Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

8

2015

Главный редактор
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЛЕГИЯ:

Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
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)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г. за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-38-80.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-38-58.
Факс: (499) 269-48-97.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов 3

Бугров Ю.Н., Курнасов Е.В. АЦП параллельного типа с преобразованием двоично-десятичных чисел в двоичный код для интерфейса управляющих устройств 9

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Власов А.И., Зотьева Д.Е., Евдокимов В.С., Ревзин Г.Г., Феоктистов Д.В. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами 15

Пролетарский А.В., Пронин А.В., Смирнова Е.В., Шпак М.А. Автоматизация процедуры миграции данных из реляционной базы данных в онтологию предметной области на примере медицинской информационной системы 25

Цибизова Т.Ю., Чан Нгок Хыонг. Способы реализации процедуры идентификации на основе фильтра Вольтерра . . 31

Фролова И.В. Современные вопросы защиты информации в измерительно-информационных системах 34

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шибанов Г.П. Оценка эффективности внедрения новых технологий в перспективные авиационные комплексы. . . 37

Головешкин В.А., Выборнов А.Н., Ульянов М.В. Операционная чувствительность алгоритмов 41

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 47

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Larchenko A.G. Automatic control system for high-frequency diagnosis of products from polymeric materials 3

Bugrov Yu.N., Kurnasov E.V. Parallel type АЦП with the transformation of the binary-decimal numbers into binary code for the interface control devices 9

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Vlasov A.I., Zoteva D.E., Evdokimov V.S., Revzin G.G., Feoktistov D.V. Hybrid control system of the small unmanned ferial vehicles (UAVs) 15

Proletarskiy A.V., Pronin A.V., Smirnova E.V., Shpak M.A. Automation of the data migration procedure from a relational database in the object area ontology for medical information system as an example 25

Tsibizova T.Yu., Chan Nrok Khyong. Identification methods of implementation procedures from a Volterra filter . 31

Frolova I.V. Modern questions over the information protection in measuring and information systems. 34

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Shibanov G.P. Implementation efficiency valuation of the new technologies in the perspective aircraft complexes. . 37

Goloveshkin V.A., Vybornov A.N., Ylyanov M.V. Algorithms operating sensitivity 41

SURVEY OF PERIODICALS

On the pages of magazines 47

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 02.06.2015.
Подписано в печать 23.07.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015

УДК 62-503.55

А.Г. Ларченко
(Иркутский государственный университет путей сообщения)
Larchenkoa@inbox.ru

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ДИАГНОСТИРОВАНИЕМ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследован метод неразрушающего контроля токами высокой частоты, рассмотрены подходы к решению задач разработки системы автоматизированного управления высокочастотным диагностированием при производстве и эксплуатации изделий из полимерных материалов, приведены теоретические и практические результаты, полученные в ходе исследований.

Ключевые слова: диагностирование токами высокой частоты; система автоматизированного управления электротермической обработкой; полимерные изделия.

The nondestructive control method by high-frequency currents is investigated, considered approaches to the creature task decision of the high-frequency diagnosis automatic control system at production and use of products from polymeric materials are considered, given the theoretical and practical results obtained in the course of research are adduced.

Key words: diagnosis by high-frequency currents; an automatic control system for electro-thermal processing; polymeric products.

В последние годы изменилось отношение к свойствам полимерных материалов — на них стали возлагать все более ответственные задачи. Из полимерных материалов изготовляют большое количество конструктивно сложных, ответственных деталей, несущих значительные нагрузки. Важнейшие преимущества изделий из полимеров — возможность обеспечения высокой жёсткости конструкции при незначительной её массе, коррозионная стойкость, высокая удельная прочность. Но надёжность, долговечность и прочность изделия зависят не только от свойств материалов, но и от наличия в них скрытых структурных неоднородностей, несплошностей, микротрещин, приводящих к отклонениям физико-механических характеристик материала. Единственной возможной технологической операцией, позволяющей выявить скрытые недопустимые дефекты в технических объектах при их эксплуатации и тем самым предотвращающей возникновение чрезвычайных ситуаций на транспорте, является неразрушающий контроль изделий.

