложении высокого класса в виде большой интегральной микросхемы.

Ключевые слова: верификация проекта; моделирование; модели логических элементов; модули памяти; программируемая логическая схема; средства самотестирования.

In the article the features of the CAD route are disclosed. Computer-aided design defines the stages of design procedures used at all stages of development: from developing and formalizing an idea to testing finished samples. Logic element libraries are used to design self-test memory modules that adapt to the schematic representation of components. The results of prototype design with the implementation of the project on programmable logic device (PLD) allow you to check correctness of design decisions, such as composition and structure, which can be implemented in the future in high-end finished application in a large integrated microcircuit

Keywords: project verification; modeling; models of logical elements; memory modules; programmable logic circuit; self-testing means.

Введение. Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) широко используются в цифровых системах и имеют регулярную структуру, что делает их наиболее плотно упакованными устройствами среди всех типов сверхбольших интегральных схем (СБИС). Развитие технологии СБИС приводит к постоянному увеличению плотности микросхем памяти, что создаёт большие проблемы при тестировании памяти. По мере того как размеры элементов уменьшаются, чувствительность к отказам увеличивается, а сбои становятся более частыми. Кроме того, время тестирования увеличивается, по крайней мере, линейно с увеличением числа элементов памяти на кристалле.

В процессе эксплуатации необходимо с высокой достоверностью определить место неисправностей в цифровых системах и приборах, целевое назначение которых может быть представлено как функциональная зависимость между входами, выходами и параметрами компонентов [1]. Встроенные средства самотестирования (BIST, Built-in Self-Test) могут решить указанные выше проблемы тестирования па-

мяти. Тестовые шаблоны, генерируемые контроллером BIST, обычно относятся к алгоритмам семейства марш и обеспечивают высокое покрытие отказов с меньшим числом тестовых шаблонов [2]. В современной конструкции технологии высокоскоростной и крупномасштабной интеграции (VLSI) средства встроенного самотестирования становятся наиболее важной частью технологии систем на кристалле (SoC, System on Chip). Потребность в самотестировании увеличивается пропорционально объёму памяти в SoC. Встроенная память обычно занимает большую часть площади кристалла SoC. Именно из-за увеличения плотности встроенной памяти в конструкции SoC необходим механизм самотестирования [3, 4].

Размещение средств самотестирования, встроенных непосредственно в состав микросхем памяти, требует существенного изменения технологии изготовления и увеличения площадей кристаллов. Механизмы BIST могут быть сконфигурированы для параллельного тестирования микросхем памяти, размещённых в модуле памяти, при этом компоненты

средств самотестирования можно конструктивно выполнить в виде программируемой логической схемы (ПЛИС) или в виде заказной интегральной схемы (ASIC).

Постановка задачи. Целью данной работы является имплементация средств самотестирования модулей памяти в ПЛИС семейства Spartan3e для выполнения прототипного проектирования и проверки принципиальных проектных решений по составу и структуре, которые можно в будущем реализовать в готовом приложении высокого класса в виде большой интегральной микросхемы при снижении затрат на её разработку.

Архитектура средств самотестирования модулей памяти. Структурная схема средств самотестирования модулей памяти приведена на рис. 1 [5, 6].

Средства самотестирования содержат счётчик (Counter) команд и микроопераций, память инструкций (Instruction Memory), контроллер (Controller), генератор управления рабочими операциями (Control Generator), генератор кодов адреса (Address Generator), генератор кодов данных (Data Generator), компаратор данных (Data Comparator) и мультиплексоры (Multiplexers). Тестируемая память (Memory) в состав средств самотестирования не входит, поэтому на рис. 1 она показана пунктиром.

Выбраны два формата команд и микроопераций памяти инструкций (Instruction Memory), которые приведены в таблице [7]. Поля 3—0 предназначены для кодирования команд COP. Коды mW, mR, mC предназначены для задания рабочих операций записи, считывания и сравнения данных соответственно.

Поля 9—7 предназначены для кодирования микроопераций формирования кода адреса.

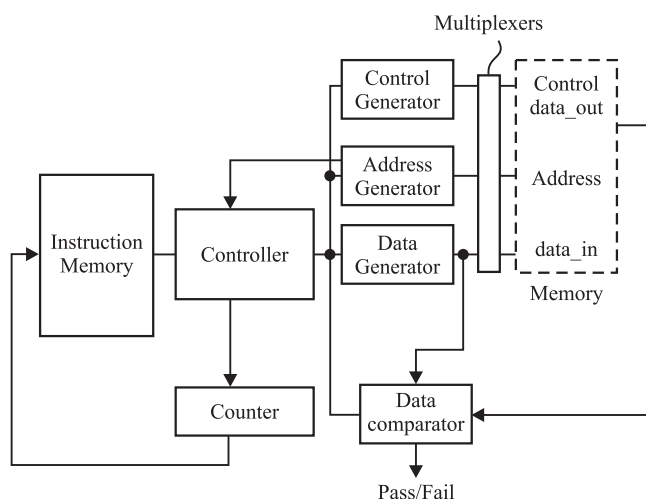


Рис. 1. Структурная схема средств самотестирования модулей памяти

Форматы команд и микроопераций памяти инструкций

Формат рабочих операций																			
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Адрес перехода								MOD	MOA	mC	mR	mW	COP						
Формат занесения данных																			
Код начального или конечного адреса										COP									

Поля 11, 10 применяются для кодирования кода данных. Поля 19—12 предназначены для задания адреса перехода при выполнении команд условного и безусловного переходов. Формат занесения данных становится активным при выборе команд STGA и STNA, задающих начальный и конечный адреса тестируемой памяти, при этом микрооперации остальных полей команды блокируются. Счётчик (Counter) адреса команд и микроопераций, память инструкций (Instruction Memory) и контроллер (Controller) формируют программу теста, который выполняется при самотестировании.

Методика проектирования. Архитектура средств самотестирования модулей памяти разработана на языке описания аппаратного обеспечения VHDL. При имплементации средств самотестирования модулей памяти в ПЛИС при помощи Навигатора проектов фирмы Xilinx потребовалось дополнить проект моделями таких логических элементов: BUF16, BUF8, COMP16, D4_16E, FD16CE, FDSCE, INV16, INV8, M2_1, M4_1E, M8_1E. Особые проблемы вызвала разработка модели 8-разрядного счётчика CC8CLE, который может увеличивать своё содержимое на единицу или параллельно заносить код, поступающий на его входы. Существующая модель, считанная из [8], оказалась с ошибками. Для того чтобы к вектору добавить единицу, нужно сначала данный вектор преобразовать в целое число, затем прибавить к нему единицу, а полученный результат снова преобразовать в вектор, т. е. выполнить следующие преобразования:

$$Q < = \text{int2std}(\text{std2int}(Q) + 1, 8).$$

Однако при компиляции проекта Навигатор проектов выдал сообщение

```
int2std has two possible
definitions in this scope
(int2std имеет два возможных
определения в данной области).
```

Для получения корректной модели была применена новая библиотека `ieee.numeric_std.all` и выполнены преобразования

```
Q <= std_logic_vector(to_unsigned(Q, 8)).
```

Модели всех компонентов средств самотестирования модулей памяти, соединённые согласно структурной схеме, были скомпилированы в файл `Schema.vhd`, с которым были выполнены процедуры имплементации в ПЛИС XC3S500E семейства Spartan3e, приведённые на рис. 2.

Процесс выбора краевых контактов ПЛИС XC3S500E показан на рис. 3. При размещении входов/выходов средств самотестирования на краевые разъёмы ПЛИС было получено следующее сообщение Навигатора проектов:

A clock IOB/clock component pair
have been found that are not placed
at an optimal clock IOB

(Пара тактовых IOB/тактовых компонентов не находится в оптимальном тактовом IOB).

Для устранения данного недостатка был изменён номер входа ПЛИС, на который подаётся синхронизирующий сигнал CLK.

На входы средств самотестирования поступают синхросигнал CLK, сигнал сброса RST, сигнал начала самотестирования ST и выходные данные тестируемой микросхемы Mem(7:0). На выходы средств самотестирования передаются синхросигнал CLK2, одиночный импульс OU, коды операций записи mW, считывания mR и сравнения данных mC, код адреса текущей команды ACom_O(7:0), код адреса Addr(7:0), код данных DataO(7:0) и код обнаруженных отказавших разрядов данных Error(7:0).

Счётчик (Counter) адреса команд позволяет выбрать 256 ячеек микропрограммной памяти, что достаточно для хранения кодов программы самого сложного теста. В качестве теста для выполнения самотестирования модулей памяти выбран тест `march_C`, программа которого записана в память инструкций (Instruction Memory), которая выполнена в виде постоянного запоминающего устройства. Генератор кодов адреса (Address Generator) содержит 16 разрядов, что позволяет выбрать 65 536 ячеек памяти. Если применить двухкоординатную систему адресации и два формирователя кодов адреса X и Y, то можно обеспечить самотестирование микросхем памяти ёмкостью до 4 Гбит.

Сообщение, приведённое на рис. 4, свидетельствует об успешном

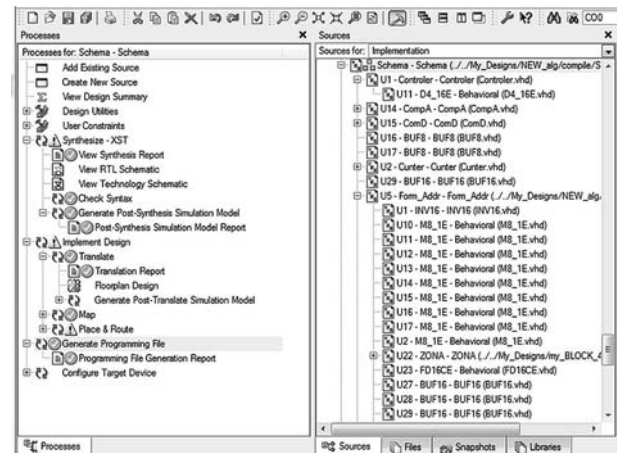


Рис. 2. Процедуры имплементации проекта в ПЛИС семейства Spartan3e

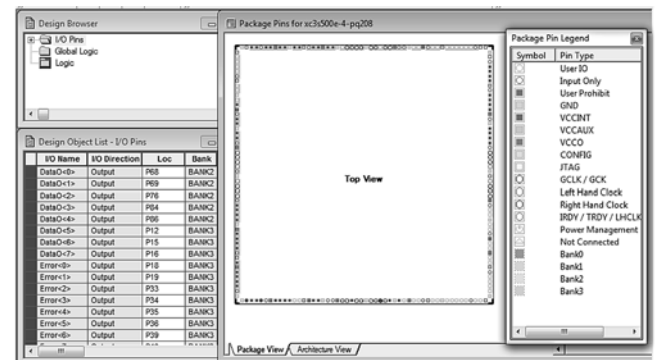


Рис. 3. Процесс выбора краевых контактов ПЛИС XC3S500E

выполнении процедур имплементации проекта и завершении процесса программирования ПЛИС.

Результаты проектирования и их обсуждение. При помощи Навигатора проектов фирмы Xilinx получены следующие параметры средств самотестирования модулей памяти, имплементированных в ПЛИС XC3S500E, число входов/выходов: 56 из 158 (35 %); число синхросигналов GCLKs: 1 из 24 (4 %); минимальный период: 15,28 нс (максимальная частота: 65,445 МГц);

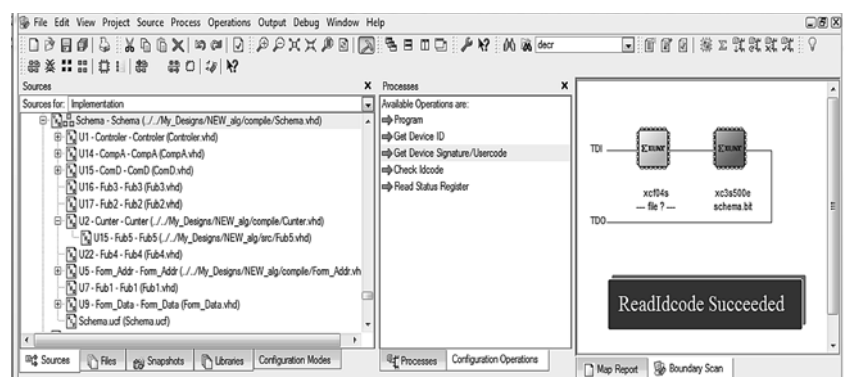


Рис. 4. Сообщение о завершении процесса программирования ПЛИС

потребляемая мощность: 159 мВт; ёмкость памяти конфигурации проекта: 188 МБ.

В среде Active-HDL выполнено моделирование средств самотестирования модулей памяти. Результаты верификации модели средств самотестирования при увеличении кода адреса приведены на рис. 5.

Для упрощения процедуры верификации выбрано число ячеек тестируемой памяти, равное 8. По команде, адрес которой равен 04h, вначале во все ячейки записывается код нуля, затем происходят считывание данных, сравнение с эталонными данными и запись инверсных данных.

Результаты верификации модели средств самотестирования при уменьшении кода адреса приведены на рис. 6.

Применение средств самотестирования и саморемонта позволяет спроектировать архитектуру отказоустойчивого ОЗУ, восстановление работоспособности которого обеспечивается за счёт реконфигурации структуры, которая выполняется при возникновении одиночных или многократных отказов ОЗУ в системах управления критического применения [9, 10].

Выводы. Встроенное самотестирование является методом применения дополнительных аппаратных и программных средств, которые могут выполнять самотестирование, используя собственные компоненты для уменьшения зависимости от дорогостоящего внешнего тестового оборудования. Реализация встроенного самотестирования значительно снижает стоимость и повышает вероятность обнаружения неисправностей, так как диагностирование производится на рабочих частотах и не требуется дорогостоящего внешнего тестового оборудования.

Успешное выполнение всех процедур имплементации рассматриваемого проекта позволило разработать и изготовить средства самотестирования модулей памяти в интегральном исполнении на ПЛИС XC3S500E семейства Spartan3e. Выбор более быстродействующей ПЛИС, например Virtex-7, и усовершенствование структуры позволят получить более высокое быстродействие средств самотестирования. Полученные результаты можно использовать при разработке большой интегральной микросхемы, при этом затраты на её разработку снижаются.

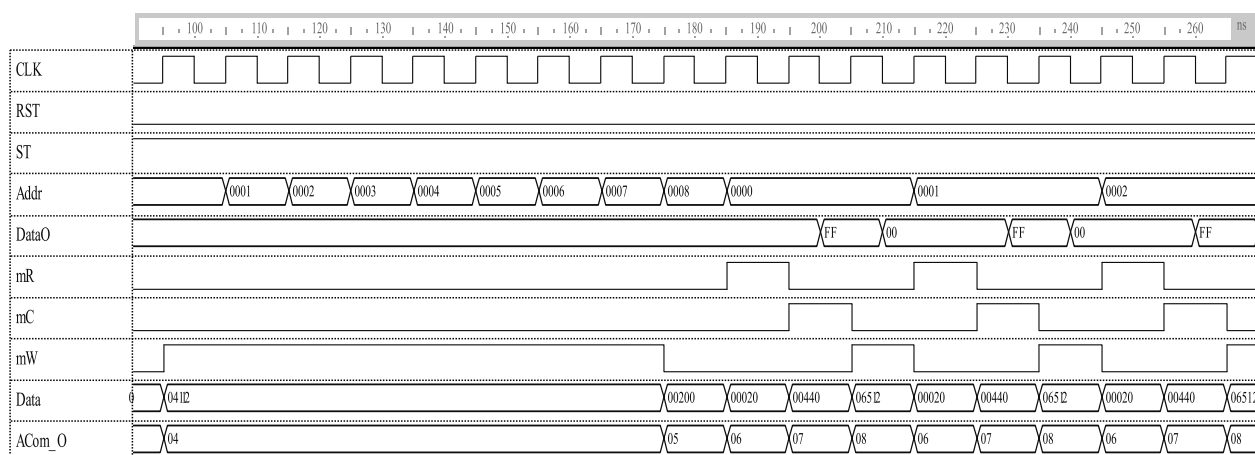


Рис. 5. Результаты моделирования при увеличении кода адреса

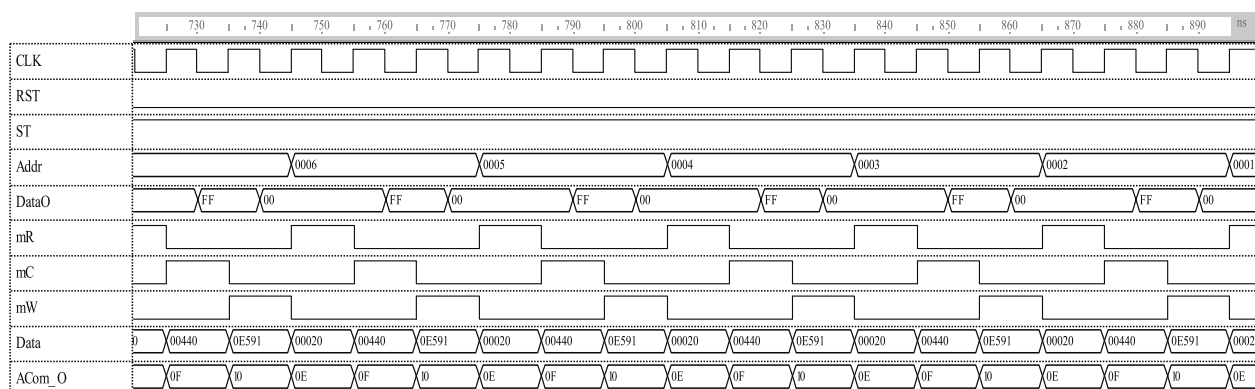


Рис. 6. Результаты моделирования при уменьшении кода адреса

Библиографические ссылки

1. **Шибанов Г.П.** Диагностика неисправностей приборного оборудования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 282—287.
2. **Aswin A.M., Ganesh S. Sankar.** Implementation and Validation of Memory Built in Self Test (MBIST) — Survey // Intern. J. of Mechanical Engineering and Technology. 2019. No. 10 (3). P. 153—160.
3. **Ryabtsev V.G., Volobuev S.V.** Implementation of Memory in a System on a Chip with Built-In Self-Testing and Self-Healing // Russian Microelectronics. 2020. Vol. 49. No. 7. P. 527—531.
4. **Волобуев С.В., Рябцев В.Г.** Имплементация памяти в систему на кристалле со встроенными средствами самотестирования и восстановления // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 3. С. 239—247.
5. **Евдокимов А.П., Рябцев В.Г., Меликов А.В.** Принципы проектирования устройств тестового диагностирования быстродействующих микросхем и модулей полупроводниковой памяти // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем: сб. трудов / под общ. ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. Вып. II. М.: ИППМ РАН, 2018. С. 23—30.
6. **Ryabtsev V., Evseev K., Almadi M.** The Concept of Memory Device Diagnosis Algorithm Design // J. of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). Vol. 3. Iss. 10, October. 2016. P. 5771—5774.
7. **Волобуев С.В., Рябцев В.Г.** Архитектура встроенных средств самотестирования микросхем памяти статического типа // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2019. Вып. 3 (175). С. 15—20.
8. **Libraries** Guide reliability [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://techwww.in.tu-clausthal.de/site/Dokumentation/Software/ISE/Xilinx_Library_Guide_ISE5.pdf (дата обращения: 21.04.2021).
9. **Волобуев С.В., Евдокимов А.П., Рябцев В.Г.** Принципы проектирования отказоустойчивых оперативных запоминающих устройств для космического применения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем: сб. трудов / под общ. ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. Вып. II. М.: ИППМ РАН, 2020. С. 103—109.
10. **Ryabtsev V.G., Volobuev S.V., Shubovich A.A.** Fault-tolerant Architecture of Storage device for on-board spacecraft control systems // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No. 1. P. 106—112.

Ссылка для цитирования

Волобуев С.В., Рябцев В.Г. Автоматизированное проектирование средств самотестирования модулей памяти // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 387—391. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-387-391.

УДК 628.9:621.382.2

О.Ю. Коваленко, д-р техн. наук, проф.

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск),

Е.М. Мартынова, С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **Ю.А. Журавлева**, канд. техн. наук, доц.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ЛАМПЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНОЙ МАТРИЦЫ

Статья посвящена разработке лампы на основе светодиодной матрицы с изменяющимися цветностью и уровнем освещённости. Лампа предложенной конструкции может быть использована в качестве декоративного освещения для жилых зданий.

Ключевые слова: светодиод; светодиодная матрица; лампа; цветность; световой эффект; сенсорная кнопка; оптическое излучение.

The article is devoted to the development of a lamp based on an LED matrix with varying chromaticity and illumination level. The lamp of the proposed design can be used as decorative lighting for residential buildings.

Keywords: LED; LED matrix; lamp; chromaticity; light effect; touch button; optical radiation.

Современный уровень развития светодиодной светотехники — предпосылка для создания новых условий освещения, в том числе бытового. Наряду с требованиями потребителя к комфортности освещения проявляется запрос на освещение с определённой цветовой доминантой. Наиболее перспективным в развитии этого направления представляется создание светодиодных ламп с различными световыми эффек-

тами. В области создания световых эффектов авторами проводились работы в направлении разработки осветительных устройств из отдельных цветных светодиодов. При этом для создания режимов освещения с заданными значениями координат цветности применялись методы математического моделирования [1—7]. В связи с тенденцией снижения затрат на потребление электроэнергии и минимизации затрат на ма-

териалы при изготовлении источников света и световых приборов перспективным направлением является создание многокомпонентных источников света и приборов на их основе, обеспечивающих управление цветностью [8, 9].

Цель настоящей работы — создание лампы с различными световыми эффектами на основе светодиодной матрицы. Светодиодная матрица — это совокупность светодиодов с одинаковыми или разными длинами волн, питаемых вместе или поодиночке. Такой тип излучателя — мощный источник для миниатюрных оптических анализаторов.

Для решения поставленной задачи была разработана конструкция светодиодной лампы с различными световыми эффектами. Использовались следующие основные компоненты: адресная светодиодная матрица WS2812b 16×16 LED, Arduino Nano, сенсорная кнопка TTP223, блок питания 5 В, 2А. Сенсорная кнопка позволяет переключать режимы работы лампы:

- 1) одно касание — включение/выключение лампы;
- 2) два касания — переключение на следующий режим;
- 3) три касания — возвращение к предыдущему режиму;
- 4) удержание — увеличение/уменьшение яркости.

Основанием для лампы служат сантехническая труба диаметром 50 мм и часть трубы диаметром 40 мм, для изготовления макетного образца использован матовый плафон от обычного светильника. Для изготовления основания лампы использована труба диаметром 50 мм, разрезанная таким образом, чтобы её длина равнялась длине светодиодной матрицы, отложенной от начала трубы.

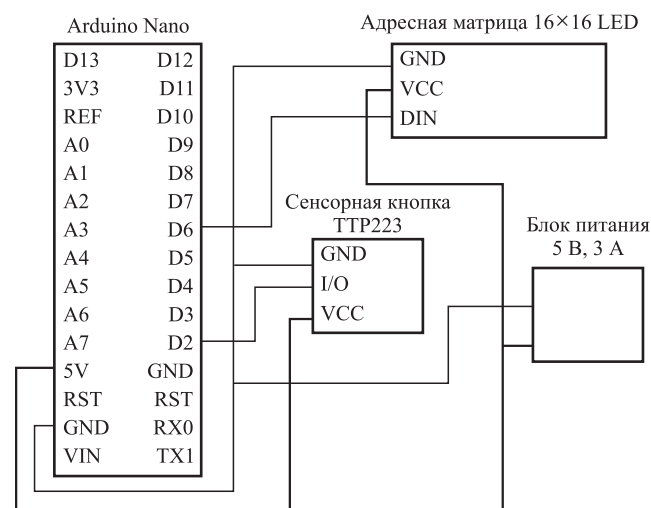


Рис. 1. Схема работы осветительного устройства

Принципиальная схема работы осветительного устройства приведена на рис. 1.

Характеристики светодиодной матрицы

Чип (IC)	WS2812b
Напряжение, В	5
Мощность, Вт	50
Число диодов	256
Яркость, лм	4600
Цвет	RGB
Тип светодиода	5050
Подложка	Гибкая
Герметичность	ip33 (не герметичная)
Страна-производитель	Китай

Светодиодные матрицы изготавливаются на специальной теплопроводящей подложке, обладающей изоляционными свойствами. В некоторых моделях применяются драйверы, влияющие на стабилизацию напряжения питания и нагрев осветительного прибора. Множество простых светодиодов, из которых состоит матрица, может соединяться параллельно или последовательно. При параллельном соединении потребление входного напряжения ниже, а световая эффективность выше, чем при последовательном. Мощные светодиодные матрицы представляют собой сборки из нескольких кристаллов в одном блоке. Специальное пластиковое основание позволяет устанавливать оптику для эффективного рассеяния света. Стандартными и наиболее распространёнными считаются мощные светодиодные матрицы — мощностью 10 Вт.

Матрица, использованная для изготовления лампы, представляет собой квадрат: 16 на 16 диодов размером 160 × 160 мм. Данную матрицу можно использовать, если требуется создать необычный световой эффект, инсталляцию, эквалайзер, бегущую строку или, например, диодный экран. Матрицы можно легко разрезать и соединять в цепь в соответствии с указателями, находящимися в паспорте прибора. В качестве подложки используется алюминий, позволяющий сгибать её под углом до 90°, сохраняя работоспособность матрицы. Чипы WS2812b, используемые в этой матрице, встроены в корпус SMD5050 и управляют каждым диодом по отдельности. Они совместимы с большинством SPI-контроллеров, и их можно подключить к плате Arduino. В составе каждого Нео-пикселя светодиода типа WS2812b есть

свой собственный встроенный контроллер 5050. Он позволяет управлять отдельно каждым светодиодом в матрице. Размер такой матрицы 16 × 16 см. Соединяя их последовательно, можно собирать длинные ленты, на которых можно делать бегущие строки или большие экраны, например для показа рекламы.

Рабочая температура матрицы от –25 до +80 °С. При температуре ниже –25 °С лента может плохо работать или вообще не выполнять команды контроллера. Однако изменения в работе матрицы при её переохлаждении не фатальны. При повышении температуры, диоды продолжают полноценно работать.

На задней панели светодиодной матрицы расположено восемь проводов, шесть из которых — это питание, а два — вход DIN и выход DOUT. Светодиоды потребляют большой ток, и если оставить всего два провода питания в начале ленты, то в её конце может быть большая просадка по напряжению или большой ток может просто пережечь тонкие токопроводящие дорожки на блоках светодиодов в матрице. Например, в режиме белого цвета ток доходит до 60 мА. Белый цвет получается смешением трёх цветов: красного, зелёного и голубого. Для получения каждого из них в среднем потребляется по 20 мА, а каждые десять светодиодов потребляют ток 0,5 А. Лишние провода при необходимости можно отпаять, оставив лишь набор из трёх (GND, VCC, DIN).

Основные детали предложенного варианта лампы: светодиодная матрица, блок питания, Arduino Nano и сенсорная кнопка соединены в соответствии со схемой работы осветительного устройства, приведённой на рис. 1.

Сенсорная кнопка установлена под заглушку трубы наверху лампы, все провода и Arduino Nano «спрятаны» внутрь трубы, и сверху прикреплён матовый плафон от обычной настольной лампы.

Для создания световых эффектов и для работы лампы в целом написан код на Arduino и прошит в Arduino Nano.

Платформа Nano построена на базе микроконтроллера ATmega328 (Arduino Nano 3.0). Питание Arduino Nano осуществляется от регулируемого внешнего источника питания, напряжение питания 5 В. Микроконтроллер ATmega328 имеет 32 кБ памяти, ATmega328 — 2 кБ ОЗУ и 1 кБ EEPROM. Платформа программируется с помощью программного обеспечения Arduino. На платформе Arduino Nano установлено несколько устройств для осуществления связи с компьютером, другими

устройствами Arduino или микроконтроллерами. ATmega328 поддерживает последовательный интерфейс UART TTL (5 В), осуществляемый выводами 0 (RX) и 1 (TX). Установленная на плате микросхема FTDI FT232RL направляет данный интерфейс через USB, а драйверы FTDI (включены в программу Arduino) предоставляют виртуальный COM-порт программе на компьютере. Мониторинг последовательной шины (Serial Monitor) программы Arduino позволяет посылать и получать текстовые данные при подключении к платформе.

Фрагменты программы для эффектов лампы, связанных с изменением цветности и основного кода программы, приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

Для обеспечения лучшего эффекта вокруг адресной матрицы крепится калька или белая бумага формата А4 — это позволяет лучше рассеивать свет лампы.

На рис. 4, 5 показаны лампа в процессе сборки и макетный образец лампы, готовой к работе.

Таким образом, разработана лампа с различными световыми эффектами на основе светодиодной матрицы. Она позволяет обеспечить большую комфортность бытового освещения с заданной потребителем цветовой доминантой. Для создания световых эффектов и для работы лампы в целом прописаны коды

```
#define TRACK_STEP 50

//***** ОГОНЁК *****/
int16_t position;
boolean direction;

void lighter() {
  FastLED.clear();
  if (direction) {
    position++;
    if (position > NUM_LEDS - 2) {
      direction = false;
    }
  } else {
    position--;
    if (position < 1) {
      direction = true;
    }
  }
  leds[position] = CRGB::White;
}
```

Рис. 2. Фрагмент программы, связанный с изменением цветности, — эффект «огонёк»

```
#define CURRENT_LIMIT 2000 // лимит по току в миллиамперах, автоматически управляет яркостью, 0 - выключить лимит
#define AUTOPLAY_TIME 30 // время между сменой режима в секундах

#define NUM_LEDS 256 // количество светодиодов в одном отрезке ленты
#define NUM_STRIPS 1 // количество отрезков ленты (в параллели)
#define LED_PIN 6 // пин ленты
#define BTN_PIN 2 // пин кнопки/сенсора
#define MIN_BRIGHTNESS 5 // минимальная яркость при ручной настройке
#define BRIGHTNESS 250 // начальная яркость
#define FIRE_PALETTE 0 // разные типы огня (0 - 3).
```

Рис. 3. Фрагмент программы, связанный с изменением основного кода



Рис. 4. Фотографии процесса сборки лампы



Рис. 5. Макетный образец лампы

на Arduino, выполнена их прошивка в Arduino Nano. В дальнейшем коды можно совершенствовать, создавать новые световые эффекты. Это обуславливает высокий потенциал адресной светодиодной матрицы и позволяет привнести в повседневную жизнь новые «краски».

Библиографические ссылки

1. Афонин В.В., Борискина А.А., Коваленко О.Ю. Математическая модель для определения колориметрических характеристик многокомпонентной светодиодной системы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 46.

2. Коваленко О.Ю., Ашрятов А.А., Медведева А.А., Афонин В.В., Сарычев П.А., Колмакова Е.Д. Световой прибор // Патент России № 118719. 2012. Бюл. № 21.

3. Коваленко О.Ю., Афонин В.В. Программный синтез светодиодного модуля // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 2 (33). С. 52—54.

4. Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.

5. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 136 с.

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

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

8. Пильщикова Ю.А., Коваленко О.Ю., Гусева Е.Д., Кудашкина М.В. Моделирование относительной спектральной чувствительности органа зрения биологического объекта для оценки эффективности источников излучения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 183—191.

9. Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А., Микаева С.А., Немов В.В. Исследование изменения светотехнических характеристик полупроводниковых источников света различного конструктивного исполнения в процессе эксплуатации // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2019. Т. 22. № 4. С. 471—476.

Ссылка для цитирования

Коваленко О.Ю., Мартынова Е.М., Микаева С.А., Журавлева Ю.А. Макетный образец лампы на основе светодиодной матрицы // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 391—394.

Уважаемые читатели!

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

УДК 004.942

А.О. Боровлев, А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф., **И.А. Высоцкая**, канд. физ.-мат. наук
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),

А.Н. Брюховецкий, канд. техн. наук, доц.
(Луганский национальный аграрный университет),

В.В. Никитин, канд. техн. наук, доц.
(Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана)

i.a.trishina@gmail.com

УСЛОВИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ ПЛАВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИВЫХ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Определены интервалы значений показателей плавности лесовозной автомобильной дороги, что обеспечивает плавность и безопасность дороги при автоматизированном пространственном проектировании.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога; плавность дороги; показатель плавности; кривизна дороги.

The intervals of the values of the indicators of the smoothness of the timber haul road are determined, which ensures the smoothness and safety of the road in automated spatial design.

Keywords: timber road; smoothness of the road; smoothness indicator; curvature of the road.

Введение. При автоматизированном пространственном проектировании лесовозных автомобильных дорог стремятся обеспечить для водителя ясность участков дороги по зонам обозрения и добиться её зрительной плавности.

В настоящее время для проверки зрительной плавности и ясности в основном используются перспективные изображения или модели дорог. При этом оценки моделей и перспектив лесовозной автомобильной дороги, сделанные отдельными проектировщиками, являются субъективными, поскольку не существует общепринятых количественных критериев зрительной плавности лесовозных автомобильных дорог. Этим объясняется недостаточность, а иногда и малая эффективность контроля проектных решений лесовозной автомобильной дороги с помощью перспектив.

Условия зрительной плавности пространственных кривых. В работе [1] показано, что точки, которым соответствуют большие значения кривизны, зрительно воспринимаются как точки изломов, а участки линий малой кривизны — как прямолинейные. Это заключение дало основание предполагать, что существуют два порога зрительно воспринимаемой кривизны — нижний, где кривые кажутся прямыми линиями, и верхний, соответствующий точкам зрительных изломов. Значения макси-

мальной кривизны, характеризующие плавные линии, должны находиться в этом интервале.

Для оценки плавности дороги по математическим моделям её перспективных изображений необходимо определить интервалы значений показателей плавности $K_{с,м}$, удовлетворяющие требованиям большинства водителей.

Проведена серия опытов в целях определения критических значений максимальной кривизны $K_{с,м}$, разделяющих её возможные значения на интервалы, характеризующие жёсткие, плавные, резкие и изломанные линии [2, 3].

Предметом оценки были перспективные изображения правых кромок проезжей части при правом повороте, имеющие следующие значения максимальной кривизны $K_{с,м}$ [2] в точках вершин: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1200, 1600, 3000. Перспективы этих линий были построены на одном листе и располагались по росту кривизны $K_{с,м,i}$. К оценке этих перспектив были привлечены инженеры. Опрашиваемым лицам предлагалось с расстояния 1 м оценить по порядку, начиная с правой стороны, все линии: назвать номера последней линии, которая им кажется изломанной; первой линии с правой стороны, которая оценивается как удовлетворительно плавная; последней линии, считая с левой стороны, которую опрашиваемый считает идеально плавной.

Необходимое число оценок (рассчитанное по формулам математической статистики) составляло 60. Результаты опроса сводились в ведомости. Был опрошен 71 человек, и после статистической обработки результатов опроса установлено, что 95 % считали плавными линии с максимальной кривизной $K_{с,м} \leq 750$.

Представленные для оценки в первом эксперименте линии не имели постоянного прироста максимальной кривизны $\Delta K_{с,м}$, что вызывало затруднения при статистической обработке результатов. Далее исследование было повторено в целях проверки и уточнения критических значений максимальной кривизны $K_{с,м}$.

С учётом опыта, полученного при первом опросе, принято, что критические значения максимальной кривизны $K_{с,м}$, характеризующие плавные и изломанные линии, находятся в интервале 100...1700. Шаг прироста кривизны был принят постоянным: $\Delta K_{с,м} = 100$. Подготовлены 17 перспективных изображений правых кромок проезжей части, описанных по круговым кривым, направленными направо. Продольный профиль был принят горизонтальным.

Радиусы кривых в плане, при которых $K_{с,м} = 100, 200, \dots, 1700$, определены по формуле

$$R_p = \frac{1}{8N^2b^3} K_{с,м}^2,$$

где b — расстояние относительно касательной к началу горизонтальной проекции оцениваемой кривой, для исследуемой линии в плоскости $b = 2$; N — коэффициент отношения максимальной кривизны к приближённому показателю кривизны [2, 4].

Полученные в ходе эксперимента распределения по интервалам оцениваемой линии — «идеально плавная», «удовлетворительно плавная» и «изломанная» — сведены в таблицу. При оценке данных предполагалось, что результаты подчиняются нормальному распределению. Проведём проверку этой гипотезы.

Параметрами нормального распределения являются среднее значение $K_{с,м}$ и среднее квадратичное отклонение S .

Дисперсия определена по следующей формуле:

$$S^2 = \frac{\sum (K_{с,м,i} - \overline{K_{с,м}})^2}{n - 1},$$

где $\overline{K_{с,м}} = \frac{\sum K_{с,м,i}}{n}$; n — общее число оценок; n_i — число оценок, соответствующих i -му интервалу.

С использованием функции Лапласа определены теоретические вероятности p_i попадания оценок в i -й интервал.

Распределения оценок линий, полученные во втором эксперименте

Номер линии	Интервалы значений $K_{с,м}$	Число оценок линий		
		Идеально плавная	Удовлетворительно плавная	Изломанная
1	50...150	1	—	—
2	150...250	19	—	—
3	250...350	29	—	—
4	350...450	19	—	—
5	450...550	2	1	—
6	550...650	1	5	—
7	650...750	—	9	—
8	750...850	—	20	—
9	850...950	—	17	—
10	950...1050	—	9	—
11	1050...1150	—	6	1
12	1150...1250	—	3	5
13	1250...1350	—	1	6
14	1350...1450	—	—	25
15	1450...1550	—	—	20
16	1550...1650	—	—	12
17	1650...1750	—	—	2

Гипотеза нормальности распределения проверена по критерию Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i},$$

где np_i — теоретическое число оценок в i -м интервале.

Число ограничений — три, т. е. $S, \overline{K_{с,м,i}}, \sum_{i=1}^k p_i = 1$. Поэтому χ^2 -распределение имеет $k = m - 3$ степеней свободы. Гипотеза о нормальном распределении не опровергается, потому что во всех случаях получено, что $\chi^2 < \chi_{1-p}^2$ при принятом уровне значимости $\alpha = 0,05$.

На этом основании теоретические вероятности p_i соответствия оценок i -му интервалу использованы для определения координат кривых накопленных частот (рис. 1). По этим критериям установлено, что подавляющее большинство (95 %) испытуемых воспринимали как изломанные те линии, максимальная

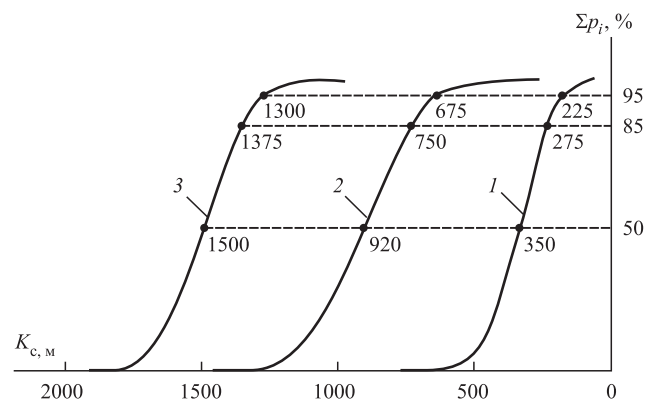


Рис. 1. Кривые накопленных частот оценок степени плавности поворотов по показателю $K_{c,m}$:

1 — идеально плавная кривая; 2 — удовлетворительно плавная кривая; 3 — изломанная кривая

кривизна которых превышает 1300, а плавными — линии, у которых $K_{c,m} \leq 675$.

Как видно на рис. 1, 85 % опрошенных лиц изломанными считали линии при $K_{c,m} > 1375$, а плавными — при $K_{c,m} \leq 750$. Критические значения приведены с точностью до 5.

Определение видимых начала и конца кривой было проведено в ходе эксперимента с серией из 8 разных перспективных изображений. Закругления приняты по кубическим параболам, продольный профиль — горизонтальный, точка зрения расположена в начале кривой. Кривые были изображены начиная с расстояния 10 м.

Опрашиваемым лицам предлагалось показать на изображениях точки начала и конца кривых. Ответы фиксировались в ведомости опроса. Получено 200 оценок точек «начало кривой» и «конец кривой». Для этих же точек с помощью разработанной компьютерной программы рассчитаны значения $K_{c,m}$. Это позволило установить связь между видимым началом кривой и кривизной в этой точке. На кривой накопленных частот (рис. 2, линия 1)

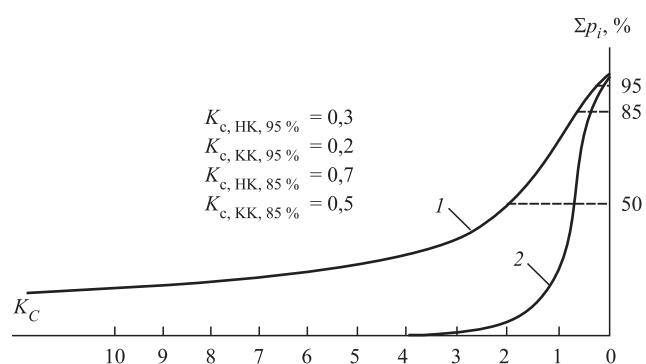


Рис. 2. Кривые накопленных частот оценок:

1 — начало кривой (НК); 2 — конец кривой (КК)

95 % опрошенных лиц началом кривой считали точку, где кривизна $K_c \leq 0,3$ или $K_c = 0,7$ при 85 % обеспеченности. Видимой кривой испытуемые считали точку, где $K_c \leq 0,2$ и при этой обеспеченности $K_c = 0,5$. За расчётное нижнее пороговое значение кривизны приняты средние значения $K_{c,95\%} = 0,25$ и $K_{c,85\%} = 0,6$. Эти значения рассматриваются как первые приближённые, подлежащие уточнению в дальнейших экспериментах.

На данном этапе исследований принято, что участки кривых, кривизна K_c которых находится в интервале 0...0,25 (или соответственно 0...0,5 при 85 % обеспеченности), зрительно воспринимаются как прямолинейные (жёсткие), т. е. неплавные.

Заключение. На основании проведённых экспериментальных исследований можно сделать вывод: так как кривизна $K_{c,95\%} < 0,25$ и $K_{c,85\%} < 0,6$ зрительно не замечается, то разрывы графиков кривизны величиной $\Delta K_c = K_{c,НК}$ можно считать допустимыми и при этом нет необходимости применения переходных кривых [5, 6].

Библиографические ссылки

1. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.
2. Вырко Н.П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник. Минск: БГТУ, 2005. 446 с.
3. Бурмистров Д.В. Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и её экономико-математическое развитие // Лесной вестник. Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 5. С. 69—76.
4. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 726. P. 654—667.
5. Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Прокоец В.С., Высоцкая И.А. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 1. С. 29—33.
6. Умаров М.М., Скрыпников А.В., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Расчет плановых элементов клотоидной трассы, подобранной на стереомодели местности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 4 (364). С. 97—106.

Ссылка для цитирования

Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Условия зрительной плавности пространственных кривых при автоматизированном проектировании лесовозных автомобильных дорог // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 395—397.

УДК 004.89

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402

Ю.Г. Кабалдин, д-р техн. наук, проф., **А.М. Кузьмина**,
Д.А. Шатагин, канд. техн. наук, доц., **М.С. Аносов**, канд. техн. наук, доц.
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
uru.40@mail.ru

НЕЙРОННО-СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ТВЁРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Приведена нейросетевая модель процесса изнашивания твёрдосплавного режущего инструмента, учитывающая влияние на него динамики резания. Предложена зависимость интенсивности изнашивания от режимов обработки и свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Ключевые слова: режущий инструмент; нейросетевая модель; динамика процесса резания; изнашивание.

A neural network model of the wear process of a carbide cutting tool is proposed. This model is considered influence of the cutting dynamics on the tool. The dependence of the wear rate on the processing modes and properties of the processed and tool material is shown.

Keywords: cutting tool; neural network model; dynamics of the cutting process; wear.

Одной из основных задач инструментального производства является обеспечение показателей качества металлорежущего инструмента, определяющих его работоспособность. Важнейшим параметром работоспособности инструмента является износостойкость [1–3].

Для повышения износостойкости лезвийного инструмента широко применяются износостойкие покрытия. Структура и химический состав покрытия влияют на тепловые и механические свойства режущей части инструмента [4, 5].

Работы по исследованию зависимости работоспособности лезвийного инструмента от химического состава поверхностей, контактирующих в процессе резания, в основном носят экспериментальный характер. Недостатками экспериментальных исследований являются высокая трудоёмкость и значительные материальные затраты. Для повышения эффективности экспериментальной работы необходимо иметь теоретические оценки, позволяющие сузить область поиска и определить наиболее успешные направления подбора инструментального материала и структуры износостойкого покрытия в зависимости от вида обрабатываемого материала и условий обработки.

Процессы стружкообразования, изнашивания режущего инструмента и динамики резания определяют основные направления при разработке новых подходов к повышению эффективности механической обработки. Однако данные процессы механической обработки рассматриваются независимо друг от

друга, т. е. оптимизируются по отдельности. В частности, при разработке методов снижения интенсивности изнашивания режущего инструмента не учитываются тип образующейся стружки и динамическое состояние оборудования. Изучение взаимного влияния различных параметров этих процессов, т. е. системный подход к механической обработке, позволит более точно составить, в частности, модели стружкообразования, износа режущего инструмента и самого процесса резания.

Одним из перспективных инструментов для исследований, которые могут учитывать взаимосвязь и взаимообусловленность выходных параметров процесса резания, могут стать подходы искусственного интеллекта. Они могут быть реализованы на основе создания цифровых двойников инструмента [6, 7]. Цифровой двойник (ЦД) — новое понятие в моделировании оборудования, технологических процессов и планирования цифровых производств. В основе ЦД лежит ряд математических моделей, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи как на отдельном объекте, так и в рамках целого производственного оборудования с использованием анализа больших данных (Bigdata). В этой связи при разработке двойников инструмента важное значение приобретает разработка нейросетевых моделей на основе методов машинного обучения. Их построение с использованием статистических зависимостей позволяет проводить как симуляцию, так и в целом оценку текущего состояния режущего инструмента.