В настоящее время существуют акустические, капиллярные, магнитные, радиоволновые, тепловые, электрические и электромагнитные методы неразрушающего контроля. Для диагностирования изделий из полимерных композиционных материалов могут быть использованы лишь некоторые из них. Кроме того, на сегодняшний день отсутствуют быстродействующие методы неразрушающего контроля геометрически сложных изделий из полимерных материалов, обеспечивающие выявление дефектов различного характера. Большинство методов плохо поддаются автоматизации, отличаются сложностью в исполнении, а также неприменимы при использовании сплошного контроля в промышленных условиях.

Проведённый анализ литературных источников показал, что наиболее перспективным методом неразрушающего контроля полимерных изделий с точки зрения энергоэффективности и информативности является метод высокочастотной (ВЧ) диагностики. При этом нерешённые вопросы как автоматизации процессов управления диагностикой, так и объективного принятия решения при завершении контроля значительно сдерживают широкое применение данного вида дефектоскопии.

Таким образом, разработка системы автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов является актуальной задачей, решение которой внесёт значительный вклад в развитие отраслей промышленности, связанных с изготовлением, ремонтом и эксплуатацией полимерных изделий.

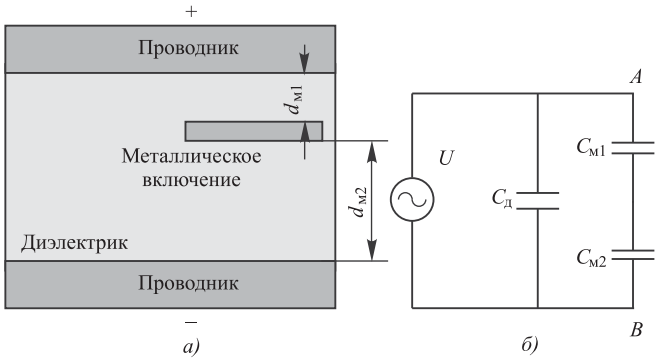

Рис. 1. Схема полимерного образца с дефектом типа «металлическое включение»:
а — технологическая схема; *б* — схема замещения; $C_д$ — ёмкость конденсатора без металлического включения, $C_{м1}$, $C_{м2}$ — ёмкости конденсаторов, разделённых металлическим включением

При ВЧ-диагностировании любой полимер между двумя электродами, включённый в электрическую цепь, можно рассматривать как диэлектрик конденсатора определённой ёмкости. При помещении изделия из полиамида с дефектом типа «воздушное включение» в пространство между электродами с разностью потенциалов напряжённость электрического поля в газовом включении превысит напряжённость поля в окружающем его твёрдом диэлектрике. Это создаст условие для возникновения в месте дефекта ионизационных процессов. Данные процессы могут происходить как на поверхности раздела сред, так и внутри изделия из полимера и идентифицироваться как микроразряды. Интенсивность возникновения микроразрядов зависит от размеров воздушного включения. Таким образом, анализируя возникновения микроразрядов, можно говорить о присутствии и степени развития дефекта в полимере [1].

При воздействии электрического поля на металлическое включение происходит перераспределение свободных зарядов, в результате электростатической индукции на поверхности проводника возникают некомпенсированные положительные и отрицательные заряды. Технологическая схема диагностирования полимерного образца с дефектом «металлическое включение» представлена на рис. 1, *а*, электрическая схема замещения системы высокочастотной электротермии — на рис. 1, *б*.

Из схемы замещения (см. рис. 1, *б*) следует, что исследуемый образец с металлическим включением может быть представлен как система параллельно соединённых конденсаторов ($C_д$ — со сборкой из последовательно установленных ёмкостей $C_{м1}$ и $C_{м2}$).

Полная ёмкость на участке *AB*:

$$C_п = \frac{C_{м1}C_{м2}}{C_{м1}+C_{м2}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_{м2}+d_{м1}}, \qquad (1)$$

где $C_{м1}$ — ёмкость конденсатора над металлической пластиной; $C_{м2}$ — ёмкость конденсатора под металлической пластиной; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая постоянная; *S* — площадь обкладок конденсатора; $d_{м1}$, $d_{м2}$ — расстояние между обкладками конденсатора.