В настоящее время различают несколько видов (механизмов) изнашивания режущего инструмента [1, 2]. В процессе резания, по-видимому, реализуются одновременно несколько механизмов изнашивания, однако один из них, в зависимости от условий резания, будет доминирующим.

Исследования показывают [5], что большое влияние на износостойкость твёрдосплавного режущего инструмента оказывает его структура на макро- и микроуровне, а именно размер зерна, процентное содержание связи, электронная и дислокационная структуры в зёрнах карбидной фазы, динамические процессы при механической обработке и т. д. Влияние динамики процесса резания [8] на износостойкость инструмента наименее изучено.

Полагая, что работа A_T сил трения при резании в основном сопровождается запасанием тепловой энергии q_n в зёрнах карбидных фаз твёрдых сплавов и нитридных фаз покрытий, можно представить выражение для интенсивности изнашивания инструмента J в виде

$$J = q_n/\Delta H = q_F V/\Delta H = 0,28 S_k V/\Delta H,$$

где q_F — удельная сила трения по задней поверхности режущей части инструмента; V — скорость резания; ΔH — теплота плавления тугоплавкого соединения; S_k — действительный предел прочности.

В приведённой формуле удельная сила трения q_F в соответствии с исследованиями М.Ф. Полетики [9] представлена через действительный предел прочности S_k .

Запасание тепловой энергии q_n , равной теплоте плавления ΔH тугоплавких фаз, будет сопровождаться разрывом в них межатомных связей. Накопление разорванных атомных связей будет способствовать образованию адгезионных связей между обрабатываемым и инструментальными материалами, возникновению микротрещин и отрыву частиц износа при сдвиговых деформациях контактных поверхностей в процессе внешнего трения.

Металлографические исследования подошв наростов при резании стали 40 (рис. 1) показали, что локальные температуры на контактных поверхностях могут достигать температуры плавления стали.

На рис. 1, *a* видно, что в отличие от исходной структуры металла (рис. 1, *б*) структура подошвы состоит из трёх зон: троостита (у ре-

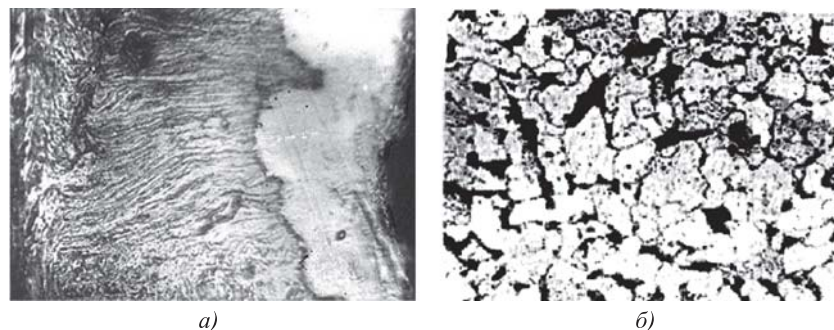


Рис. 1. Структура подошвы нароста (*a*) и исходная структура стали 40 (*б*)

жущего лезвия), пластинчатого перлита и свободного α -железа. Анализ рис. 1 показывает, что локальная температура в прирезцовом слое за тысячные доли секунды достигает температуры плавления, затем происходит скоростная закалка с образованием мартенсита, после чего реализуется скоростной отпуск. В результате в начале подошвы нароста образуется троостит. Создание градиента температур в зоне контакта приводит к диффузии углерода к режущему лезвию, что сопровождается образованием чистого железа в конце подошвы нароста.

При обработке стали 12X18H10T процесс изнашивания режущего инструмента из твёрдого сплава BK8 сопровождается как изнашиванием самих зёрен WC, так и их вырывом. На рис. 2 видны следы интенсивной сдвиговой деформации поверхности изнашивания в виде тёмных полос.

В работе [10] показано, что образование металлических связей связано с коллективизацией валентных электронов. В карбидах WC их больше, чем в TiC [11]. Поэтому при обработке углеродистых сталей твёрдые сплавы группы BK имеют меньшую износостойкость, чем твёрдые сплавы группы ТК [1, 2].

Нанесение покрытий также повышает износостойкость твёрдых сплавов [4, 5]. На рис. 3

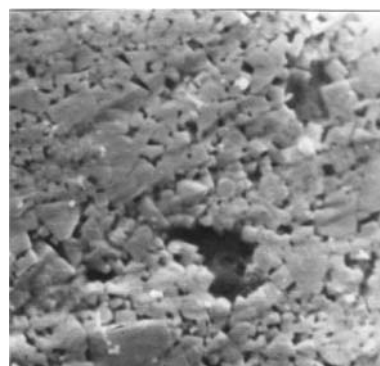


Рис. 2. Характер изнашивания инструмента из твёрдого сплава BK8 при обработке стали 12X18H10T

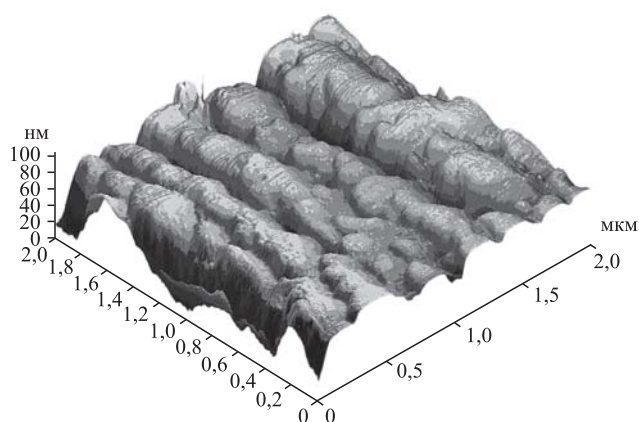


Рис. 3. Поверхностная структура покрытия TiAlN ($\times 3000$)

представлена микрофотография поверхностной структуры покрытия TiAlN, полученная с помощью атомного силового микроскопа.

На рис. 4 показан характер изнашивания покрытия TiAlN при проведении испытаний. Анализ изнашивания покрытий при резании стали 12X18H10T показывает, что оно сопровождается в основном изнашиванием зёрен покрытия, трещинообразованием (рис. 4, а) и очаговым отрывом частиц покрытия (рис. 4, б).

Выявленный механизм изнашивания покрытий, путём трещинообразования вследствие разрыва межатомных связей под действием тепловой энергии и последующего отрыва их частиц под действием сдвиговых деформаций на контактных поверхностях, близок к кинетической теории С.Н. Журкова [12]. В частности, происходят постепенный разрыв межатомных связей под воздействием тепла, их накопление с образованием микротрещин

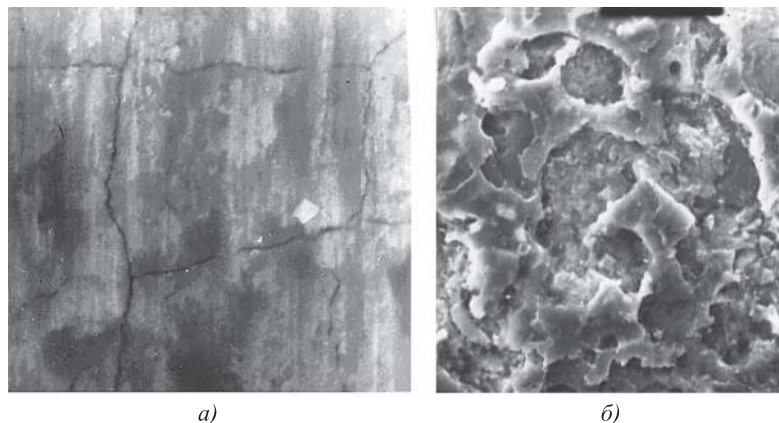


Рис. 4. Изнашивание покрытия TiAlN при обработке стали 12X18H10T:

а — микротрещины в покрытии ($\times 500$); б — характер изнашивания покрытия путём отрыва его частиц с подложки ($\times 1000$)

(рис. 4, а), что и приводит к образованию частиц износа (рис. 4, б).

Для оценки интенсивности изнашивания инструмента с учётом влияния динамики процесса резания (фазовой характеристики [12]) разработана нейросетевая модель (цифровой двойник) процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента (рис. 5).

Как отмечалось выше, экспериментальное исследование влияния различных факторов на износ инструмента сопряжено с большими материальными затратами. Оценка влияния на интенсивность изнашивания инструмента как из твёрдых сплавов, так и из твёрдых сплавов с покрытиями с использованием нейронно-сетевого моделирования позволяет существенно сократить материальные расходы, учесть влияние большого числа факторов, их взаимовлияние и взаимообусловленность.

Для обучения нейронной сети были проведены исследования зависимости амплитуды автоколебаний от скорости резания. Обработывались сталь 45, 12X18H10T и титановый сплав ВТ8.

Экспериментальные исследования [6] с регистрацией сигнала виброакустической эмис-

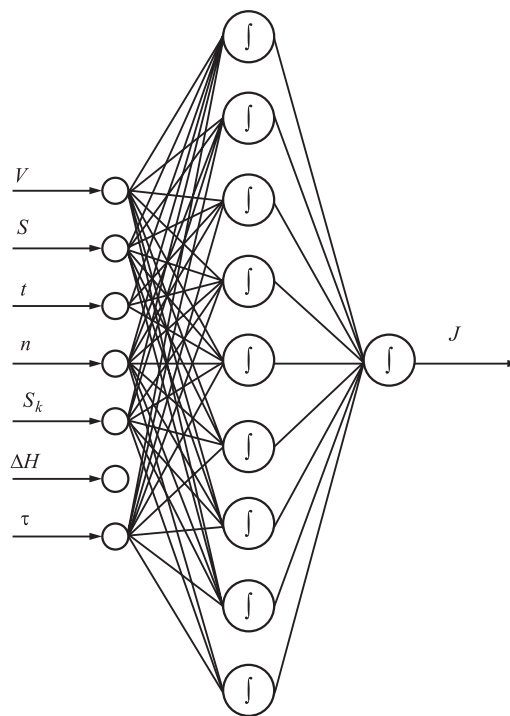


Рис. 5. Нейросетевая модель процесса изнашивания режущего инструмента:

V — скорость резания; S — подача; t — глубина резания; n — число плоскостей скольжения в кристаллической решётке металла; S_k — действительный предел прочности; ΔH — теплота плавления материала инструмента; τ — фазовая характеристика; J — интенсивность изнашивания инструмента

сии (ВАЭ) проводились с использованием специально разработанного стенда. В состав стенда входят токарный станок модели 16К20 с бесступенчатым регулированием привода главного движения, токарные резцы со сменными многогранными твёрдосплавными пластинами, пьезоэлектрические акселерометры со встроенной электроникой (IEPE), заготовки из сталей 45 и 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ8, трёхканальные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и персональный компьютер (ПК) со специально разработанным программным обеспечением (ПО). Принцип работы экспериментальной установки основан на измерении и регистрации колебаний упругой системы станка с последующим преобразованием колебаний в электрический сигнал, пропорциональный их амплитуде.

Для измерения и регистрации механических колебаний использовались пьезоэлектрические акселерометры «ГлобалТест» моделей: AP2037-10, -100, -500. Характеристики акселерометров позволяют регистрировать механические колебания в диапазонах частот от 1 Гц до 15 000 кГц и максимальной амплитуды измеряемого ускорения 100...500 м/с². Акселерометры крепились на инструмент, вблизи передней опоры шпинделя и на заднюю бабку. На каждом элементе устанавливалось по три акселерометра во взаимно перпендикулярных плоскостях. Такое крепление позволяет наиболее полно изучить динамическую картину и оценить распространение упругих волн по всему рабочему пространству станка. Для крепления акселерометров использовалась шпилька как один из наиболее жёстких типов соединения. Все датчики прошли поверку и имеют соответствующие сертификаты качества.

В качестве АЦП применялись трёхканальные АЦП фирмы National Instrument модели 4431. Характеристики АЦП позволяют оцифровывать электрический сигнал с частотой до 50 кГц и напряжением до 60 В с разрешающей способностью 24 бит. Подключение акселерометров к АЦП осуществлялось через разъём BNC. Для сохранения и последующей обработки оцифрованного сигнала использовался ПК.

Получение временных сигналов ВАЭ осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе проводилось планирование многофакторного эксперимента и составлялась матрица эксперимента, где определялись число проводимых опытов, их последовательность и назначались режимы обработки. Затем осуществлялся непосредственно сам процесс обработки. ВАЭ

регистрировалась датчиками и в виде сигнала поступала на вход АЦП, где выполнялась его оцифровка с заданной частотой дискретизации. Полученный цифровой сигнал передавался в ПК и записывался в виде двоичного файла на жёсткий диск. Данный процесс повторялся для всех запланированных опытов.

Полученные временные ряды сигнала ВАЭ после записи на жёсткий диск подвергались дальнейшей обработке. Так как основной задачей экспериментального исследования являлось изучение автоколебаний системы резания, то для удаления шумовых составляющих в сигнале и следов вынужденного воздействия использовались цифровые фильтры. Удаление частот вынужденных колебаний из спектра сигнала производилось с использованием полосового фильтра. Результаты исследований представлены на рис. 6. Видно, что зависимость амплитуды колебаний от скорости резания имеет немонотонный характер. Максимальное значение амплитуды наблюдается при $V = 38$ м/мин.

На рис. 7 приведена зависимость интенсивности изнашивания инструмента с покрытием из сплава ВК8, содержащего карбиды WC, при обработке титанового сплава ВТ8 с использованием нейронно-сетевого моделирования. Обучение нейронной сети проводилось на основе аналитических зависимостей, т. е. зависимостей износа от всех указанных факторов.

На рис. 7 видно, что зависимость интенсивности изнашивания покрытия режущего инструмента от скорости резания имеет немонотонный характер. Влияние динамики процесса резания на интенсивность изнашивания инструмента проявляется следующим обра-

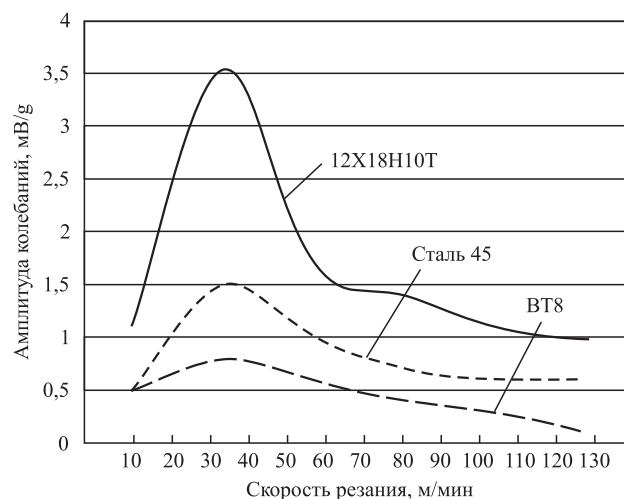


Рис. 6. Зависимость амплитуды автоколебаний от скорости резания ($S = 0,1$ мм/об, $t = 4$ мм)

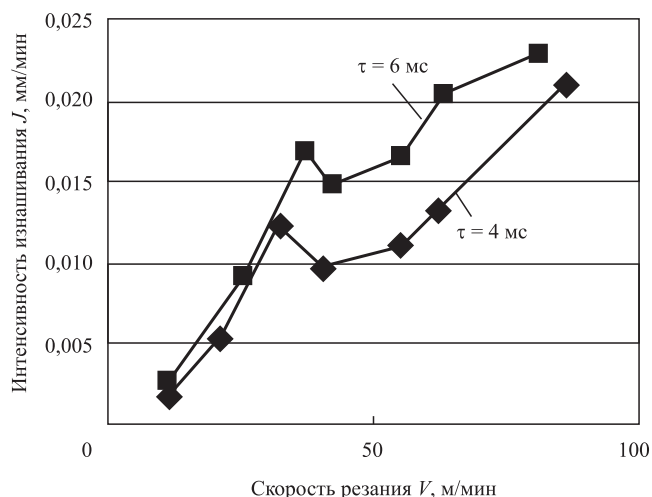


Рис. 7. Зависимости интенсивности изнашивания инструмента с покрытием из твёрдого сплава ВК8 от скорости резания при обработке сплава ВТ8 и сталей 12Х18Н10Т и 45 ($S = 0,1$ мм/об, $t = 4$ мм) при различных значениях фазовой характеристики процесса резания τ

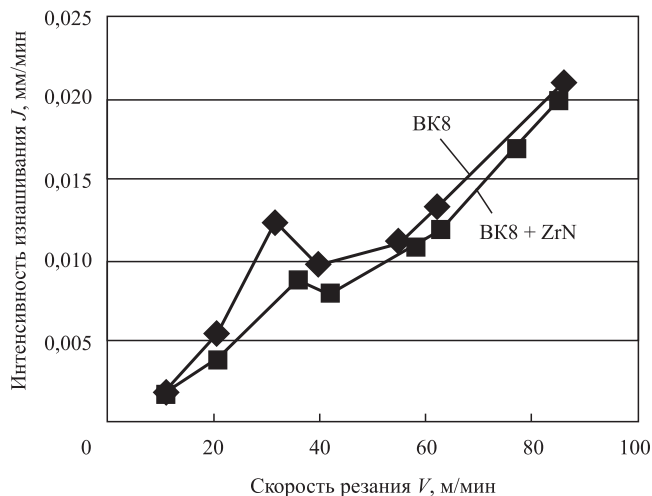


Рис. 8. Зависимость интенсивности изнашивания инструмента из твёрдого сплава ВК8 с покрытием ZrN от скорости резания при обработке стали 12Х18Н10Т ($S = 0,1$ мм/об, $t = 4$ мм)

зом: чем выше фазовая характеристика τ , тем ниже износостойкость инструмента.

Следовательно, с ростом скорости резания величина J растёт (рис. 8), однако после достижения V резания, где амплитуда колебаний максимальна при обработке титанового сплава (см. рис. 6), она снижается и по мере увеличения V , после чего вновь резко возрастает. Следовательно, поскольку с ростом скорости резания амплитуда колебаний снижается (см. рис. 6), то рост J с дальнейшим повышением V уже связан с действием температуры резания. Таким образом, нейронно-сетевое моделирование позволило выявить диапазоны скоростей резания, где динамика резания влияет на износ твёрдо-

сплавного инструмента, а где он определяется в основном температурой резания.

Влияние покрытия ZrN на интенсивность изнашивания инструмента из твёрдого сплава ВК8 представлено на рис. 8. Анализ показывает, что наличие покрытия ZrN снижает интенсивность изнашивания инструмента и сдвигает скорость резания, на которой наблюдается минимум этой характеристики, в область более высоких значений.

Библиографические ссылки

1. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Жилин В.А. Субатомный механизм износа режущего инструмента. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1973. 105 с.
4. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с покрытием. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
5. Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Власов Е.Е. Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твёрдосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 216 с.
6. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве / Ю.Г. Кабалдин и др.; под ред. Ю.Г. Кабалдина. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. 271 с.
7. Искусственный интеллект, интернет вещей, облачные технологии и цифровые двойники в современном механообрабатывающем производстве / Ю.Г. Кабалдин и др.; под ред. Ю.Г. Кабалдина. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2019. 196 с.
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
9. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 148 с.
10. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. 296 с.
11. Андриевский А.Р., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справочник. Челябинск: Metallurgia, 1989. 368 с.
12. Журков С.Н., Левин Б.Я., Томашевский Э.Е. Временная зависимость прочности в условиях высокого вакуума // Физика твёрдого тела. 1960. Т. 2. № 9. С. 2066—2069.

Ссылка для цитирования

Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 398—402. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402.

УДК 621.396.6:004.94

А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф., **Н.А. Шалумова**, канд. техн. наук, доц.,
М.А. Шалумов, канд. техн. наук
(ООО «Цифровой двойник электроники»)

als140965@mail.ru

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АВИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ

Разработаны алгоритмы моделирования физических процессов в авиационной электронике для последующей реализации прототипа программно-методического комплекса создания цифровых двойников авиационной электроники. В результате получены интегрированная электронная модель цифрового двойника авиационной электроники, учитывающая взаимосвязь физически разнородных процессов и позволяющая учесть при анализе надёжности все влияющие факторы, а также метод интеграции электронного виртуального макета, геометрических и информационных моделей в единую электронную модель цифрового двойника авиационной электроники, учитывающий взаимосвязь различных физических процессов при моделировании и позволяющий учесть при анализе надёжности все результаты моделирования.

Ключевые слова: цифровой двойник; авиационная электроника; математическое моделирование; тепловые процессы; механические процессы; электромагнитные процессы; усталостные разрушения.

Algorithms for modeling physical processes for aviation electronics have been created. Developed algorithms are intended for subsequent implementation a prototype of the software-methodological complex when a creating digital twins of aviation electronics. An integrated electronic model of a digital twin of aviation electronics is received. It examines the relationship of physically dissimilar processes and allows taking into account influencing factors in the analysis of reliability. Also, a method for integrating an electronic virtual model has been developed, combining geometric and information models into the single electronic model of the digital twin of aviation electronics. This method considers the relationship of various physical processes in modeling and allows taking into account all the results of modeling in the analysis of reliability.

Keywords: digital twin; aviation electronics; math modeling; thermal processes; mechanical processes; electromagnetic processes; fatigue failure.

Разработка алгоритма моделирования тепловых процессов, протекающих в авиационной электронике. Целью математического моделирования авиационной электроники (АЭ) на стационарное тепловое воздействие является определение пригодности АЭ к эксплуатации или хранению при воздействии постоянной температуры и постоянной мощности. Цель математического моделирования АЭ на нестационарное тепловое воздействие — определение пригодности АЭ к эксплуатации или хранению при воздействии переменной температуры и переменной мощности. АЭ в общем случае являются тепловыделяющей. Основные виды теплообмена — кондукция, излучение, естественная и вынужденная конвекция [1]. В общем случае зависящими от времени являются температура окружающей среды, мощность тепловыделения и теплоёмкость.

Оцениваемые характеристики для математического моделирования АЭ на стационарное

тепловое воздействие — постоянные температуры в узлах модели АЭ, а для математического моделирования АЭ на нестационарное тепловое воздействие — температуры в узлах модели АЭ в зависимости от времени.

Для построения алгоритма моделирования тепловых процессов, протекающих в АЭ, необходимо наличие математических моделей, позволяющих рассчитывать температуры в конструкции АЭ как при стационарном, так и при нестационарном тепловом режиме. Такие модели были разработаны ранее и стали научной основой при выполнении данной работы. Тепловые процессы в АЭ описываются дифференциальными уравнениями, содержащими производные второго порядка как по координатам, так и по времени. Дифференциальное уравнение, описывающее стационарный тепловой режим и содержащее производные второго порядка по координатам, имеет следующий вид:

$$\lambda \nabla^2 T + q_V = 0. \quad (1)$$

Для нестационарного теплового режима дифференциальное уравнение, содержащее производную второго порядка по времени, имеет вид

$$\lambda \nabla^2 T + q_V - C_{pM} \rho_M \frac{dT}{dt} = 0. \quad (2)$$

В приведённых уравнениях λ — коэффициент, характеризующий теплопроводность материала, Вт/(м·К); ∇ — оператор Лапласа; T — температура, К; q_V — удельная мощность, Вт/м³; C_{pM} — удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К); ρ_M — плотность материала, кг/м³; t — время, с.