Отсюда можно сделать вывод, чем больше толщина и площадь поверхности металлического включения, тем больше полная ёмкость рабочего конденсатора. Мощность, затрачиваемая на нагрев диэлектрика, составляет:

$$P = U^2\omega(C_д + C_п)\mathrm{tg}\delta, \qquad (2)$$

где *U* — напряжение рабочего конденсатора; $C_п$ — полная ёмкость конденсаторов, разделённых металлическим включением; $C_д$ — ёмкость рабочего конденсатора без металлического включения; tgδ — тангенс угла диэлектрических потерь; ω — частота колебаний; *P* — удельная мощность нагрева.

Соответственно, воздействие высокочастотного излучения на разогрев полиамида увеличится (время нагрева пропорционально размеру металлического включения). Отметим, что аналогичная картина по увеличенной динамике разогрева наблюдается и в другом случае — при повышенном содержании влаги. Исходя из изложенного выше при организации автоматизированного процесса ВЧ-диагностирования в качестве выходных параметров были приняты: количество микроразрядов и время разогрева изделий из полиамида в высокочастотном электрическом поле.

После теоретических разработок были проведены экспериментальные исследования с целью подтверждения работоспособности принятых решений по реализации процесса

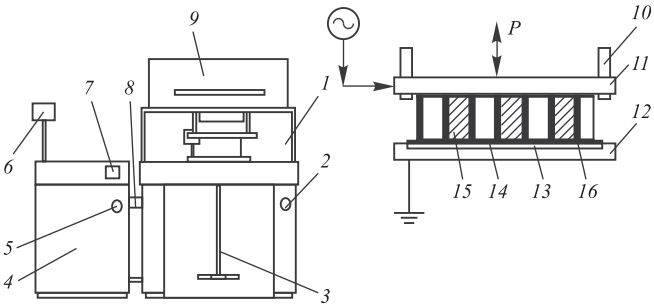

Рис. 2. Устройство диагностики изделий из полиамидных материалов

диагностики изделий из полимеров. Для проведения экспериментальных исследований на базе установки УЗП 2500 разработано и запатентовано устройство диагностики изделий из полимерных материалов (рис. 2) [2].

Устройство состоит из рабочего конденсатора *1*, реле времени *2*, привода для создания давления *3*, ВЧ-генератора *4*, регулятора напряжения (регулятор конденсатора переменной ёмкости) *5*, контроллера за параметрами диагностики *6*, амперметра *7*, фидера *8*, защитного экрана *9*. Устройство для диагностики изделий включает в себя гайки-фиксаторы *10*, верхнюю *11* и нижнюю *12* рабочие плиты, (верхняя — высокопотенциальная является силовой, нижняя в процессе диагностики остаётся неподвижной), рабочий стол *13*, в зависимости от геометрических параметров объекта контроля специальные электроды *14*, *15*, объект контроля *16*.

Разработан алгоритм регистрации и обработки параметров анодного тока в целях выделения и усиления микроразрядов в процессе высокочастотной диагностики, создано реализующее его программное обеспечение. Алгоритм регистрации и обработки параметров анодного тока представлен на рис. 3.

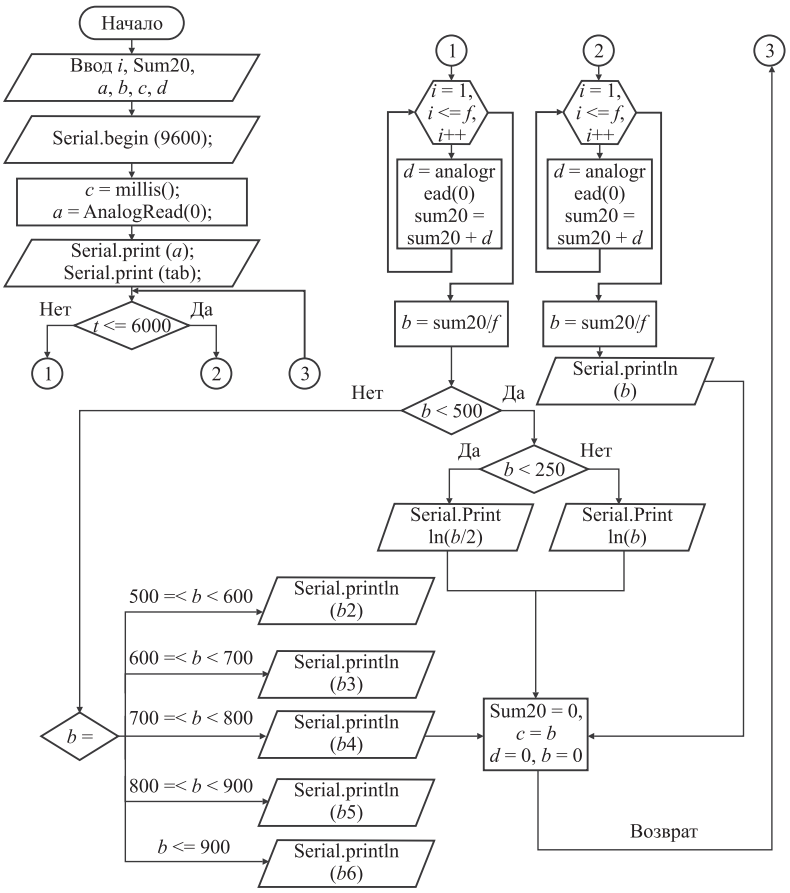

Рис. 3. Алгоритм регистрации и обработки параметров анодного тока

Использование разработанного программного обеспечения позволило выделять и регистрировать возникающие микроразряды при контроле образцов. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

Анализ полученных данных показывает, что при диагностировании изделий с воздушным включением прослеживаются скачки анодного тока (микроразряды) (рис. 4, *а*), возникающие в результате ионизационных процессов. При контроле металлического включения наблюдается динамическое увеличение анодного тока (рис. 4, *б*), при этом время нагрева при диагностировании составляет 20,93 ± 4,31 с. Аналогичная картина наблюдается и при диагностировании образцов с повышенной влажностью. При контроле эталонных изделий отсутствуют скачки анодного тока при практически линейной динамике его увеличения, время нагрева составляет 111,4 ± 7,88 с.

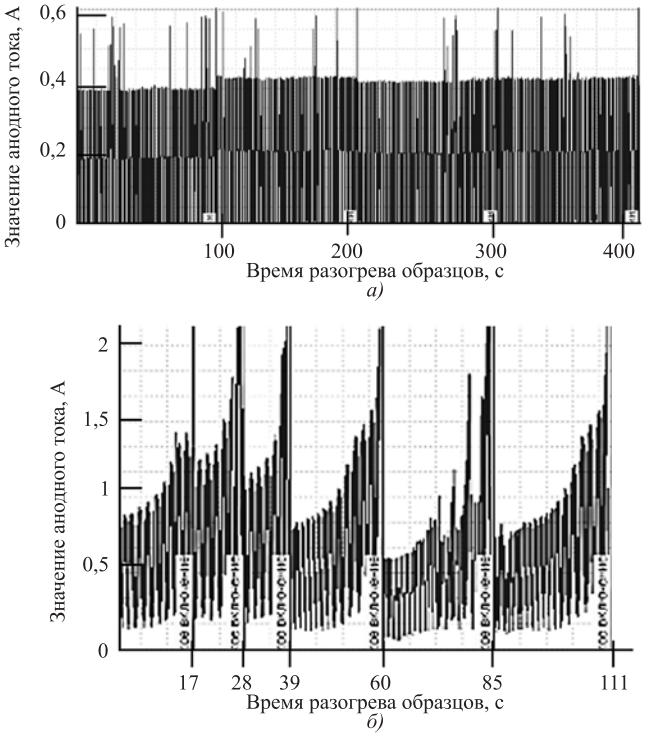

Рис. 4. Диаграммы изменения анодного тока диагностируемых образцов:

а — с дефектом типа «воздушное включение»; *б* — с дефектом «металлическое включение»

Для решения задачи количественного наполнения методик управления и расширения номенклатуры контролируемых материалов в

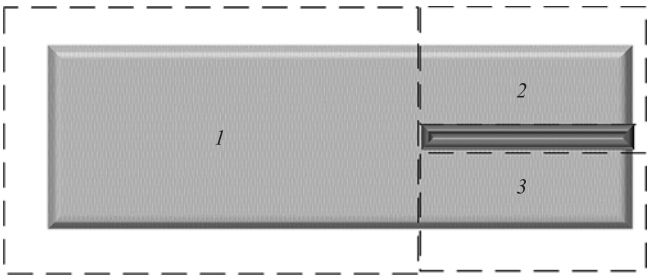

Рис. 5. Схема смоделированного образца с дефектом типа «металлическое включение»:
1 — полиамид без дефекта; *2* — полиамид, расположенный над дефектом; *3* — полиамид, расположенный под дефектом

ходе исследования разработана математическая модель высокочастотного диагностирования. При построении математической модели ВЧ-диагностирования изделий из полимеров с дефектом типа «металлическое включение», исследуемый образец рассматривался как совокупность трёх участков: первый — полиамид без дефекта; второй — полиамид, расположенный над дефектом; третий — полиамид, расположенный под дефектом (рис. 5).