Уравнение (2) отличается от уравнения (1) наличием дополнительного компонента, включающего в себя удельную теплоёмкость материала и первую производную температуры по времени. Согласно электротепловой аналогии конденсатор в электрической цепи является аналогом теплоёмкости материала. Использование электротепловой аналогии связано с тем, что в настоящее время наиболее хорошо проработаны методы численного анализа электрических схем. Электротепловая аналогия позволяет использовать при моделировании тепловых процессов при стационарном и нестационарном тепловых режимах уже хорошо отработанные методы численного анализа электрических схем. Данные методы являются сеточными. Основным сеточным методом, используемым для перехода от дифференциальных уравнений к алгебраическим, является метод конечных разностей.

Применение метода конечных разностей позволяет путём разбиения конструкции АЭ на элементарные объёмы в виде прямоугольных параллелепипедов $V_0 = \Delta x \Delta y \Delta z$ (узлы модели) перейти от дифференциального уравнения (1) к алгебраическому уравнению

$$\begin{aligned} & [\sigma_x(T_1 - T_0) - \sigma_x(T_0 - T_2)] + \\ & + [\sigma_y(T_3 - T_0) - \sigma_y(T_0 - T_4)] + \\ & + [\sigma_z(T_5 - T_0) - \sigma_z(T_0 - T_6)] + Q_0 = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где T_i — температура соседних узлов тепловой модели; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — тепловые проводимости между соседними узлами по осям Ox, Oy и Oz соответственно, имеющие размерность, Вт/К: $\sigma_x = \frac{\lambda \Delta y \Delta z}{\Delta x}$, $\sigma_y = \frac{\lambda \Delta x \Delta z}{\Delta y}$, $\sigma_z = \frac{\lambda \Delta x \Delta y}{\Delta z}$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — размеры прямоугольных параллелепипедов; Q_0 — выделяемая в узле тепловой модели V_0 тепловая мощность, $Q_0 = q_0 \Delta x \Delta y \Delta z$, q_0 — удельная мощность внутренних источников энергии в узле модели V_0 .

В теории электрических цепей уравнением, аналогичным конечно-разностному уравнению (3), описывающему теплообмен в узле тепловой модели, является уравнение, которое получается на основе методов расчёта электрических цепей.

Аналогично для нестационарного теплового процесса осуществляется переход от дифференциального уравнения (2) к алгебраическому уравнению

$$\begin{aligned} & [\sigma_x(T_1 - T_0) - \sigma_x(T_0 - T_2)] + \\ & + [\sigma_y(T_3 - T_0) - \sigma_y(T_0 - T_4)] + \\ & + [\sigma_z(T_5 - T_0) - \sigma_z(T_0 - T_6)] + C_0 \frac{dT_0}{dt} + Q_0 = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

где C_0 — теплоёмкость объёма V_0 .

Можно провести аналогию между уравнением (4) и электрической схемой, в которой теплоёмкость выделенного объёма моделируется с помощью электрической ёмкости. В общем случае для анализа тепловых процессов в изделиях задают граничные и начальные условия. Начальные условия задают при моделировании нестационарных тепловых процессов. Они представляют собой температурное поле в начальный момент времени.

Алгоритм математического моделирования АЭ на стационарное тепловое воздействие:

1. Поиск теплофизических параметров материалов АЭ.

Для проведения математического моделирования АЭ на стационарное тепловое воздействие необходимо знать следующие теплофизические параметры материалов АЭ: коэффициент теплопроводности материала, коэффициент смазки, степень черноты материала.

Параметры стационарного теплового воздействия: источник постоянной мощности, источник постоянной температуры, давление окружающего воздуха.

Для вынужденной конвекции задаются также скорость воздушного потока и скорость охлаждающей жидкости в канале.

Для проведения математического моделирования АЭ на нестационарное тепловое воздействие необходимо знать следующие теплофизические параметры материалов АЭ: коэффициент теплопроводности материала, коэффициент смазки, степень черноты материала, теплоёмкость. Теплоёмкость в общем случае зависит от времени и может задаваться как в виде таблицы зависимости теплоёмкости от времени, так и в виде несколь-

ких функций нескольких типов: импульсной, синусоидальной, пилообразной и сложной. Каждая функция имеет свой набор характерных точек.

Параметры нестационарного теплового воздействия: источник переменной мощности (задаётся аналогично теплоёмкости), источник переменной температуры (задаётся аналогично теплоёмкости), давление окружающего воздуха.

Для вынужденной конвекции задаётся также скорость воздушного потока.

2. Занесение в базу данных найденных параметров материалов АЭ для использования в процессе моделирования.

3. Упрощение процессов теплопередачи в АЭ.

При построении моделей тепловых процессов (МТП) АЭ решается компромиссная задача. С одной стороны, нужно обеспечить приемлемую точность моделирования, а с другой — приемлемую размерность сеточной модели, т. е. число узлов МТП должно оставаться в разумных пределах. Для этого предварительно упрощают процессы теплопередачи в АЭ: не учитывают несущественные тепловые связи между узлами МТП, описывающие второстепенные виды теплообмена в конструкции АЭ; обосновывают и условно принимают равными температуры в тех или иных деталях конструкции АЭ. Объём, включающий несколько таких деталей конструкции АЭ, условно назовём «изотермичной зоной». Использование в МТП изотермичных зон значительно упрощает их и сокращает подготовку исходных данных для расчёта.

Рассмотрим случаи, в которых возможно и целесообразно применять объединение деталей в изотермичную зону — условно однородное тело с определённой среднеобъёмной температурой. Прежде всего, это имеет смысл в оценочных расчётах, когда не требуется получать температуры на каждом элементе конструкции АЭ, а достаточно иметь средние значения температур элементов. По такому принципу построено большинство существующих методик по расчёту тепловых режимов АЭ.

Упрощение процессов теплопередачи в транзисторе. При построении МТП транзистор разбивается на две условно изотермичные зоны: кристалл транзистора и корпус транзистора.

Упрощение процессов теплопередачи в транзисторе, установленном на пластинчатом радиаторе (оребрение радиатора одностороннее, транзистор установлен на неоребрённой сторо-

не радиатора). При построении МТП транзистор разбивается на три условно изотермичные зоны: кристалл транзистора, корпус транзистора и радиатор транзистора.

Упрощение процессов теплопередачи в продуваемом воздушном канале (воздуховоде). На одной из стенок канала установлен через теплоотводящую пасту тепловыделяющий источник вторичного электропитания (ИВЭП) с определённой мощностью тепловыделения. При построении МТП воздуховод разбивается на пять условно изотермичных зон: стенка канала по ширине, стенка канала по длине; элемент, выделяющий тепло; корпус; воздух на входе в канал; воздух на выходе из канала.

Упрощение процессов теплопередачи в герметичном блоке в виде прямоугольного параллелепипеда, в котором слева установлен печатный узел, а справа — трансформатор. При построении МТП герметичный блок разбивается на условно изотермичные зоны: шесть стенок корпуса блока; воздух внутри блока, в правой его части; печатный узел; трансформатор. Так как тепло равномерно распределяется по площади платы, для печатного узла не требуется подробно определять температуры по площади платы. Опоры платы не учитываются при передаче внешнего тепла.

4. Построение МТП в виде узлов и ветвей.

МТП строится пользователем в топологическом виде — в виде графа, моделирующего явления теплопередачи. Выделенным условно изотермичным зонам ставят в соответствие узлы модели теплового процесса. Для взаимодействующих объёмов узлы модели соединяются между собой ветвями, которые соответствуют видам теплообмена между этими объёмами (кондукция, излучение, естественная конвекция и др.).

Тепловыделение в объёме моделируется включением в узел источника мощности. Если мощность тепловыделения в объёме постоянная, то источник мощности постоянный. Если мощность тепловыделения в объёме зависит от времени, то источник мощности переменный.

Заданная температура в объёме моделируется включением в узел источника температуры. Если температура в объёме постоянная, то источник температуры постоянный. Если температура в объёме зависит от времени, то источник температуры переменный и в узел дополнительно включается источник теплоёмкости. Это необходимо при моделировании нестационарного теплового режима.

Таким образом, МТП является топологической и представляется в виде ненаправленного графа. Выделенные объёмы в конструкции — узлы графа. Тепловые потоки между этими объёмами — ветви графа. Каждому узлу графа соответствует температура, которая определяется в результате решения системы уравнений.

Протокол виртуальных испытаний на стационарные тепловые воздействия должен содержать описание модели, описание источников постоянных мощностей, описание источников постоянных температур, таблицу температур в узлах модели, выводы о тепловых перегрузках в узлах модели.

Протокол виртуальных испытаний на нестационарные тепловые воздействия должен содержать описание модели, описание источников переменных мощностей, описание источников переменных температур, таблицы и графики температур в узлах модели в зависимости от времени, выводы о тепловых перегрузках в узлах модели.

Разработка алгоритма моделирования механических процессов, протекающих в авиационной электронике, с учётом нелинейности демпфирующих свойств материалов. В основу алгоритма моделирования механических процессов, протекающих в АЭ, с учётом нелинейности демпфирующих свойств материалов положены разработанные методы математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ: на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот; воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур); виброустойчивость и вибропрочность при воздействии синусоидальной или случайной широкополосной вибрации; ударную устойчивость и ударную прочность при воздействии одиночного и многократного механического удара; воздействие линейного ускорения; воздействие акустического шума.

Конечной целью математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот является их исключение с применением моделирования механических процессов в АЭ.

Моделирование на отсутствие резонансных частот проводят:

для определения соответствия требованиям ГОСТ 16962—71, согласно которым АЭ без виброизоляторов и её отдельные узлы и детали с различной степенью жёсткости (I, II, III)

не должны иметь резонансных частот в диапазонах частот до 25, до 40, до 100 Гц соответственно;

определения отсутствия или наличия резонансных частот в АЭ, установленной на виброизоляторах, в диапазоне частот до 25 Гц;

определения возможности проведения ускоренных испытаний на вибропрочность и выбора метода этих испытаний;

получения сведений о резонансных частотах при необходимости включения этих сведений в документы по применению АЭ или в справочники.

Моделирование на отсутствие резонансных частот проводится в целях проверки способности АЭ выполнять свои функции и сохранять свои параметры в соответствии с нормативной документацией.

Описание алгоритма проведения математического моделирования АЭ на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот. Частотами резонанса АЭ считаются частоты, при которых амплитудное значение виброперемещения или виброускорения каких-либо точек АЭ в два или более раз превышает амплитудное значение виброперемещения или виброускорения точек крепления АЭ к столу вибратора.

Моделирование на обнаружение резонанса отдельной АЭ, элементов и сборочных единиц АЭ проводится в трёх взаимно перпендикулярных направлениях в требуемом частотном диапазоне и при двукратной перегрузке.

При моделировании выбираются пониженные ускорения, не превышающие $2g$ для диапазона частот 10...150 Гц. На конструкцию АЭ действует гармоническая вибрация с данными параметрами. В заданном диапазоне частот их может быть несколько, а может не быть ни одной.

Плавно изменяя частоты и при этом поддерживая постоянное ускорение, осуществляют поиск резонансных частот. Нужно подобрать такую скорость изменения частоты, чтобы не пропустить резонансную частоту и успеть её зарегистрировать. Но эта скорость должна быть больше одной октавы в минуту (октавой считается диапазон частот, у которого отношение высшей частоты к низшей равно двум).

Для определения и оценки резонансных частот в АЭ проводится конечно-элементный анализ. Для определения резонансных частот в АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагран-

жа с шестью степенями свободы. При этом необходимо иметь корректную 3D-модель АЭ и знать физико-механические параметры материалов АЭ, используемые в конечно-элементной модели.

Коэффициент потерь при механических колебаниях (КПМК) γ в зависимости от напряжения изгиба σ_n на линейном участке этой зависимости вычисляется по формуле [2]

$$\gamma = \gamma_0 + k_\sigma \sigma_n,$$

где γ_0 — КПМК для линейного участка зависимости γ от σ_n при $\sigma_n = 0$; k_σ — коэффициент зависимости КПМК от напряжения.

Некоторые физико-механические параметры материалов АЭ существенно зависят от температуры. Прежде всего это касается неметаллов, например материалов печатных плат и демпфирующих материалов. Для них сильнозависимыми от температуры являются упругие и демпфирующие характеристики.

При увеличении температуры модуль упругости E снижается:

$$E = E^{20} - K_E(T - 20),$$

где T — действующая температура; E^{20} — модуль упругости при $T = 20$ °С; K_E — параметр, учитывающий упругие свойства материала.

При этом КПМК растёт, т. е. диссипативные свойства возрастают, изменяются обе характеристики КПМК. Уравнения температурных зависимостей имеют вид

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} + K_\gamma(T - 20), \quad (5)$$

$$k_\sigma = k_\sigma^{20} + K_k(T - 20), \quad (6)$$

где γ_0^{20} — значение γ_0 при $T = 20$ °С; k_σ^{20} — значение k_σ при $T = 20$ °С; K_γ , K_k — коэффициенты пропорциональности.

Данные параметры могут быть получены путём идентификации.

Для виброизоляторов необходимо знать следующие параметры:

коэффициенты жёсткости по осям X , Y , Z ;

значения КПМК по осям X , Y при $\sigma_n = 0$;

значение КПМК по оси Z при напряжении растяжения-сжатия $\sigma_{p-c} = 0$;

коэффициенты зависимости КПМК по осям X , Y от напряжения изгиба;

коэффициент зависимости КПМК по оси Z от напряжения растяжения-сжатия.

Данные параметры могут быть получены путём идентификации.

Параметры гармонической вибрации: ускорение $1g$, диапазон частот 10...150 Гц.

В случае отсутствия физико-механических параметров материалов АЭ проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

Входные данные для этого алгоритма моделирования:

параметры плоской конструкции: габаритные размеры, шаги сетки по осям координат в плоскости конструкции, число опор, диаметр опоры, расстояние от края до центра опоры;

файлы с экспериментальными данными: зависимость виброускорения от частоты в центре пластинки при воздействии гармонической вибрации, зависимость ударного ускорения от времени в центре пластинки при ударном воздействии;

начальные значения идентифицируемых параметров материала;

диапазон изменения идентифицируемых параметров материала;

максимальное число итераций;

ошибки определения резонансной частоты, виброускорения и определения ударного ускорения;

резонансная частота (полученная экспериментально);

резонансное ускорение (полученное экспериментально).

В случае отсутствия параметров виброизоляторов проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

Перед процессом моделирования проводится подготовка моделей: 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в САД-системах; 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в систему моделирования АЭ на механические воздействия.

Проводятся виртуальные испытания на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие гармонической вибрации. Определяются зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты.

По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором приводится информация о наличии или отсутствии резонансных частот. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия гармонической вибрации на модель, график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели, идентифицированные параметры, график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке изделия, выводы о наличии резонансных частот.

Моделирование на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур) проводится в целях проверки способности АЭ выполнять свои функции, находясь под их воздействием. Эти нагрузки в общем случае могут быть вызваны разностью давления, статической инерционной нагрузкой под действием собственного веса АЭ (гравитацией), распределением температур (тепловым расширением), одновременным воздействием всех перечисленных выше факторов.

Алгоритм проведения математического моделирования АЭ на воздействие статических нагрузок:

1. Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия. При этом по результатам натуральных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

2. Идентифицированные параметры материалов изделия заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

3. Проводится подготовка 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в САД-системах.

4. Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в систему моделирования АЭ на механические воздействия.

5. Задаются характеристики давления. Оно может быть задано для отдельно взятой поверхности, а также для группы поверхностей.

6. Задаются характеристики гравитации. В большинстве случаев требуется смоделировать действие силы тяжести как частного случая силы гравитации. Для этого нужно задать ось гравитации, совпадающую с вертикальной осью модели, а ускорение задать равным ускорению свободного падения на Земле ($9,81 \text{ м/с}^2$). Сила гравитации должна быть направлена против вертикальной оси модели.

7. Задаются характеристики теплового расширения, а также начальное и конечное значения температур, полученные по результатам испытаний на воздействие повышенной рабочей и предельной температуры среды.

8. Задаются характеристики давления, гравитации и теплового расширения для комбинированного расчёта. При данном виде расчёта напряжения вызываются одновременным действием давления, гравитации и теплового расширения конструкции.

9. Для определения перемещений и механических напряжений в АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ. При этом не учитываются демпфирование и инерция. Оцениваемыми характеристиками являются перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

10. Проводятся виртуальные испытания АЭ на воздействие давления, воздействие статической инерционной нагрузки под действием собственного веса АЭ (гравитации), тепловое расширение, одновременное воздействие всех перечисленных выше факторов статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур).

Определяются перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

11. По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором приводится информация о перемещениях по всем осям и суммарных, а также механических напряжениях в конструкциях АЭ. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия гармонической вибрации на модель, график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке мо-

дели, идентифицированные параметры, перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

Моделирование на воздействие синусоидальной или случайной широкополосной вибрации проводится как при заданных в техническом задании значениях параметров воздействий, так и с повышенными амплитудой ускорения и спектральной плотностью ускорения (в критических режимах, в том числе не воспроизводимых при натурных испытаниях). Виртуальные испытания позволяют выявить возможные механические повреждения, сделать выводы о конструктивной прочности АЭ, определить степень годности АЭ, оценить ухудшение заданных значений параметров АЭ.

Описание алгоритма проведения математического моделирования АЭ на воздействие синусоидальной или случайной широкополосной вибрации. Моделирование АЭ проводится в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Вначале выбирают одну конкретную частоту и на ней проводят моделирование на воздействие синусоидальной вибрации. Эту частоту определяют путём предварительного анализа конструкции АЭ на собственные частоты. Потенциально каждая собственная частота может оказаться резонансной. Так как собственных частот может быть множество, моделирование может проводиться отдельно на нескольких частотах.

Моделирование проводят, непрерывно увеличивая, а затем уменьшая частоты вибрации. В реальных условиях эксплуатации вибрация является случайной. Поэтому проводится моделирование на её воздействие с заданной спектральной плотностью ускорения в пределах заданного частотного диапазона.

Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ. Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа с шестью степенями свободы.

Параметры гармонической вибрации (числовые значения задаются в техническом задании на разработку АЭ): ускорение g ; диапазон частот, Гц.

Параметры широкополосной случайной вибрации (числовые значения задаются в техни-

ческом задании на разработку АЭ): спектральная плотность, S , $g^2/\text{Гц}$; диапазон частот, Гц.

В случае отсутствия физико-механических параметров материалов АЭ проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

В случае отсутствия параметров виброизоляторов проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

Перед процессом моделирования проводится подготовка моделей: 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в CAD-системах; 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в систему моделирования АЭ на механические воздействия.

Проводятся виртуальные испытания на воздействие гармонической вибрации и на воздействие случайной широкополосной вибрации в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие гармонической и случайной вибрации. Определяются зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты. Также определяются среднеквадратичные значения ускорений при случайной вибрации.

По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором приводится информация об оцениваемых характеристиках. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия гармонической вибрации на модель, график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели, иденти-

фицированные параметры, график входного воздействия гармонической и случайной вибрации на АЭ, график выходного воздействия гармонической и случайной вибрации в контрольной точке АЭ, оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения.

Наряду с моделированием на воздействие многократных ударов проводят **моделирование на воздействие одиночных и многократных механических ударов**, которым могут подвергаться АЭ в период эксплуатации или при транспортировании.

Описание алгоритма проведения математического моделирования АЭ на ударное воздействие. Моделирование на воздействие одиночных ударов АЭ проводится в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Длительность действия ударного ускорения определяется по осциллограмме.

Оцениваемыми характеристиками являются ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения. Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ. Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа.

При моделировании должна использоваться корректная 3D-модель АЭ.

Параметры одиночного механического удара: максимальное значение ударного ускорения, время воздействия удара.

Параметры многократного механического удара: максимальное значение ударного ускорения одного импульса, длительность одного ударного импульса, число ударных импульсов.

В случае отсутствия физико-механических параметров материалов АЭ проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от времени удара в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

В случае отсутствия параметров виброизоляторов проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при

идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

Перед процессом моделирования проводится подготовка моделей: 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в САД-системах; 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций АЭ в систему моделирования изделий на механические воздействия.

Проводятся виртуальные испытания АЭ на воздействие одиночного и многократного механического удара с применением моделирования. Определяются зависимости ускорения удара от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором приводится информация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия одиночного механического удара на модель, график выходного воздействия одиночного механического удара в контрольной точке модели, идентифицированные параметры, график входного воздействия одиночного и многократного механического удара на АЭ, график выходного воздействия одиночного и многократного механического удара в контрольной точке АЭ.

Математическое моделирование АЭ на линейное ускорение проводится по алгоритму, аналогичному алгоритму моделирования на ударные воздействия, за исключением следующих пунктов.

1. Параметры линейного ускорения: пиковое линейное ускорение, длительность воздействия линейного ускорения.

2. Проводятся виртуальные испытания АЭ на воздействие линейного ускорения с применением моделирования. Определяются зависимости ускорения от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

3. По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором приводится ин-

формация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия линейного ускорения на модель, график выходного воздействия линейного ускорения в контрольной точке модели, идентифицированные параметры, график входного воздействия линейного ускорения в контрольной точке АЭ.

Моделирование на воздействие акустического шума проводят в целях определения способности изделий выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм, указанных в стандартах и технических условиях на изделия в условиях воздействия повышенного акустического шума.

Описание алгоритма проведения математического моделирования АЭ на воздействие акустического шума. В зависимости от условий эксплуатации АЭ проводится моделирование либо на воздействие детерминированного значения давления акустического шума на каждой частоте заданного диапазона, либо на воздействие случайного акустического шума.

Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ. Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа.

Параметры акустического шума (числовые значения задаются в техническом задании на разработку АЭ): уровень звукового давления, дБ; диапазон частот, Гц.

В случае отсутствия физико-механических параметров материалов АЭ проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

В случае отсутствия параметров виброизоляторов проводится их идентификация. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от

частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

Проводится подготовка моделей: 3D-моделей в формате STEP конструкций изделий без виброизоляторов в САД-системах; 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций АЭ в систему моделирования изделий на механические воздействия.

Проводятся виртуальные испытания на воздействие акустического шума в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие акустического шума. Определяются зависимости ускорения от частоты акустического шума в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты.

По результатам виртуальных испытаний составляется отчет, в котором приводится информация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию: описание модели, график входного воздействия гармонической вибрации на модель, график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели, идентифицированные параметры, график входного воздействия акустического шума на АЭ, график выходного воздействия акустического шума в контрольной точке АЭ.

Разработка алгоритма моделирования электромагнитных процессов, протекающих в авиационной электронике. Алгоритм моделирования воздействия электромагнитного поля на корпус АЭ включает в себя следующие этапы:

1. Импорт 3D-модели в формате STEP или IGES, включая исходную модель кабельных трасс между элементами конструкции АЭ.
2. Задание электрофизических параметров материала корпуса АЭ.

3. Формирование параметров источника электромагнитного возбуждения:

1) падающая плоская волна: позиция источника возбуждения (координаты по осям X, Y, Z); координаты вектора поляризации электрического поля по осям X, Y, Z ; координаты вектора распространения электрического поля по осям X, Y, Z ;

2) диполь Герца: позиция источника возбуждения (координаты по осям X, Y, Z); произведение силы тока на длину диполя (по осям X, Y, Z); радиус окружающей сферы (внутри этой сферы амплитуда поля будет равной амплитуде, вычисленной на поверхности этой сферы); тип диполя: электрический диполь (магнитная токовая петля) или магнитный диполь (электрическая токовая петля);

3) цилиндрическая волна: позиция источника возбуждения (координаты по осям X, Y, Z); координаты вектора тока по осям X, Y, Z ; радиус окружающего цилиндра (внутри этого цилиндра амплитуда поля будет равной амплитуде, вычисленной на поверхности данного цилиндра);

4) гауссов пучок: позиция источника возбуждения (координаты по осям X, Y, Z); координаты вектора поляризации электрического поля по осям X, Y, Z ; координаты вектора распространения электрического поля по осям X, Y, Z ; ширина пучка в точке фокусировки;

5) линейная антенна: позиция источника возбуждения (координаты по осям X, Y, Z); координаты вектора тока по осям X, Y, Z ; длина антенны; радиус окружающего цилиндра (внутри этого цилиндра амплитуда поля будет равной амплитуде, вычисленной на поверхности данного цилиндра).

4. Автоматическое построение конечно-элементной модели электромагнитных процессов в корпусе АЭ.

5. Моделирование корпуса АЭ на воздействие электромагнитного поля в заданном диапазоне частот.

6. Расчёт напряжённостей электрического и магнитного полей в заданном диапазоне частот.

7. Расчёт эффективности экранирования электрического и магнитного полей в заданном диапазоне частот. Её вычисляют по следующей общей формуле [3]:

$$S = 20 \lg \frac{E_{0cp}}{E_{cp}},$$

где E_{0cp} — средняя напряжённость поля в окружающем пространстве; E_{cp} — средняя напряжённость поля в корпусе АЭ.

8. Расчёт величины наведённого тока в кабельных трассах между элементами конструкции АЭ. Расчёт завершают, если наведённый ток меньше предельно допустимого. В противном случае вносят изменения в конфигурацию кабельной трассы и расчёт повторяют.

9. Автоматическое формирование промежуточного отчёта.

10. Анализ полученных результатов.

11. Корректировка конструкции АЭ в случае превышения рассчитанной напряжённости электрического поля над допустимым значением.

Разработка алгоритма прогнозирования усталостных разрушений в авиационной электронике при механических и нестационарных тепловых воздействиях. При длительном воздействии вибраций и акустических шумов на АЭ возможно усталостное разрушение элементов конструкции, в том числе корпусов блоков, внешних выводов электронной компонентной базы (ЭКБ), внутренних выводов интегральных микросхем. Это так называемая многоцикловая усталость. Усталостные разрушения элементов конструкций АЭ могут произойти и при кратковременном воздействии многократного механического удара. Это так называемая малоцикловая усталость.

При нестационарных тепловых воздействиях из-за усталости могут разрушаться внутренние шариковые и столбиковые выводы интегральных микросхем. Это связано с тем, что внутри современных микросхем может использоваться множество различных материалов, имеющих различные коэффициенты объёмного расширения. Даже при стационарном тепловом воздействии из-за различных коэффициентов объёмного расширения возникают статические механические напряжения и деформации внутри микросхем. К усталости они привести не смогут, так как возникающие термомеханические напряжения не являются знакопеременными. Однако, когда возникающие статические термомеханические напряжения превышают предел прочности материала, они могут привести к мгновенным поломкам. А если на статические термомеханические напряжения накладываются ещё и динамические термомеханические напряжения, возникающие из-за периодических изменений температуры, то итоговые знакопеременные термомеханические напряжения могут превысить предел усталости материала. В итоге возрастает веро-

ятность усталостных разрушений внутренних выводов микросхем.

Ещё опаснее для микросхем, применяемых в АЭ, одновременные механические и нестационарные тепловые воздействия. В этом случае время до усталостного разрушения резко уменьшается по сравнению с отдельным механическим или отдельным нестационарным тепловым воздействием.

Алгоритм прогнозирования усталостных разрушений в АЭ при механических и нестационарных тепловых воздействиях:

1. Идентификация усталостных параметров материалов конструкций АЭ, к которым относятся:

предел усталости σ_0 ;

тангенс угла наклона усталостной кривой к оси абсцисс (параметр m), зависящий также от размеров и формы;

характеристика A усталостной кривой АЭ, определяемая в соответствии с уравнением

$$N_p \sigma_0^m = A,$$

где N_p — число циклов до разрушения;

коэффициент усталостной прочности σ'_f ;

показатель усталостной прочности b ;

коэффициент усталостной пластичности ε'_f ;

показатель усталостной пластичности c .

Задача идентификации решается путём сравнения результатов натурных испытаний на усталость при воздействии гармонической вибрации и результатов моделирования с использованием методов оптимизации. Идентифицированные усталостные параметры материалов конструкций АЭ постоянно заносятся в базу данных и используются в расчётах усталостных характеристик при механических и тепловых воздействиях.

2. Расчёт усталостных характеристик конструкций АЭ, подверженных воздействию гармонической вибрации, по формулам, приведённым в работе [2].

3. Расчёт усталостных характеристик конструкций АЭ, подверженных воздействию случайной вибрации, по формулам, приведённым в работе [2].

4. Расчёт усталостных характеристик конструкций АЭ, подверженных воздействию многократного механического удара, с использованием известного уравнения Мэнсона—Коффина—Басквина.

5. Расчёт усталостных характеристик конструкций АЭ, подверженных воздействию

акустического шума, по формулам, приведённым в работе [2].

6. Расчёт усталостных характеристик конструкций АЭ, подверженных нестационарному тепловому воздействию, с использованием известного уравнения Мэнсона—Коффина—Басквина.

7. Определение минимального времени до усталостного разрушения при всех одновременно приложенных к АЭ механических и нестационарных тепловых воздействиях.

8. Сравнение минимального времени до усталостного разрушения с временем эксплуатации АЭ. Оно должно быть больше. В противном случае необходимо внести изменения в конструкцию АЭ.

Разработка алгоритма формирования электронной модели цифрового двойника авиационной электроники. Электронная модель (ЭМ) цифрового двойника (ЦД) авиационной электроники позволяет оценить соответствие электрических, тепловых, механических, электромагнитных, надёжных характеристик АЭ, полученных в результате моделирования и указанных в техническом задании на разработку АЭ. При этом она позволяет сформировать комплексный критерий такой оценки. С использованием этого критерия под управлением ЭМ ЦД АЭ и на основе существующих прототипов изделий организуется получение нового технического решения. Фактически ЭМ ЦД АЭ решает задачу управления моделированием.

Проекты, созданные внешними приложениями, интегрированными с ЭМ ЦД АЭ, сохраняются в базе данных (БД). Данные приложения имеют контекстный запуск. Во время сохранения в БД обеспечивается целостность проектной информации.

Существует специальный механизм для встраивания программ сторонних разработчиков в интерфейс ЭМ ЦД АЭ. Широкая номенклатура API-функций обеспечивает использование механизмов ЭМ ЦД АЭ при взаимодействии с БД проектов как собственных программ, так и программ сторонних разработчиков.

Ядро ЭМ ЦД АЭ обеспечивает реализацию интегрированной БД. Различные автоматизированные системы могут взаимодействовать с ядром. Оно реализует управление нормативно-справочной информацией, содержащейся в БД проектов. При проектировании АЭ может быть создано несколько версий изделия, имеющих различные состав изделия,

конфигурацию изделия, характеристики объектов БД проектов, технологические данные, потоки работ по проектированию, описание экземпляров и партий изделий, разграничение доступа к объектам БД проектов, которыми также управляет ядро ЭМ ЦД АЭ. В ядре также осуществляются генерация отчётов по результатам моделирования физических процессов в АЭ, созданию карт рабочих режимов ЭКБ, анализу показателей надёжности АЭ; сохранение документации; поиск объектов БД проектов по различным критериям; регистрация утверждений информационных объектов и назначение роли участникам создания ЭМ ЦД АЭ.

В ядре ЭМ ЦД АЭ для представления данных об изделии используются отечественные и международные стандарты в области информационной поддержки изделий (ИПИ), которые положены в основу формирования модели данных ЭМ ЦД АЭ. Данные стандарты регламентируют информацию, хранимую в БД проектов.

ЭМ ЦД АЭ, созданная на базе ИПИ-технологии, охватывает все стадии жизненного цикла (ЖЦ) АЭ и предоставляет возможность всем участникам ЖЦ обмениваться информацией об АЭ в электронном виде. ЭМ ЦД АЭ предполагает использование на различных стадиях ЖЦ АЭ автоматизированных систем, обмен данными между которыми осуществляется в формате ИПИ с обеспечением безопасности передаваемых данных и соблюдением юридических норм права её совместного использования.

Применение ИПИ-технологий позволяет повысить эффективность проектирования, производства и применения АЭ, сократить материальные затраты, значительно повысить надёжность и качество АЭ.

Рассмотрим разработанный *алгоритм формирования электронной модели цифрового двойника авиационной электроники*. ЭМ ЦД АЭ формируется в процессе проектирования АЭ по результатам комплексного моделирования электрических, механических, тепловых и других физических процессов, создания карт рабочих режимов ЭКБ и анализа показателей надёжности АЭ.

На выходе специализированной автоматизированной системы создания электрических схем формируется файл с данными для spice-моделирования. Он сохраняется в БД проектов и используется для анализа электрических характеристик и автоматизированного проектирования печатных плат.

На выходе системы автоматизированного проектирования печатных плат автоматически формируются файлы в форматах PDIF и IDF, содержащие информацию о размещении ЭКБ на печатной плате. Эти файлы сохраняются в БД проектов. По специальному запросу они передаются в САД-систему, в которой создаются 3D-модели и чертежи печатных узлов (ПУ), представляющих собой совокупность печатных плат и ЭКБ. Также по специальному запросу данные файлы передаются в специализированную в области электроники САЕ-систему, предназначенную для анализа тепловых и механических характеристик ПУ.

На выходе САД-системы автоматически формируются файлы в форматах IGES и STEP, содержащие информацию о 3D-моделях блоков АЭ. Эти файлы сохраняются в БД проектов. По специальному запросу они передаются в специализированную в области электроники САЕ-систему, в которой моделируются механические процессы в блоках АЭ. Также по специальному запросу файлы в форматах IGES и STEP передаются в специализированную в области электроники САЕ-систему, в которой моделируются тепловые процессы в блоках АЭ.

Полученные по результатам работы специализированной в области электроники САЕ-системы статические и динамические механические и тепловые характеристики конструкций блоков АЭ сохраняются в БД проектов.

Полученные по результатам работы специализированной в области электроники САЕ-системы температуры воздуха в узлах моделей блоков АЭ и ускорения в местах крепления ПУ в блоках АЭ передаются в специализированную в области электроники САЕ-систему, предназначенную для расчёта тепловых и механических характеристик ПУ.

Полученные по результатам работы специализированной в области электроники САЕ-системы, предназначенной для расчёта тепловых и механических характеристик ПУ, температуры и ускорения ЭКБ сохраняются в БД проектов.

Входными данными подсистемы создания карт рабочих режимов ЭКБ являются электрические характеристики, температуры и ускорения ЭКБ. Файлы с этими данными передаются из БД проектов, а результаты сохраняются в БД проектов.

Входными данными подсистемы анализа показателей надёжности АЭ являются электрические характеристики и температуры

ЭКБ. Файлы с этими данными передаются из БД проектов, а результаты сохраняются в БД проектов. В перечень входных данных, например, входят температура окружающей среды и ЭКБ, рабочая и допустимая мощности рассеяния ЭКБ, рабочий и допустимый токи в ЭКБ, рабочее и допустимое напряжения в ЭКБ, расчётные механические напряжения в несущей конструкции ЭКБ. Все параметры ЭКБ считываются из базы данных ЭКБ и материалов. В перечень выходных данных входят показатели безопасности: назначенный ресурс, назначенный срок службы.

Цифровой двойник АЭ включает в себя:
дерево АЭ (электронный шкаф — электронный блок — ПУ — ЭКБ);

техническое задание на разработку АЭ;
геометрические 3D-модели составных частей изделия;

STEP-модели электронных шкафов, электронных блоков, ЭКБ;

IDF-модели ПУ;
модели электрических схем с возможностью просмотра и редактирования в составе электронной модели;

модели физических процессов в конструкциях составных частей изделия;

результаты виртуальных испытаний;

результаты натурных испытаний.

Разработанные и описанные процессы интеграции автоматизированных систем и подсистем позволяют осуществить сквозное автоматизированное проектирование АЭ на основе комплексного моделирования электрических, механических, тепловых и других физических процессов, создания карт рабочих режимов ЭКБ и анализа показателей надёжности АЭ и в конечном итоге получить полноценную ЭМ ЦД АЭ, что крайне необходимо для развития и внедрения ИПИ-технологий на предприятиях.

В ЭМ ЦД АЭ могут быть внесены изменения на всех стадиях ЖЦ АЭ. Применение ЭМ ЦД АЭ позволяет значительно повысить эффективность управления проектированием АЭ. ЭМ ЦД АЭ хранится у головного исполнителя проекта. В случае производственной необходимости к ней предоставляется доступ представителям организаций — соисполнителей проекта и других заинтересованных организаций.

Работа выполнена по договору № 91ГСЦТС10-D5/61789 от 23.09.2020 г. о предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Разработка прототипа программно-методического комплекса создания цифровых двойников авиационной электроники и его испытания» с ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

Библиографические ссылки

1. Шалумов А.С., Орлов А.В. Математические модели и методы анализа тепловых процессов: учеб. пособие. Ковров: Ковровская гос. технолог. акад., 2003. 152 с.

2. Шалумов А.С. Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов: учеб. пособие. Ковров: Ковровская гос. технолог. акад., 2001. 296 с.

3. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. М.: Группа ИДТ, Изд. дом «Технологии», 2010. 470 с.

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Шалумова Н.А., Шалумов М.А. Цифровой двойник авиационной электроники: моделирование физических процессов при формировании электронной модели // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 403—415.

Уважаемые читатели!

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

Цены за публикацию умеренные.



М.В. Галактионов, С.В. Николаев, канд. техн. наук, доц.
(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова;
филиал МАИ «Взлёт», г. Ахтубинск)
nikozavr@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНЫХ АТАК ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ НАВЕДЕНИЯ НА ВОЗДУШНУЮ ЦЕЛЬ

Рассмотрен расчётный способ построения области возможных атак по воздушной цели при применении различных средств поражения, методов наведения и средств обнаружения. Расчёт области возможных атак проводился для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Выявлены основные параметры и их влияние на область возможных атак.

Ключевые слова: воздушная цель; область возможных атак; метод наведения.

The design method for constructing the area of possible attacks against an air target using various means of destruction, guidance methods and detection means is considered. The calculation of the area of possible attacks was carried out for the horizontal and vertical planes. The main parameters and their influence on the area of possible attacks are revealed.

Keywords: air target; area of possible attacks; guidance method.

Введение. Область возможных атак (ОВА) воздушной цели (ВЦ) — это область пространства, из которой возможно самонаведение перехватчика с последующим успешным применением средств поражения [1, 2]. Наведение на ВЦ заключается в управлении движением истребителя и выводе его в тактически выгодное относительно воздушного противника положение, обеспечивающее обнаружение противника с помощью бортовых средств или визуально и выполнение атаки [3]. ОВА ВЦ является одним из показателей, определяемых и оцениваемых при проведении испытаний по оценке боевых возможностей и боевой эффективности авиационного комплекса [4]. Анализ ОВА и области возможного применения средств поражения позволяет выявить оптимальные методы атаки воздушной цели. Существуют различные методы наведения: «погоня», «погоня с упреждением», «прямое наведение», «перехват», «манёвр», комбинированный метод и др. У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки. Целесообразность их применения определяется начальными условиями на различных этапах наведения.

Способ построения ОВА ВЦ. Рассмотрим ОВА ВЦ при наведении на цель методом «погоня». ОВА ВЦ имеет ряд характерных границ и ограничений. Ближняя граница области ($D_{\text{без}}$)

обусловлена манёвренными возможностями истребителя, а также условиями завязки боя и определяется минимальной дальностью (D_{min}), с которой истребитель имеет возможность занять положение для атаки цели. Дальняя граница ОВА ($D_{\text{обн}}$) — граница информационного контакта. Она имеет форму окружности, как правило, с переменным радиусом и зависит от того, с помощью каких средств происходит поиск целей контакта (визуальное обнаружение, обнаружение с помощью оптико-локационной станции (ОЛС), бортовой радиолокационной станции (БРЛС)).

Расчёт боковых границ ОВА основан на сравнении потребной и располагаемой угловых скоростей вращения траектории атакующего. Потребная угловая скорость определяется формулой

$$\omega_{\text{потр}} = \frac{V_1 \sin \psi}{r}, \quad (1)$$

где V_1 — скорость истребителя; ψ — курсовой угол; r — дальность до цели.

Располагаемая угловая скорость существенно зависит от того, в какой плоскости — горизонтальной, вертикальной или наклонной — и в каком положении — нормальном или перевернутом — летит атакующий истребитель. В об-

щем случае формула для располагаемой угловой скорости выглядит следующим образом:

$$\omega_{расп} = \frac{g(\cos \lambda \cos \psi + \sqrt{n_y^2 - \sin^2 \psi}) \sin \psi}{V_{ц}}, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; λ — угол между мгновенной и вертикальной плоскостями; n_y — нормальная перегрузка; $V_{ц}$ — скорость цели.

Приравняв потребные и располагаемые угловые скорости и решив уравнение относительно r , получим формулу, определяющую боковые границы ОВА для произвольной мгновенной плоскости

$$r = \frac{V_1 V_{ц} \sin \psi}{g(\cos \lambda \cos \psi + \sqrt{n_y^2 - \sin^2 \lambda})}. \quad (3)$$

При её выводе было сделано допущение, что цель летит в рассматриваемое мгновение в горизонтальной плоскости.

Проведено исследование влияния различных параметров на границы ОВА ВЦ. Анализ формулы (3) показал, что дальность до цели при наведении методом «погоня» зависит от скоростей атакующего истребителя и цели, а также располагаемой перегрузки атакующего истребителя. Результаты расчётов границы ОВА ВЦ при различных значениях перегрузки в горизонтальной плоскости представлены на рис. 1.

При изменении располагаемой перегрузки изменяется и располагаемая угловая скорость, т. е. при большей перегрузке атакующий самолёт будет иметь большую угловую скорость

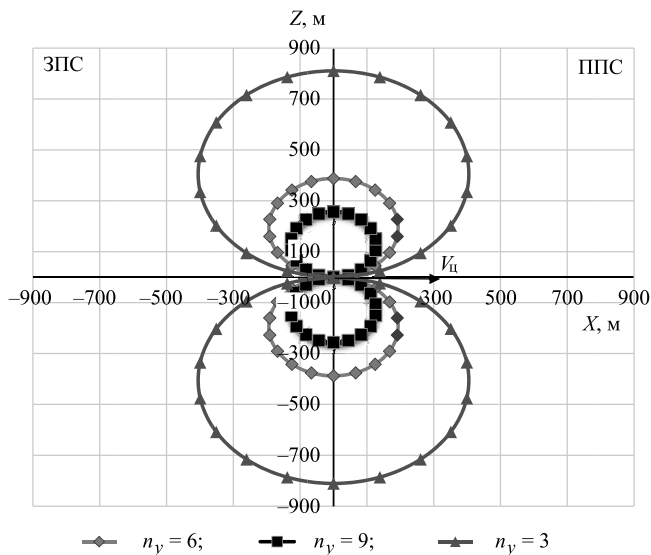


Рис. 1. Области возможных атак по воздушной цели ($D_{min,r}$) в горизонтальной плоскости при различных значениях перегрузки: ЗПС, ППС — передняя и задняя полусферы

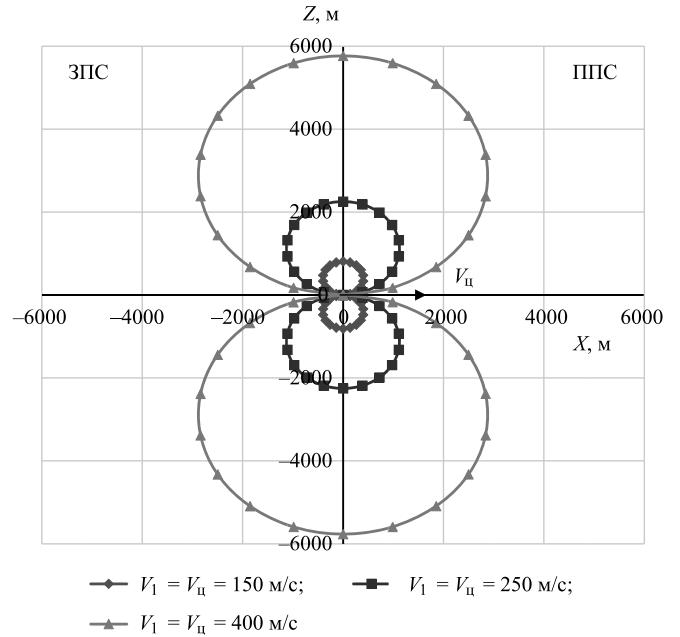


Рис. 2. Области возможных атак по воздушной цели (D_{min}) при различных значениях скоростей истребителя и цели в горизонтальной плоскости, $n_y = 3$

и при меньшем радиусе виража (разворота) и за меньшее время выйдет в ОВА.

Изменение скоростей атакующего истребителя и цели приведёт к изменениям аналогичного характера. С увеличением скоростей полёта атакующего самолета и цели диаметры окружностей, определяющих границы ОВА, увеличиваются прямо пропорционально их произведению. Результаты расчётов границы ОВА ВЦ при различных значениях скоростей истребителя и цели в горизонтальной плоскости представлены на рис. 2.

В случае когда цель летит не в горизонтальной плоскости, боковая граница области возможных атак для произвольной мгновенной плоскости определяется с помощью формулы

$$r = \frac{V_1 V_{ц} \sin \psi}{g(\cos \lambda \cos(\psi + \chi) + \sqrt{n_y^2 - \sin^2 \lambda})}, \quad (4)$$

где χ — угол между вектором скорости V_1 и горизонтальной прямой, проведённой в мгновенной плоскости атаки.

Результаты расчётов границы ОВА ВЦ при наведении методом «погоня» для различных значений перегрузки в вертикальной плоскости представлены на рис. 3.

Возможность полёта перехватчика по траектории самонаведения определяется соотношением между потребной для этого полёта угловой скоростью $\omega_{потр}$ и располагаемой $\omega_{расп}$. Если

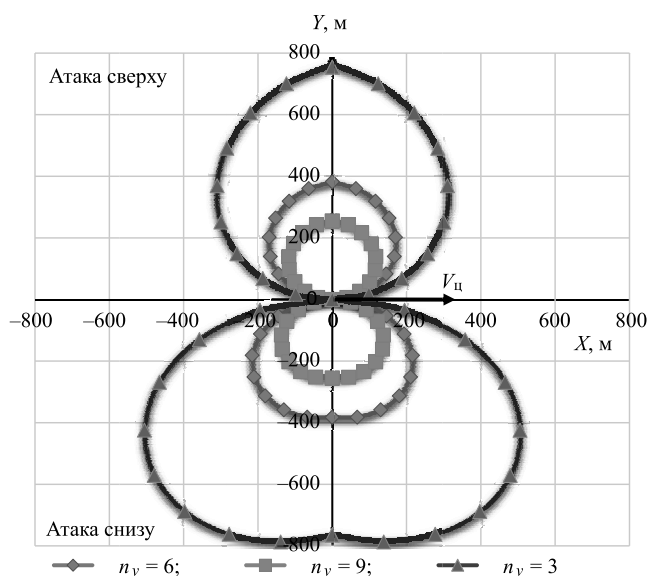


Рис. 3. Области возможных атак по воздушной цели в вертикальной плоскости ($D_{\min \text{ в}}$) при различных значениях перегрузки

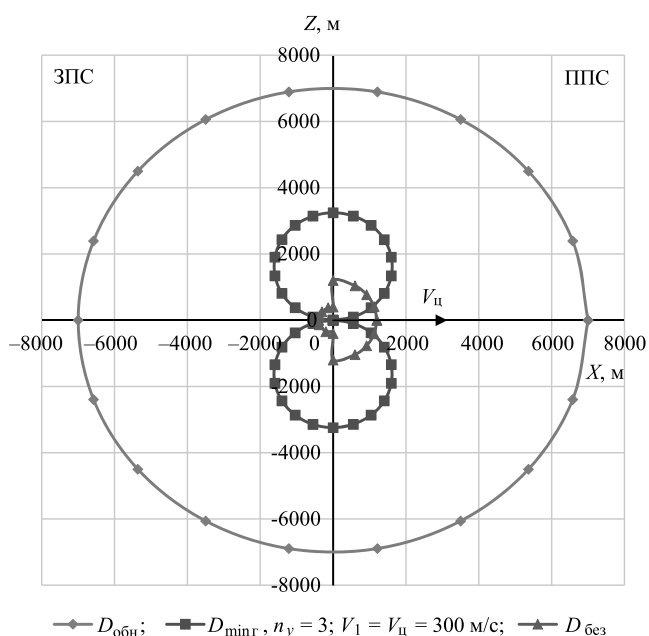


Рис. 4. Область возможных атак по воздушной цели в горизонтальной плоскости ($D_{\min \text{ г}}$) при наведении атакующего истребителя на цель методом «погоня»

$\omega_{\text{расп}} \geq \omega_{\text{потр}}$, то полёт по кривой погоня возможен. В противном случае перехватчик переходит на траекторию полёта с постоянной угловой скоростью $\omega_{\text{расп}}$, что вызывает появление ошибок наведения. Для выявления начальных условий атаки, обеспечивающих безошибочное самонаведение перехватчика в процессе всей атаки, необходимо определять расположенные около цели зоны, при попадании в которые перехватчик не сможет выполнить требуемый полёт. Такие зоны образуются при $\omega_{\text{расп}} \leq \omega_{\text{потр}}$.

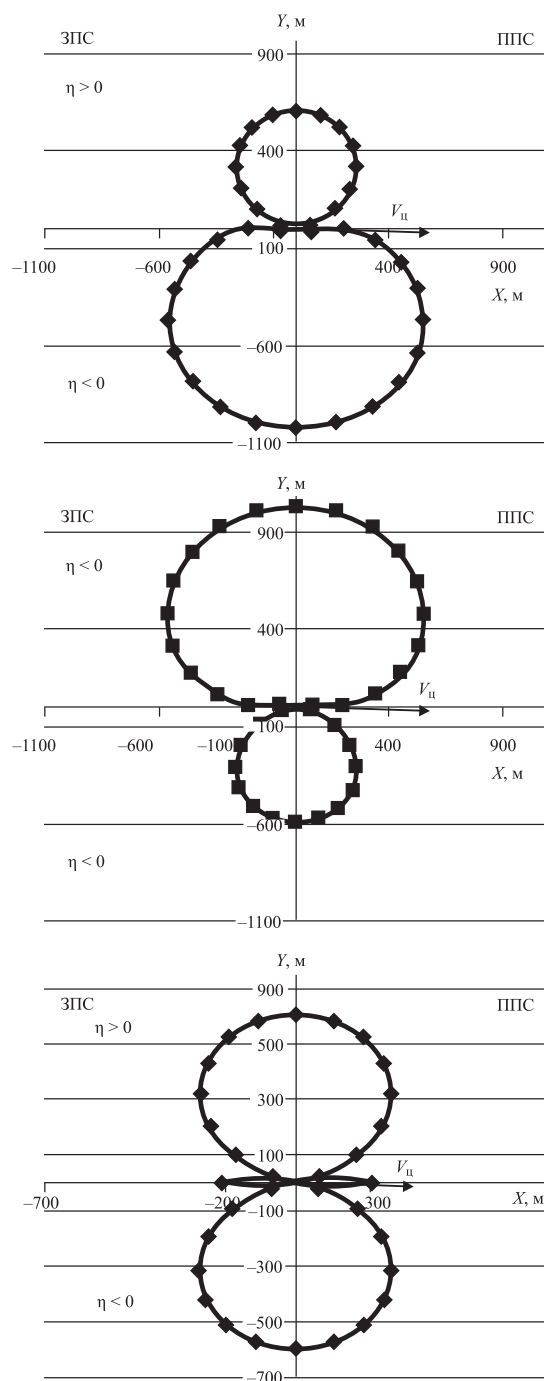


Рис. 5. Области возможных атак по воздушной цели в вертикальной плоскости при наведении атакующего истребителя на цель методом «погоня с упреждением» при различных углах упреждения, $n_y = 3$

Размеры этих зон определяются условиями боевого применения перехватчика и зависят от метода его самонаведения.

ОВА ВЦ в горизонтальной плоскости при наведении атакующего на цель методом «погоня» представлена на рис. 4. Внутри данной области атакующий истребитель может вести прицельный сопроводительный огонь по

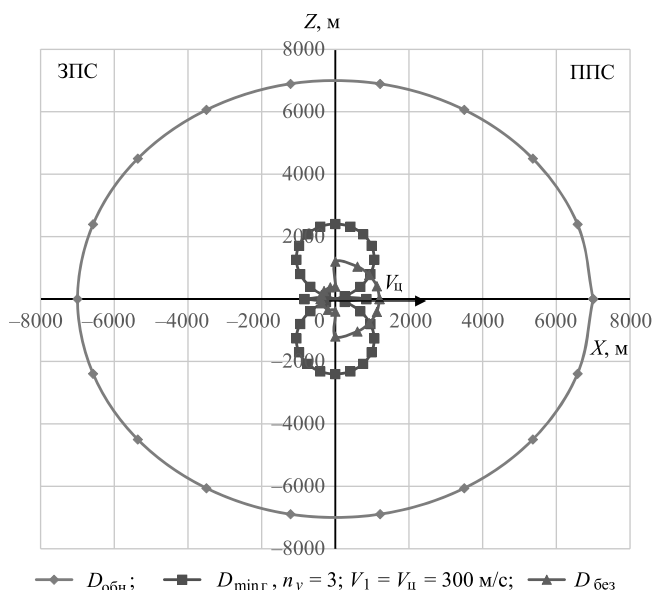


Рис. 6. Область возможных атак по воздушной цели в горизонтальной плоскости при наведении атакующего истребителя на цель методом «погоня с упреждением»

цели. За её пределами такой огонь невозможен, произойдет срыв атаки.

В случае наведения атакующего истребителя на цель методом «погоня с упреждением» ОВА ВЦ претерпевает изменения. Вследствие наличия угла упреждения η формула, используемая для расчёта боковых границ ОВА ВЦ, выглядит следующим образом:

$$r = \frac{V_1 V_u \sin \psi - V_u^2 \sin \eta}{g \sqrt{n_y^2 - 1}} \quad (5)$$

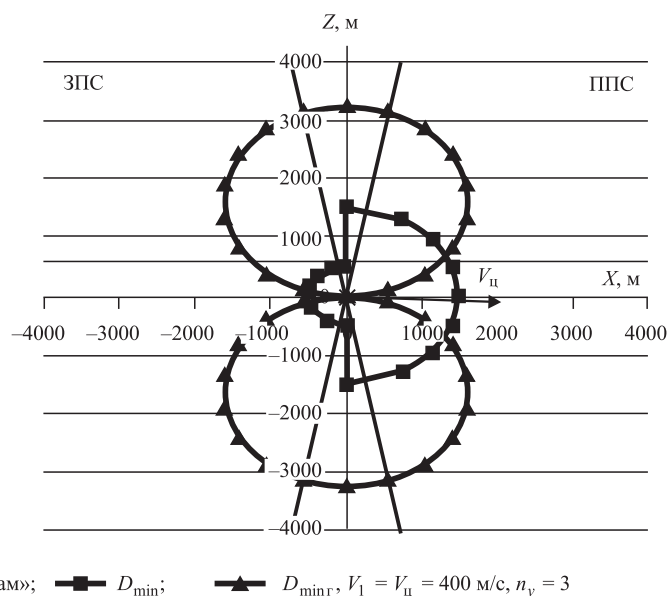
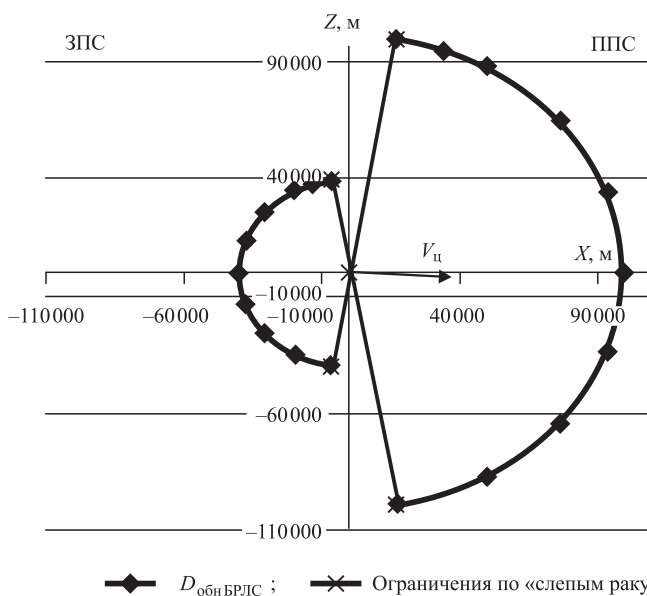


Рис. 7. Области возможных атак по воздушной цели в горизонтальной плоскости при применении ракет класса «воздух—воздух»

На рис. 5 видно, как зависит боковая граница ОВА ВЦ от угла упреждения, его знака.

Области возможных атак по воздушной цели в горизонтальной плоскости при наведении атакующего на цель методом «погоня с упреждением» представлены на рис. 6.

Сравнивая ОВА ВЦ в горизонтальной плоскости при наведении на цель методами «погоня» и «погоня с упреждением», представленные на рис. 4 и 6, можно сделать вывод, что при правильном подборе угла упреждения ОВА ВЦ при наведении атакующего истребителя на цель методом «погоня с упреждением» имеет большие размеры, чем при наведении методом «погоня».

При обнаружении цели БРЛС существенно возрастают расстояния обнаружения (в ППС и ЗПС), однако накладываются ограничения по «слепым ракурсам», вызванными слабым эффектом Доплера в определённых ракурсах. Основные границы ОВА ВЦ при применении ракет класса «воздух—воздух» представлены на рис. 7.

На ОВА существенное влияние оказывает режим ближнего воздушного боя, возможности БРЛС и ОЛС. Так, например, на современных самолётах реализованы следующие режимы ближнего воздушного боя: «Вертикаль», «КАИ», «Оптика» и «Шлем». Зоны захвата в ближнем воздушном бою для разных режимов работы бортового оборудования представлены на рис. 8 [5].

Выводы. Полученные ОВА ВЦ могут быть использованы при проведении испытаний по оценке боевых возможностей и боевой эффек-

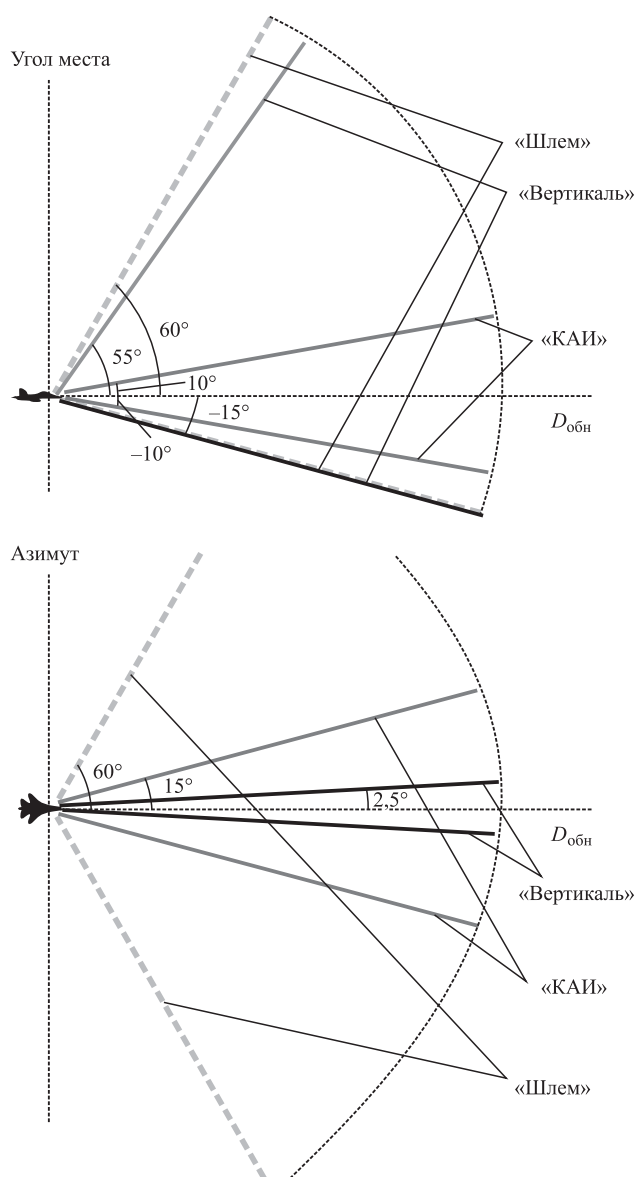


Рис. 8. Области поиска и захвата ВЦ в вертикальной и горизонтальной плоскостях для разных режимов работы бортового оборудования

тивности авиационных комплексов. Стоит отметить, что помимо представленных ограничений и характерных границ ОВА ВЦ на них, могут накладываться ограничения, вызванные особенностями работы конкретных систем летательных аппаратов, определённых средств поражения, используемых систем прицеливания. Проведённые исследования справедливы для истребителя, выполняющего атаку цели, применяя авиационную пушку при наведении на цель методами «погоня» (см. рис. 1...4) и «погоня с упреждением» (см. рис. 5, 6), а также для ракеты класса «воздух—воздух» при наведении методом «погоня» (см. рис. 7). Целесообразно продолжить исследования по тематике данной

статьи, в том числе с использованием информационных технологий и моделирования, которые достаточно хорошо себя зарекомендовали при решении различных задач в практике лётных испытаний [6—10].

Библиографические ссылки

1. Булинский В.А. Динамика маневрирования самолета-истребителя в воздушном бою. М.: Воениздат, 1957. 200 с.
2. Динамика полета: учебник для студентов вузов / А.В. Ефремов, В.Ф. Захарченко, В.Н. Овчаренко и др.; под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Машиностроение — Полет, 2017. 776 с.
3. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / В.К. Бабич и др.; под ред. Е.А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 815 с.
4. Николаев С.В., Меренцов Д.С. Моделирование возможностей авиационного комплекса в дальнем воздушном бою / Сб. докл. Юбилейной всероссийской науч.-техн. конф. «Авиационные системы в XXI веке». Москва, 26—27 мая 2016 г. С. 382—388.
5. Николаев С.В. Оценка возможностей авиационных комплексов в ближнем воздушном бою // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 1. С. 41—47.
6. Николаев С.В., Тихонов А.А., Меренцов Д.С. Определение в испытаниях вероятности выхода летательного аппарата в информационный контакт с воздушными объектами // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. № 21 (5). С. 78—93.
7. Молчанов А.С. Эффективность цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли в задаче распознавания наземных объектов на основе величин линейного разрешения, полученных по результатам натурных экспериментов // Информация и космос. 2020. № 3. С. 143—152.
8. Nikolaev S.V., Moungh Htang O., Latt K.Z. Determination of aerodynamic parameters in various conditions of input signal // IOP conference series: materials science and engineering 2019. Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics. 2020.
9. Корсун О.Н., Николаев С.В. Применение моделирования в практике испытаний летательных аппаратов // CLOUD OF SCIENCE. Т. 5. № 2. 2018. С. 286—299.
10. Корсун О.Н., Николаев С.В., Нестеров В.А., Сыпало К.И. Математическое моделирование при оценке боевых возможностей группы самолетов на этапе испытаний // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2019. № 2 (107). С. 67—75.

Ссылка для цитирования

Галактионов М.В., Николаев С.В. Построение области возможных атак воздушной цели при различных методах наведения на воздушную цель // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 416—420. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-416-420

УДК 681.518+004.93

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-421-426

М.Т. Найнг, А.И. Гаврилов, канд. техн. наук, доц., **Л.Т. Ньян**
 (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
К.З. Кхант, Н.Х. Ньи
 (Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»)

naingminhtun52@gmail.com; alexgavrilov@mail.ru; nyanlin54@gmail.com;
 khantkozan52@gmail.com; Snn90.mm@gmail.com

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ СЛАБОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ

Представлен комбинированный метод решения задачи гетерогенного распознавания лиц. Построена блок-схема алгоритма для предложенного комбинированного метода. Предложен модифицированный подход на основе базовой модели CycleGAN к решению задачи преобразования домена изображения и проведён анализ результатов производительности преобразования. Проведена оценка эффективности предложенного алгоритма в различных условиях. Показаны результаты сравнения предложенного подхода с другими современными методами.

Ключевые слова: преобразование изображений; генеративная состязательная сеть; распознавание лиц; глубокое обучение.

The article presents a combined method for solving the problem of generative recognition of face. The block diagram of the algorithm for the proposed combined method is constructed. A modified approach based on the basic CycleGAN model to solving the problem of transforming domain of an image is proposed and an analysis of the conversion performance results is carried out. Evaluation of the effectiveness of the proposed algorithm under various conditions is carried out. The comparison results of the proposed approach with other modern methods are shown.

Keywords: transformation of images; generative adversarial network; face recognition; deep learning.

Распознавание лиц стало одним из самых активно развивающихся направлений исследований в области компьютерного зрения вследствие его потенциальной ценности для многих приложений, таких как системы безопасности и криминалистического наблюдения. Несмотря на значительный прогресс в этой области, на распознавание лиц в значительной степени влияет освещение [1]. Следовательно, большое значение имеют методы, обеспечивающие высокоточное извлечение признаков с высокой устойчивостью к изменениям. В настоящее время большинство исследователей сосредоточились на распознавании лиц в видимой области. Однако главной проблемой этих исследований является высокая зависимость систем распознавания лиц от вариаций освещённости и даже цвета кожи.

Камеры наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне часто используются для получения изображения в условиях низкой освещённости. Цифровые изображения в ближнем инфракрасном диапазоне позволяют определять присутствие электромагнитного излучения за

пределами диапазона видимого света (в частности, оптического излучения с длиной волны в диапазоне 0,7...1,4 мкм). Изображения, полученные в ближнем инфракрасном спектре, достаточно близки к спектру видимого света. Также возможно захватывать структуру лица без изменения его внешнего вида при изменениях освещённости в видимом свете. Пример изображений в ближнем инфракрасном (NIR) и видимом диапазоне (VIS) приведён на рис. 1.

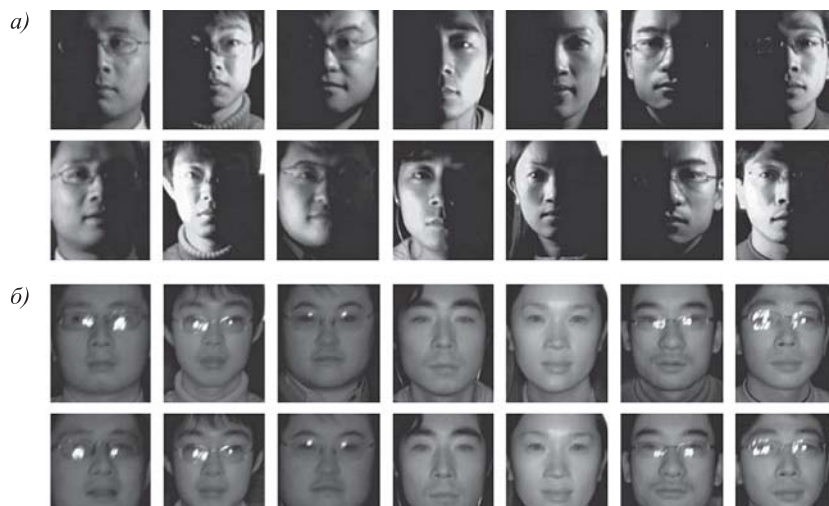


Рис. 1. Видимые изображения при наличии вариаций освещённости (а) и соответствующие изображения в ближнем инфракрасном диапазоне (б) [2]

Камеры ночного видения, захватывающие NIR-изображения, можно использовать для систем распознавания лиц. Для решения задачи криминалистики невозможно собирать NIR-изображения в целях обучения модели распознавания лиц, потому что криминалистическая задача характеризуется отказом от сотрудничества с человеком, который идентифицирован. Прямое применение модели распознавания лиц, обученной с использованием данных, полученных для видимого света (VIS), к данным NIR-изображения не даёт удовлетворительной точности распознавания. Многие исследователи предложили свои подходы, при которых NIR-изображения сопоставляются с VIS-изображениями, находящимися в обученной базе данных. Такой подход, при котором сопоставляются изображения из двух различных областей, называется гетерогенным распознаванием лиц (ГРЛ).

Наиболее изученной темой в области гетерогенного распознавания лиц является сопоставление лиц в различных спектральных (или сенсорных) областях, которое отличается от обычного VIS-распознавания лиц в однородных условиях [3, 4]. Поскольку получение крупномасштабных парных изображений лиц из разных спектральных областей является дорогостоящим и трудоёмким процессом, современные методы глубокого ГРЛ основываются на использовании свёрточной нейронной сети (СНС), обученной на веб-наборе данных VIS-изображений, а затем точно настраивают сеть на наборе данных NIR-VIS для получения лучшей эффективности ГРЛ [5—7]. В последнее время для распространения методов распознавания лиц на основе VIS-изображений на другие спектральные области большое внимание уделяется методам синтеза лиц [8—11]. В работе [10] предложено низкоранговое встраивание для синтеза гетерогенного изображения патч-способом. В работе [11] использованы генеративные состязательные сети (ГСС) [12] с двухпутевой моделью для синтеза VIS-изображений из NIR-изображений [8, 9]. Одним из основных преимуществ этих методов синтеза является то, что данные синтезированные видимые изображения лиц могут быть использованы с помощью любого метода VIS-распознавания лиц, обученного на данных VIS-лиц, чтобы сопоставить синтезированное изображение с зарегистрированными VIS-изображениями [9, 10]. В работе [13] представлена базовая CycleGAN модель синтеза VIS-изображений из NIR-изображений и применены синтезированные

VIS-изображения к предварительно обученной модели VIS-распознавания лиц.

Использование модели преобразования предметной области изображения, основанной на базовом цикле CycleGAN, приводит к плохому качеству синтезированных VIS-изображений, что может привести к низкой точности системы распознавания лиц. Для решения этой проблемы в настоящей статье предлагается модифицированная модель преобразования домена изображения, основанная на базовой модели CycleGAN.

Модель преобразования домена изображения. Базовая модель CycleGAN представлена в работе [14]. Архитектура этой модели состоит из двух генераторов (G , F) и двух дискриминаторов (D_x , D_y). Каждый генератор имеет соответствующую модель дискриминатора. Функция генератора — синтез изображений, а функция дискриминатора — поиск различий между реальными и синтезированными изображениями. Структура базовой модели CycleGAN показана на рис. 2.

Генератор G синтезирует изображения, дискриминатор D_y пытается различить эти изображения и реальные изображения из домена Y , а дискриминатор D_x различает реальные изображения из домена X и изображения, синтезированные генератором F .

Для генератора $G : X \rightarrow Y$ базовой модели CycleGAN и связанного дискриминатора D_y , состязательная потеря формируется следующим образом:

$$L_{adv}(G, D_y, X, Y) = \mathbb{E}_{y \sim p_{data(y)}} [(D_y(y) - 1)^2] + \mathbb{E}_{x \sim p_{data(x)}} [(D_y(G(x)))^2],$$

где $p_{data(x)}$ и $p_{data(y)}$ — выборочные распределения x и y в областях X и Y соответственно; \mathbb{E}_x , \mathbb{E}_y — ожидаемые значения для реальных и синтезированных данных соответственно.

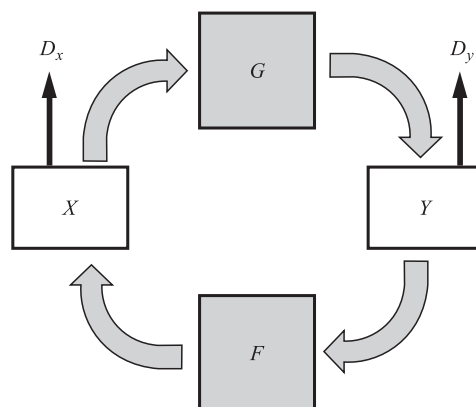


Рис. 2. Структура базовой модели CycleGAN

Для генератора $F : Y \rightarrow X$ и связанного с ним дискриминатора D_x состязательная потеря

$$L_{adv}(F, D_x, Y, X) = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [(D_x(x) - 1)^2] + \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [(D_y(F(y)))^2].$$

Таким образом, общая потеря состязательно-сти может быть представлена в виде

$$L_{adv} = L_{adv}(G, D_y, X, Y) + L_{adv}(F, D_x, Y, X).$$

Для восстановления исходного изображения после цикла преобразования потери цикл-консистенции представляются в виде [10]

$$L_{cyc} = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\|F(G(x)) - x\|_1] + \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [\|G(F(y)) - y\|_1].$$

Полная потеря для обычной модели CycleGAN может быть представлена следующим образом:

$$L_{sum} = \lambda_1 L_{adv} + \lambda_2 L_{cyc},$$

где λ_1, λ_2 — весовые коэффициенты.

При использовании базовой модели CycleGAN с определённой таким образом функцией потерь L_{sum} результаты преобразования неудовлетворительны. Результаты преобразования домена изображения с использованием базовой модели CycleGAN представлены на рис. 3.

Чтобы получить хороший результат преобразования, необходимо внести изменения в базовую модель CycleGAN. Для этого предлагается использовать ещё две функции потерь: потери идентичности и потери границы. Потери идентичности и границы будут добавлены отдельно от общей потери модели



Рис. 3. Результат преобразования домена изображения с помощью базовой модели CycleGAN

CycleGAN. Функция потери идентичности представляется следующим образом:

$$L_{identity} = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\|F(x) - x\|_1] + \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [\|G(y) - y\|_1].$$

Функция потери границы

$$L_{edge} = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\|E_d(G(x)) - E_d(x)\|_1] + \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [\|E_d(F(y)) - E_d(y)\|_1],$$

где E_d — сеть для извлечения границ в целях вычисления предполагаемой потери удержания границ.

Использование функции потери идентичности оптимизирует модель CycleGAN во время обучения. Использование функции потери границы улучшает структурное представление генерируемых изображений. Границы получены с помощью оператора Превитта [15], а затем их модели обучены сетями U-Net из модели Pix2pix с помощью пар изображений (изображение—граница). Общая функция потерь предложенной модели CycleGAN может быть записана следующим образом:

$$L_{sum} = \lambda_1 L_{adv} + \lambda_2 L_{cyc} + \lambda_3 L_{identity} + \lambda_4 L_{edge},$$

где $\lambda_1 \dots \lambda_4$ — весовые коэффициенты.

Структура предложенной модели CycleGAN показана на рис. 4.

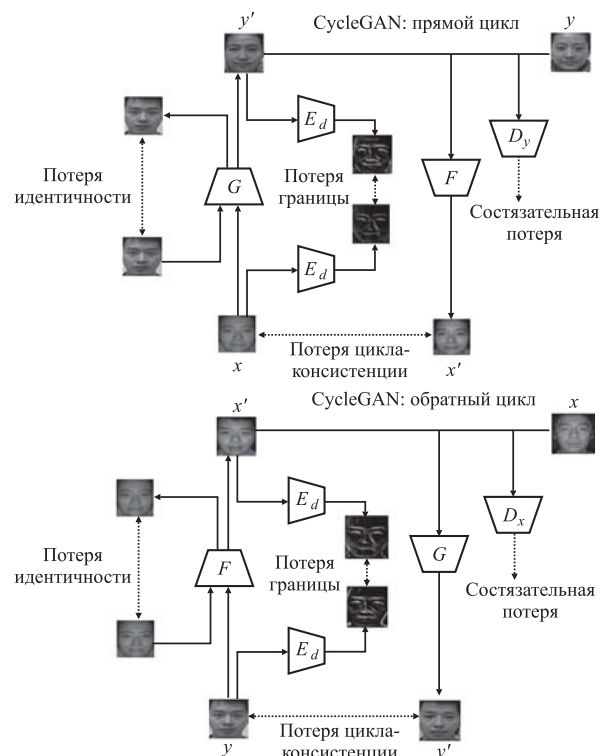


Рис. 4. Структура предложенной модели CycleGAN

Решение задачи распознавания. В данной статье выделяются четыре основных этапа функционирования системы. На первом этапе обнаружение лиц проводится с помощью метода Виолы—Джонса. Если захватываемые изображения находятся в ближайшем инфракрасном диапазоне, то на втором этапе производится преобразование домена изображения из NIR в VIS. Преобразованные изображения извлекаются с использованием предварительно обученной модели детектирования при-

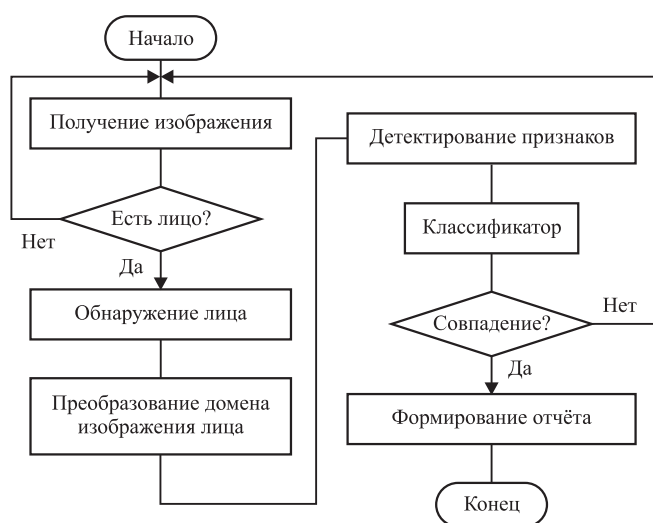


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы предложенной системы распознавания лиц

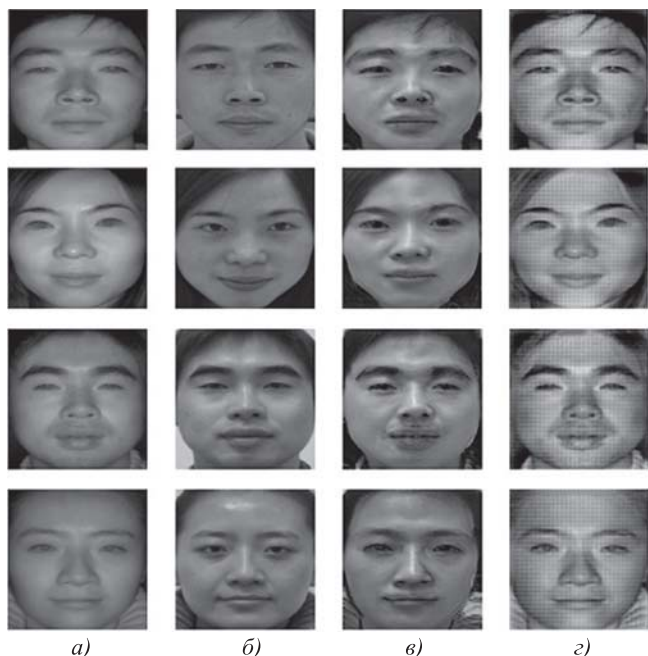


Рис. 6. Результаты преобразования:

а — исходный домен; *б* — целевой домен; *в* — изображения, преобразованные с помощью предложенной модели CycleGAN; *г* — изображения, преобразованные с помощью базовой модели CycleGAN

знаков на третьем этапе. На четвертом этапе работает обученная модель классификации на основе извлеченных признаков. На рис. 5 показана блок-схема алгоритма работы системы распознавания лиц в условиях низкой освещенности или темной окружающей среды.

В системе идентификации лица важную роль играет высокоэффективный модуль детектирования признаков лица. В представленной в данной статье работе использовали предварительно обученную модель FaceNet [16] в качестве модуля детектирования черт лица, которая обеспечивает удовлетворительные результаты в различных базах данных изображений лиц. Возможно извлечь требуемые черты лица в виде 128-мерных данных из каждого входного изображения лица с помощью предварительно обученной модели FaceNet. После детектирования признаков лица, использовали линейную машину опорных векторов (SVM) в качестве классификатора для целей идентификации лица.

Результаты экспериментов. Для того чтобы получить модель преобразования домена изображения, предложенная модель CycleGAN была обучена на графическом процессоре Google Colab. В качестве обученных данных использовали базу данных CASIA NIR-VIS 2.0. Результаты преобразования изображений с помощью предложенной модели CycleGAN представлены на рис. 6.

Для анализа предложенной модели преобразования домена изображения и выявления преимуществ предложенного алгоритма разработаны четыре варианта экспериментов.

Простые VIS-изображения. Использовались обычные визуальные изображения. Модель преобразования домена изображения не применялась.

Простые NIR-изображения. Модель преобразования домена изображений не применялась. Этот вариант экспериментов позволяет выявить влияние доменного разрыва между NIR и VIS для модели распознавания лиц, обученной исключительно с использованием VIS-изображений.

Базовая модель CycleGAN для NIR-изображений. Базовая модель CycleGAN (без потери идентичности) обучена на базе данных CASIA NIR-VIS 2.0, а сгенерированные визуальные изображения лиц подавались в модель детектирования лиц.

Предложенная модель CycleGAN для NIR-изображений. Предложенная модель CycleGAN (с потерей идентичности) также обучена на

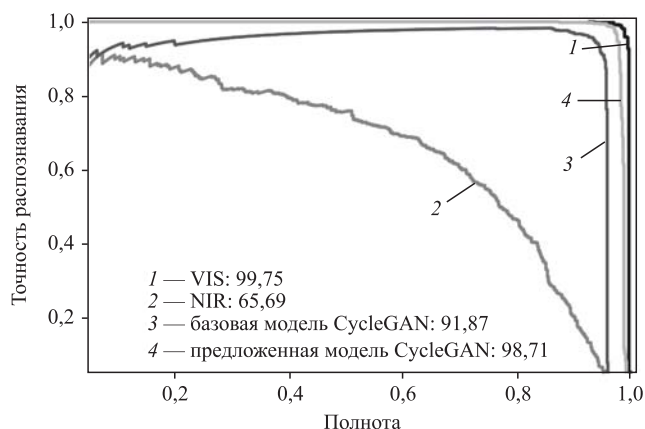


Рис. 7. Полнота результатов четырёх вариантов экспериментов

базе данных CASIA NIR-VIS 2.0. Применены модель детектирования признаков и метод классификации с использованием VIS-данных, полученных по предложенной модели преобразования домена изображения.

Результаты применения предложенного алгоритма для четырех вариантов экспериментов показаны на рис. 7.

Результаты экспериментов показывают, что предложенный подход лучше подхода, основанного на использовании базовой модели CycleGAN, по точности распознавания лиц на 6,84 %. Результаты сравнения предложенного подхода с другими альтернативными гетерогенными подходами распознавания лиц на базе данных CASIA NIR-VIS 2.0 приведены в таблице. Сравнимые современные системы распознавания лиц включают два традиционных метода: DSIFT [17], Gabor + RBM [18] и два метода глубокого обучения: TRIVET [19] и IDR-128 [11].

Точность распознавания лиц с помощью предложенного и альтернативных методов

Метод	Точность распознавания, %
DSIFT	73,3
Gabor + RBM	86,2
TRIVET	95,7
IDR-128	97,3
Базовая модель CycleGAN	91,87
Предложенная модель CycleGAN	98,7

Заключение. В статье представлен комбинированный подход к решению задачи распозна-

вания лиц, в котором используется предложенная модель преобразования домена изображения и предобученные модели обнаружения лиц, детектирования признаков и классификации личностей. Проведены эксперименты по преобразованию NIR-изображений в VIS-изображения с использованием базовой модели CycleGAN и предложена модифицированная модель CycleGAN. Проведено сравнение эффективности преобразования домена изображения при использовании базовой системы CycleGAN и предложенной CycleGAN. Показана блок-схема алгоритма, основанного на предложенном подходе гетерогенного распознавания лиц. Представлены результаты сравнения предлагаемого подхода с альтернативными.

Основным преимуществом предложенного подхода является возможность повышения точности работы системы гетерогенного распознавания лиц. Основной недостаток — необходимость использования высокопроизводительной вычислительной машины во время обучения на множестве данных. Проведённые исследования эффективности применения предложенного комбинированного подхода на NIR-изображениях показали удовлетворительную точность распознавания лиц. Представляется целесообразным проведение исследований по использованию предложенного подхода для решения других задач распознавания лиц, например идентификации личности по эскизам.

Библиографические ссылки

1. Jain A.K., Li S.Z. Handbook of face recognition. Vol. 1. N.Y.: Springer, 2011. P. 103—135.
2. Kong S.G., Heo J., Abidi B.R., Paik J., Abidi M.A. Recent advances in visual and infrared face recognition — a review // Computer Vision and Image Understanding. 2005. Vol. 97. No. 1. P. 103—135.
3. Ouyang S., Hospedales T., Song Y.Z., Li X., Loy C.C., Wang X. A survey on heterogeneous face recognition: Sketch, infra-red, 3D and low-resolution // Image and Vision Computing. 2016. Vol. 56. P. 28—48.
4. He R., Wu X., Sun Z., Tan T. Wasserstein cnn: Learning invariant features for nir-vis face recognition // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2018. Vol. 41. No. 7. P. 1761—1773.
5. Reale C., Nasrabadi N.M., Kwon H., Chellappa R. Seeing the forest from the trees: A holistic approach to near-infrared heterogeneous face recognition // Proceedings of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2016. P. 54—62.
6. He R., Wu X., Sun Z., Tan T. Learning invariant deep representation for nir-vis face recognition // Proceedings of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence. 2017. Vol. 31. No. 1.

7. Sarfraz M.S., Stiefelhagen R. Deep perceptual mapping for cross-modal face recognition // Intern. J. of Computer Vision. 2017. Vol. 122. No. 3. P. 426—438.

8. Riggan B.S., Short N.J., Hu S., Kwon H. Estimation of visible spectrum faces from polarimetric thermal faces // 2016 IEEE 8th Intern. conf. on biometrics theory, applications and systems (BTAS). 2016. P. 1—7.

9. Zhang H., Patel V.M., Riggan B.S., Hu S. Generative adversarial network-based synthesis of visible faces from polarimetric thermal faces // 2017 IEEE Intern. J. Conf. on Biometrics (IJCB). 2017. P. 100—107.

10. Lezama J., Qiu Q., Sapiro G. Not afraid of the dark: Nir-vis face recognition via cross-spectral hallucination and low-rank embedding // Proceedings of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition. 2017. P. 6628—6637.

11. Song L., Zhang M., Wu X., He R. Adversarial discriminative heterogeneous face recognition // Proceedings of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence. 2018. Vol. 32. No. 1.

12. Goodfellow I.J., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative adversarial networks // arXiv preprint arXiv: 1406.2661. 2014.

13. Tun N.M., Gavrilov A.I., Tun N.L., Paing P.P. Face Identification System using Deep Learning Method at Low Lighting Resources // 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2020. P. 2001—2004.

14. Zhu J.Y., Park T., Isola P., Efros A.A. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adver-

sarial networks // Proceedings of the IEEE Intern. conf. on computer vision. 2017. P. 2223—2232.

15. Prewitt J.M. Object enhancement and extraction // Picture processing and Psychopictorics. 1970. Vol. 10. No. 1. P. 15—19.

16. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 815—823.

17. Dhamecha T.I., Sharma P., Singh R., Vatsa M. On effectiveness of histogram of oriented gradient features for visible to near infrared face matching / 22nd Intern. Conf. on Pattern Recognition. 2014. P. 1788—1793.

18. Yi D., Lei Z., Li S.Z. Shared representation learning for heterogeneous face recognition / 11th IEEE Intern. Conf. and workshops on automatic face and gesture recognition (FG). 2015. P. 1—7.

19. Liu X., Song L., Wu X., Tan T. Transferring deep representation for NIR-VIS heterogeneous face recognition // Intern. Conf. on Biometrics (ICB). 2016. P. 1—8.

Ссылка для цитирования

Найнг М.Т., Гаврилов А.И., Ньян Л.Т., Кхант К.З., Ньн Н.Х. Система распознавания лиц на основе метода глубокого обучения при слабой освещённости // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 421—426. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-421-426



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИБРЕСТИ 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



УДК 651:004.81

А.В. Моргунов, канд. техн. наук, доц.

(Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики), г. Новосибирск,

К.С. Астраков

(Новосибирский государственный технический университет)

All122001@mail.ru; konstantinAstr@bk.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТООБОРОТОМ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

Рассмотрены особенности электронного документооборота, используемого в образовательных учреждениях. Приведён набор критериев для оценки эффективности системы электронного документооборота (СЭД) и введена количественная оценка. Проведён анализ задач оптимизации СЭД, а также оценка эффективности её внедрения. Рассмотрены четыре варианта оптимизации СЭД: снижение времени для извлечения документов из системы, сокращение стоимости обмена документами между системами, уменьшение объёма памяти занимаемого документами в СЭД, уменьшение затрат на обновление электронных документов. Представлена схема взаимодействия поисковых систем, используемая в СЭД. Описаны компоненты поисковой системы, необходимые для их взаимодействия: образ поискового документа и образ поискового запроса. Исследование показало, что внедрение СЭД в научно-образовательном учреждении позволяет сократить время на поиск документов, обеспечить максимальную точность выдачи документа по запросу, а также значительную экономию денежных средств. Система обеспечивает целостность, подконтрольность и бесспорность процессов подготовки, согласования и обработки документов в рамках выполнения различных деловых задач, предоставляет широкие возможности для подготовки отчётности по документообороту в масштабах учебных заведений.

Ключевые слова: система электронного документооборота; электронно-библиотечная система; базы данных; интегрированная автоматизированная информационная система; цифровая образовательная среда.

The features of electronic document management used in educational institutions are considered. A criteria set for evaluating the effectiveness of an electronic document management system (EDMS) is given and a quantitative assessment is introduced. An analysis of the optimization problems of EDMS, as well as the assessment of effectiveness of its implementation is presented. Four options for optimizing EDMS are considered: reducing time to search for documents from the system, reducing the cost of exchanging documents among systems, reducing the amount of memory occupied by EDMS documents, reducing the cost of updating electronic documents. The scheme of interaction of search engines used in EDMS is presented. The components of the search engine necessary for their interaction are described: the image of the search document and the image of the search query. The study showed that the introduction of EDMS in a scientific and educational institution can reduce the search time for documents, ensure the maximum accuracy of issuing a document upon request, as well as significant savings in money. The system ensures the integrity, controllability and indisputability of the processes of preparation, approval and processing of documents for performing various business tasks and provides ample opportunities for preparing reports on a document for educational institutions.

Keywords: electronic document management system; electronic library system; databases; integrated automated information system; digital educational environment.

Введение. Информация является чрезвычайно важным ресурсом, который влияет на все сферы экономики. В связи с этим исследования информационных систем электронного документооборота приобретают в наши дни особую актуальность. Постоянный рост объёма информации в образовательных учреждениях обуславливает необходимость современных и высокотехнологичных решений в области её обработки, к которым можно отнести системы электронного документооборота (СЭД).

Создание и внедрение СЭД позволяет автоматизировать процесс обработки документов в учреждениях, в том числе образовательных. Благодаря свойствам СЭД становится возможным, например, решать проблемы, связанные с успеваемостью студентов, отслеживать и корректировать информацию о том или ином студенте в единой системе и использовать её для оптимизации учебного процесса. Кроме того, СЭД может быть использована при создании цифровой образовательной среды [1].

При проектировании СЭД для учебных учреждений необходимо оценить эффективность её внедрения. Для этого можно использовать методику цифрового двойника на различных ИТ-платформах [2].

Определение методов и критериев оценки эффективности внедрения СЭД. Основой СЭД является интегрированная автоматизированная информационная система (ИАИС) [3]. Главными направлениями работы ИАИС являются автоматизация образовательных процессов и обеспечение среды для взаимосвязи студентов и преподавателей [4, 5].

В настоящее время не представляется возможным оценить эффективность внедрения СЭД единым универсальным методом [6]. Рассмотрим набор критериев, который можно использовать в этих целях. Для описания взаимосвязи множеств участников процесса документооборота $\{Y\}$, их действий $\{\Theta\}$ и состояний документов $\{\Phi\}$ будем применять минимаксные и максиминные критерии эффективности. Представим минимаксные критерии следующим образом:

$$\Theta = \min x \max y; \quad x \in X, y \in Y,$$

наименьший показатель эффективности аргумента x при наибольшем значении y [7, 8]. В качестве x и y следует принимать элементы СЭД — множества $\{Y\}$, $\{\Theta\}$, $\{\Phi\}$. Оценка эффективности проводится по следующим категориям:

1. Эффективность с точки зрения действия: позитивная эффективность: минимум $\{\Theta\}$ при максимуме $\{\Phi\}$, минимум $\{\Theta\}$ при максимуме $\{Y\}$;

негативная эффективность: минимум $\{\Theta\}$ при максимуме $\{Y\}$, максимум $\{\Theta\}$ при минимуме $\{\Phi\}$.

2. Эффективность с точки зрения участников:

позитивная эффективность: минимум $\{Y\}$ при максимуме $\{\Theta\}$, минимум $\{Y\}$ при максимуме $\{\Phi\}$;

негативная эффективность: максимум $\{Y\}$ при минимуме $\{\Theta\}$, максимум $\{Y\}$ при минимуме $\{\Phi\}$.

3. Эффективность с точки зрения состояния документов:

положительная эффективность: максимум $\{\Phi\}$ при максимуме $\{\Theta\}$, максимум $\{\Phi\}$ при максимуме $\{Y\}$;

негативная эффективность: минимум $\{\Phi\}$ при минимуме $\{\Theta\}$, минимум $\{\Phi\}$ при минимуме $\{Y\}$.

Наряду с приведёнными выше качественными критериями можно также использовать квантиативную оценку эффективности

$$E_{\Phi\Phi} = |\Phi_3 \cap \Phi_6| / |\Phi_3 \cup \Phi_6|,$$

где Φ_3 — число электронных компонентов документов; Φ_6 — число бумажных компонентов документов [9].

Оценку можно интерпретировать другим образом: электронный документооборот будет эффективно реализован тогда, когда удастся придать электронную сущность большему числу бумажных документов и найти бумажное отображение большему числу электронных процессов [10].

При оптимизации СЭД можно выделить следующие компоненты: объём памяти, который занимают документы в хранилище данных СЭД; временную оценку получения документа из хранилища данных; временную оценку получения документа из информационной системы (ИС). В целом существует возможность вычлнить четыре сценария оптимизации СЭД [11, 12]. Первый сценарий представляет собой снижение затрат времени на извлечение необходимого документа из электронной системы, которые состоят из затрат времени на отправку запроса, поиск документа в системе, формирование документа согласно запросу и отправку пользователю желаемого документа [13]. Аналитическая функция Φ_1 , характеризующая оптимизацию по этому сценарию, имеет вид

$$\Phi_1 = m' + m'' \rightarrow \min,$$

где m' — средняя оценка времени получения документа из хранилища данных; m'' — средняя оценка времени получения документа из информационных систем.

Второй сценарий — сокращение стоимости обмена документами между пользователем и хранилищами данных в СЭД, а также между пользователем и информационными системами. Аналитическая функция Φ_2 , характеризующая оптимизацию по данному сценарию, имеет вид [14]

$$\Phi_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B'_{ij} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{m_i} B''_{ij} \rightarrow \min,$$

где n_i — число документов в i -м хранилище H_i ; m_i — число документов в i -й информационной системе I_i ; N — число хранилищ данных; M — число информационных систем, которые делятся данными с СЭД; B'_{ij} — период трансляции документа d_j между пользователем и хранилищем H_i ; B''_{ij} — период трансляции документа d_j между пользователем и информационной системой I_i .

Третий сценарий — сокращение объёма памяти, занимаемого электронными документами в СЭД [15]. Процесс оптимизации по этому сценарию обеспечивает сокращение неэпизодических издержек на содержание документов в электронной форме и повышение скорости поиска документов в электронной системе [16, 17]. При этом важно принимать во внимание вероятность утраты данных при неосмотрительном удалении документов. Отсюда следует, что аналитическая функция Φ_3 имеет вид

$$\Phi_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} \rightarrow \min,$$

где b_{ij} — количественная оценка объёма памяти, занимаемого электронным документом d_j в H_i ; n_i — число документов в H_i ; N — число хранилищ СЭД.

Четвёртый сценарий — уменьшение затрат на обновление содержимого электронных документов. Это влечёт за собой сокращение числа копий документов, но увеличивает число потоков документов из различных хранилищ системы, что приводит к замедлению выполнения операций в системе, а также поиска [18]. Аналитическая функция Φ_4 , характеризующая оптимизацию по этому сценарию, выглядит следующим образом:

$$\Phi_4 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \rightarrow \min,$$

где y_{ij} — цена преобразования содержимого документа d_j в H_i ; n_i — число документов в H_i ; N — число хранилищ данных в СЭД.

Цена трансформации документа состоит из цены вычленения необходимого документа, трансляции модифицированных данных и преобразования контента документа [19].

Для оценки эффективности СЭД может быть использован совокупный экономический критерий $C_{ин}$:

$$C_{ин} = (C_{хран} + C_{пд} + C_{ис}) \rightarrow \min.$$

где $C_{хран}$ — цена хранения данных; $C_{пд}$ — цена приёма информации пользователем из СЭД; $C_{ис}$ — цена информации из информационных систем.

Оценка эффективности СЭД на примере образовательного учреждения. На рис. 1 представлены затраты времени на выполнение различных операций процесса обработки документов в течение рабочего дня для двух систем документооборота.

Видно, что система электронного документооборота значительно эффективнее. И если

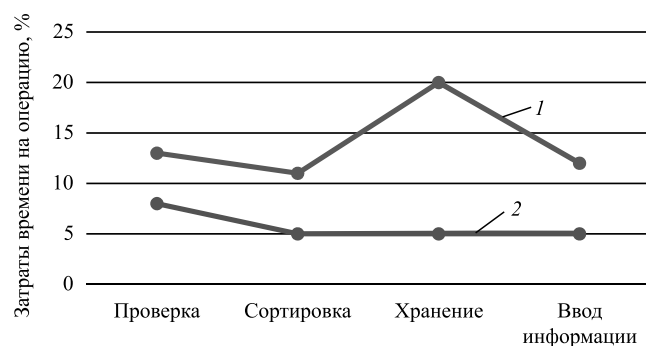


Рис. 1. Затраты времени на выполнение различных операций процесса обработки документов для двух систем документооборота:

1 — бумажный документооборот; 2 — электронный документооборот

суммировать временные показатели, то получится, что при бумажном документообороте будет тратиться на 40 % времени больше, чем при электронном.

Положительный эффект от внедрения СЭД определяется двумя компонентами [20]:

1) экономией рабочего времени персонала и затрат на комплектующие (возможно рассчитать);

2) характеристиками процесса оказания услуг, а конкретно темпом прохождения документов и координацией исполнения операций документооборота (невозможно рассчитать).

Проведём оценку эффективности информационной системы электронного документооборота [21, 22] на примере СЭД «Дело», внедрённой в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики.

Внедрение и ввод в эксплуатацию системы «Дело» выполнены специалистами образовательного учреждения, техническая поддержка обеспечивается силами компании «Корпоративные системы — консалтинг». На сегодняшний день 140 сотрудников университета работают в этой системе, более 100 из них пользуются приложением «Мониторинг документов».

Проведём расчёт первого компонента эффекта от внедрения СЭД: экономии рабочего времени персонала и затрат на бумагу, которая не используется при электронном документообороте [23, 24].

Экономический показатель эффективности оптимизации документооборота определяется по формуле

$$\Theta_{док} = \frac{\sum \Theta}{P},$$

где P — расчётная сумма затрат на внедрение СЭД; $\sum \Theta$ — суммарный эффект от внедрения СЭД.

Затраты на внедрение СЭД [25]

$$P = \sum P_i,$$

где P_i — расходы на внедрение системы по различным (i) статьям.

При внедрении СЭД «Дело», использующей промышленную систему управления базой данных (СУБД), возникали следующие расходы:

1) затраты на закупку клиентских лицензий к СУБД (Oracle, Postgris, Microsoft SQL и т. д.) на заданное число рабочих мест (C_3). Для университета $C_3 = 20\,450 \cdot 140$ руб. (20 450 руб. — стоимость лицензии, 140 — число рабочих мест);

2) затраты на СУБД (рассматривается вариант с одним процессором). Может возникнуть ситуация, когда к данной СУБД будет необходимо присоединять лицензионные продукты для клиентов (C_0) [26]. Для университета $C_0 = 16\,000$ руб.;

3) затраты на обеспечение дополнительных программно-технических средств, предполагающих установку необходимого числа рабочих мест для персонала. Данное число рабочих мест позволит осуществлять шифрование, использовать электронную цифровую подпись и выполнять поточное сканирование ($C_{од}$). Для университета $C_{од} = 19\,000$ руб.;

4) затраты, связанные с запуском СЭД (P_z). Рассчитываются по формуле

$$P_z = MB + MB\Phi(H),$$

где M — число месяцев, которое необходимо для того, чтобы выполнить работы по запуску системы на N рабочих мест; B — средние затраты на выполнение работ в течение одного месяца; $\Phi(H)$ — функция, характеризующая размер организации, позволяет учитывать расход и усложнение задачи за счёт размера организации [27]. Эта функция качественно представляет собой логарифм от величины N . При $H = 100$ функция $\Phi(H) = 0,3$; при $H = 200$, величина $\Phi(H) = 0,35$, а если $H > 100$, то $\Phi(H) = 0,4$.

Для университета $M = 4$, $B = 40\,000$ руб. и $H > 100$, т. е. $\Phi(H) = 0,4$, следовательно, $P_z = 4 \cdot 40\,000 + 4 \cdot 40\,000 \cdot 0,4 = 224\,000$ руб.;

5) затраты на обучение администраторов системы, пользователей и персонала, сопровождающего систему ($C_{оп}$). Для университета $C_{оп} = 25\,000 \cdot 140$ (25 000 руб. — затраты на обучение одного специалиста, 140 — число специалистов);

6) затраты на годовое сопровождение системы компанией-партнёром ($C_{ог}$). Для университета $C_{ог} = 130\,000$ руб.;

7) затраты на конвертацию данных (C_T). Для университета $C_T = 40\,000$ руб.

Суммарные затраты по эксплуатации, внедрению СЭД и документационной поддержке управления в течение года

$$P = C_3 + C_0 + C_{од} + P_z + C_{оп} + C_{ог} + C_T = 20\,450 \cdot 140 + 16\,000 + 19\,000 + 224\,000 + 25\,000 \cdot 140 + 130\,000 + 40\,000 = 6\,792\,000 \text{ руб.}$$

Положительный эффект введения электронного документооборота, как указывалось, складывается из сэкономленного времени работников ($\Theta_{рв}$) и цены сэкономленной бумаги ($\Theta_{сб}$) [28, 29]. При внедрении СЭД рабочее время экономится за счёт использования информационно-поисковой системы, при этом выделяются два параметра: релевантность и полнота поиска.

Поиск можно осуществлять по атрибутам документа и по его содержанию. Последнее выполняется полнотекстовым способом и по ключевым словам. Для поиска документов создаётся образ поисковых документов (ОПД) — это дескрипторы, описывающие смысл документа. Схема взаимодействия компонентов поисковой системы представлена на рис. 2 [30].

Точность поиска (T) — параметр, показывающий экономию рабочего времени сотрудниками предприятия. Он отражает долю релевантной информации, которая была получена в результате осуществления запроса и имеет к нему прямое отношение, т. е. характеризует число документов, которые принято считать релевантными, и вычисляется следующим образом [32, 33]:

$$T = \frac{V_{\text{рел}}^H}{V_{\text{об}}^H} \cdot 100,$$

где $V_{\text{рел}}^H$ — число найденных релевантных документов; $V_{\text{об}}^H$ — число всех электронных документов, найденных в системе.

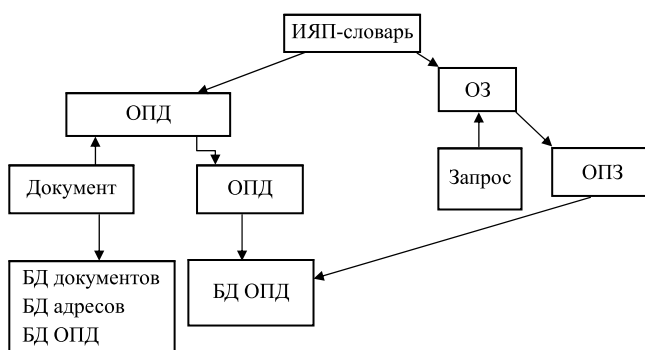


Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов поисковой системы:

ИЯП — словарь ключевых слов и их кодов; ОЗ — образ запроса для поиска документа; БД документов, БД адресов, БД ОПД — информационное обеспечение документов [32]

В случае если документы, найденные в ходе выполнения запроса, имеют к нему прямое отношение, текущая точность будет равна 100 %. Если все найденные документы были охарактеризованы как шумовые, точность поиска будет равна нулю [34].

Полнота поиска (Π) — параметр, характеризующий долю документов в процентах, которые были определены как релевантные. Он определяется как отношение части релевантной информации, которая включена в ответ, к совокупной релевантной информации в базе данных и рассчитывается по формуле [36]

$$\Pi = \frac{V_{\text{рел}}^{\text{н}}}{V_{\text{рел}}^{\text{об}}} \cdot 100,$$

где $V_{\text{рел}}^{\text{н}}$ — число найденных и выданных релевантных документов; $V_{\text{рел}}^{\text{об}}$ — число всех релевантных документов, найденных в системе.

Дополнительные показатели эффективности. По расчётам, которые были проведены экспертами, в образовательном учреждении экономия рабочего времени сотрудника составляет 30 %, или 2,5 ч в течение рабочего дня.

Для всех сотрудников экономия рабочего времени составила 86 450 ч в год. Стоимость одного рабочего часа сотрудника 150 руб/ч. Доходная часть составила 12 967,5 тыс. руб.

Доход, связанный с экономией рабочего времени и бумаги, определяется по формуле

$$\Theta = \Theta_{\text{р.в}} + \Theta_{\text{с.б}},$$

где $\Theta_{\text{р.в}}$ — стоимость сэкономленного рабочего времени сотрудников предприятия; $\Theta_{\text{с.б}}$ — стоимость сэкономленной бумаги.

Показатель $\Theta_{\text{р.в}}$ рассчитывается по формуле

$$\Theta_{\text{р.в}} = 3NT,$$

где 3 — средняя зарплата сотрудников; N — число сотрудников; T — число месяцев, за которое начисляется зарплата.

Для университета $3 = 55\,833,33$ руб., $N = 13$, $T = 12$. Таким образом,

$$\Theta_{\text{р.в}} = 55\,833,33 \cdot 13 \cdot 12 = 8\,810\,000 \text{ руб.}$$

Если брать в расчёт, что пачка бумаги, состоящая из 500 листов, стоит C , то показатель $\Theta_{\text{с.б}}$ рассчитывается по формуле [37]

$$\Theta_{\text{с.б}} = (\Theta_{\text{м}} + \Theta_{\text{а}} + \Theta_{\text{р}}) / 500 \cdot C,$$

где $\Theta_{\text{м}}$ — число распечатанных за год листов бумаги; $\Theta_{\text{а}}$ — число листов копий подлинников документов, сделанных работниками архива; $\Theta_{\text{р}}$ — число разосланных единиц корреспонденции.

При $C = 300$ руб., $C_{\text{м}} = 60\,000$; $\Theta_{\text{а}} = 50\,000$; $\Theta_{\text{р}} = 40\,000$ стоимость сэкономленной бумаги

$$\Theta_{\text{с.б}} = (60\,000 + 50\,000 + 40\,000) / 500 \cdot 300 = 90\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, доход

$$\Theta = \Theta_{\text{р.в}} + \Theta_{\text{с.б}} = 8\,810\,000 + 90\,000 = 8\,900\,000 \text{ руб.}$$

Эффект от внедрения СЭД определяется как

$$\Theta_{\text{вн}} = \Theta - P.$$

В данном случае

$$\Theta_{\text{вн}} = 8\,900\,000 - 6\,792\,000 = 2\,108\,000 \text{ руб.}$$

Используя формулу эффективности, получаем, что эффективность внедрения СЭД в учебном учреждении составит 29,5 %.

Заключение. Анализ результатов внедрения СЭД в учебном учреждении показал высокую эффективность данного мероприятия. Реализованная система позволила обеспечить цельность, подконтрольность и бесспорность процессов подготовки, согласования и обработки документов в рамках выполнения различных задач, предоставляет широкие возможности для подготовки отчётности в масштабах учебных заведений. Это позволяет рекомендовать внедрение электронного документооборота в учебных заведениях.

Библиографические ссылки

1. Абдулгалимов Г.Л. Переход к информационно-обществу и проблемы развития кадрового потенциала // Alma mater (Вестник высшей школы). 2013. № 11. С. 109—112.
2. Медведева О.В., Парамонова М.Г. Цифровизация управления и системы электронного документооборота // Ученые записки Тамбовского отделения РСОМУ. 2019. № 13. С. 75—80.
3. Бобылева М.П. Корпоративная система документооборота и корпоративная культура: аспекты взаимодействия // Делопроектирование. 2001. № 2. С. 41—43.
4. Жамиев А.А. Система электронного документооборота // Молодой ученый. 2020. № 21 (311). С. 50—52.
5. Маслова А.В. Роль системы электронного документооборота в автоматизации бизнес-процессов компании. Эффективность автоматизации документооборота // Молодой ученый. 2017. № 7 (141). С. 265—267.
6. Васекин С.В., Сухобокова И.П. Информатизация образования и информационная культура педагога // Актуальные проблемы современной науки. 2013. № 6 (74). С. 196—197.
7. Кугель Л.А., Васекин С.В. Учебная задача оценки быстрейшего исполнения программы на компьютере // Аспирант и соискатель. 2013. № 5. С. 107—109.
8. Подоляк А.А. Система электронного документооборота и международный опыт ее применения // Трибуна ученого. 2020. № 6. С. 45—53.
9. Волкова В.Н., Голуб Ю.А. Информационная система: к вопросу определения понятия // Прикладная информатика. 2009. № 5. С. 112—120.

10. **Барахнин В.Б., Федотов А.М.** Информационная система: взгляд на понятие // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2007. № 2. С. 12—19.
11. **Мельник Г.В.** Моделирование системы управления информационными рисками в корпоративной информационной системе // БИ. 2013. № 9. С. 95—99.
12. **Русскевич С.Н., Медникова О.В.** Система единого электронного документооборота // Вестник Московской международной академии. 2018. № 2. С. 88—91.
13. **Кипенко А.А.** Аналитика системы электронного документооборота // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2010. № 2. С. 69—77.
14. **Алексеев В.В., Елисеев А.В.** Система электронного документооборота в вузе // Программные продукты и системы. 2003. № 4. С. 46—48.
15. **Нестерова Н.С., Новикова Н.А.** Система электронного документооборота кафедры вуза // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 110. С. 329—338.
16. **Архипова З.В.** Современные информационно-телекоммуникационные системы как фактор повышения конкурентоспособности высших учебных заведений // Известия ИГЭА. 2014. № 1. С. 126—130.
17. **Байдыбекова С.К.** Проблемы и эффекты от внедрения автоматизированных информационных систем // Вопросы управления. 2013. № 2. С. 115—118.
18. **Данилова О.М., Дроздова Е.А., Горборукова Т.В.** Системы электронного документооборота как базовый инструмент управления современной организацией // APRIORI. Сер.: Естественные и технические науки. 2014. № 6. С. 16.
19. **Гололобов Е.И., Зоткин Р.А.** Управленческий документ в условиях использования систем электронного документооборота. Опыт Сургутского государственного педагогического университета // Делопроизводство. 2013. № 3. С. 65—68.
20. **Чекалина Т.А.** Формирование единой информационно-образовательной среды в профессиональных образовательных организациях // Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения. 2016. № 54. С. 103—107.
21. **Еремченко В.А.** О проблеме электронных документов // Секретарское дело. 2001. № 3. С. 31—35.
22. **Парамонова И.Е.** Системы электронного документооборота: новые возможности для научно-технической библиотеки // Труды СПбГИК. 2015. № 1. С. 158—164.
23. **Кузнецов С.Л.** Современные технологии документационного обеспечения управления. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 232 с.
24. **Кобелькова Л.А.** Документация в информационном обществе: международный опыт управления документами // Отечественные архивы. 2011. № 1. С. 114—115.
25. **Ефимова О.А.** Современные системы автоматизации делопроизводства: попытки анализа и классификации // Секретарское дело. 2000. № 4. С. 23—28.
26. **Котов В.И.** Риск-анализ на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. СПб.: Астерион, 2014. 218 с.
27. **Гудов А.М., Мешечкин В.В., Завозкин С.Ю.** Выбор архитектуры системы распределенных информационных хранилищ на основе решения задачи оптимизации стоимости документопотоков // Вестник Кемер. гос. ун-та. 2011. № 3. С. 13—19.
28. **Мокрозуб В.Г.** и др. Представление модели параметрического синтеза технического объекта в реляционной базе данных // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 17. № 2. С. 462—465.
29. **Иритикова В.С.** Управление документами: стандарты и алгоритмы // Делопроизводство и документооборот на предприятии. 2012. № 8. С. 28—33.
30. **Ермаков А.В.** Информационно-телекоммуникационная система современного университета для управления инновациями. СПб.: Техника связи, 2015. 234 с.
31. **Киселева И.А.** Плюсы и минусы использования электронного документооборота // Финансовая газета. 2012. № 34. С. 37—42.
32. **Обухов А.Д., Краснянский М.Н.** Разграничение доступа к информации в системе электронного документооборота // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 2 / под общ. ред. В.А. Немтинова. Тамбов, 2015. С. 309—313.
33. **Митрофанова А.А.** Предпроектное обследование в рамках внедрения СЭД: интервьюирование и анкетирование // Делопроизводство и документооборот на предприятии. 2013. № 1. С. 50—62.
34. **Баласанян В.Э.** Применение автоматизированных систем документационного обеспечения управления (АС ДОУ) для повышения эффективности управления // Делопроизводство. 2002. № 2. С. 27—29.
35. **Белов С.П.** Подготовка предприятий к внедрению систем электронного документооборота. Вопросы теории и практики. М.: Мир науки, 2016. 210 с.
36. **Бобылева М.П.** Вопросы анализа документооборота организации в условиях использования автоматизированных систем // Делопроизводство. 2001. № 1. С. 36—41.

Ссылка для цитирования

Моргунов А.В., Астраков К.С. Оценка эффективности информационной системы управления документооборотом научно-образовательного учреждения // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 427—432.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 28.06.2021.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 24.08.2021.

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

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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