Для расчёта динамики разогрева каждого участка использовалась модифицированная математическая модель, представленная в работе [3], отличающаяся тем, что в ней был создан алгоритмический и программный переход от учёта мощности внутреннего источника тепла к зависимости от времени, а не от температуры, и определены математические зависимости энергетической составляющей модели. Принимая во внимание различную динамику разогрева при диагностировании, был организован контроль потребляемой энергии.

Проверка соответствия модели реальным процессам нагрева показала, что при диагностике образцов из полиамида марки 610, толщиной 8 мм и радиусом 15 мм, время составляет 111 с, а время разогрева образца тех же размеров с дефектом типа «металлическое включение» объёмом 4 мм^3 — 25 с, отклонения по времени разогрева от экспериментальных исследований составляют не более 2 %, что подтверждает корректность математической модели. При этом потребляемая мощность эталонного образца составляет 1,3 Вт·ч, а образца с дефектом — 0,35 Вт·ч.

Анализ результатов, полученных на основе математической модели, позволил выявить дополнительный обладающий информативностью контролируемый параметр — потребляемая энергия. Кроме того, созданная математическая модель позволяет определять напряжение на обкладках рабочего конденсатора, необходимого для сохранения удельной мощности разогрева, так как при использовании разработанного метода контроля и управления процессом диагностирования необходимо при обработке разнообразных материалов и изделий различных габаритов обеспечить постоянный уровень энергетического воздействия.

Таким образом, был сформирован комплекс информационных параметров, необходимых для организации процесса автоматизированного управления высокочастотным диагностированием (количество микроразрядов, время разогрева, потребляемая энергия, анодный ток, напряжение на рабочем конденсаторе).

Созданная математическая модель и теоретические исследования позволили выявить научно-обоснованные информационные параметры процесса дефектоскопии, необходимые для решения задач построения АСУТП. В ходе исследования был сформирован алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс высокочастотной дефектоскопии изделий из полимеров. На основе предложенного способа контроля и методики управления разработана схема автоматизированной системы управления процессом диагностирования изделий методом высокочастотного излучения (рис. 6).

Работа системы автоматизированного управления ВЧ-диагностированием применительно к устройству диагностики изделий из полимерных материалов [2] осуществляется следующим образом: оператор вводит в вычислительные блоки системы управления идентификационные данные изделия и исходные параметры (температура при диагностировании, время диагностирования и т. д.). Затем оператор устанавливает изделие в рабочий конденсатор. Прижимная плита подводится к изделию до момента создания надёжного электрического контакта, оператор закрывает защитный экран, нажатием кнопки «Пуск» запускает АСУ. После запуска системы управления исполнительный механизм (шаговый двигатель) поворачивает подвижную пластину переменного конденсатора на расчётный угол α, тем самым обеспечивая необходимое рабочее напряжение диагностики. Затем в автоматизированном режиме включается процесс диагностики. Вычислительный блок акклиматизации (здесь и далее разделение на вычислительные блоки является условным и принято лишь с целью пояснить последовательность выполняемых расчётных операций),

исходя из конструкционных особенностей обрабатываемой делали, рассчитывает значение времени акклиматизации $\tau_{ак}$, необходимого для завершения переходных процессов в электрической цепи рабочего конденсатора (в случаях выгорания инородных включений на поверхности изделия).

По истечении времени $\tau_{ак}$ происходит отключение блока контроля акклиматизации и одновременное включение блока контроля дефектов типа «воздушное включение», блока контроля дефектов «повышенная влага», блока контроля дефектов «металлическое включение» и блоков аварийного отключения (блок режима контроля фазового состояния, блок режима контроля динамики возникновения частичных разрядов).

В блоке контроля дефектов типа «воздушное включение» при помощи программы счётчика количество микроразрядов автоматически регистрируется, суммируется и сравнивается с предельным значением, возникающим в процессе диагностики:

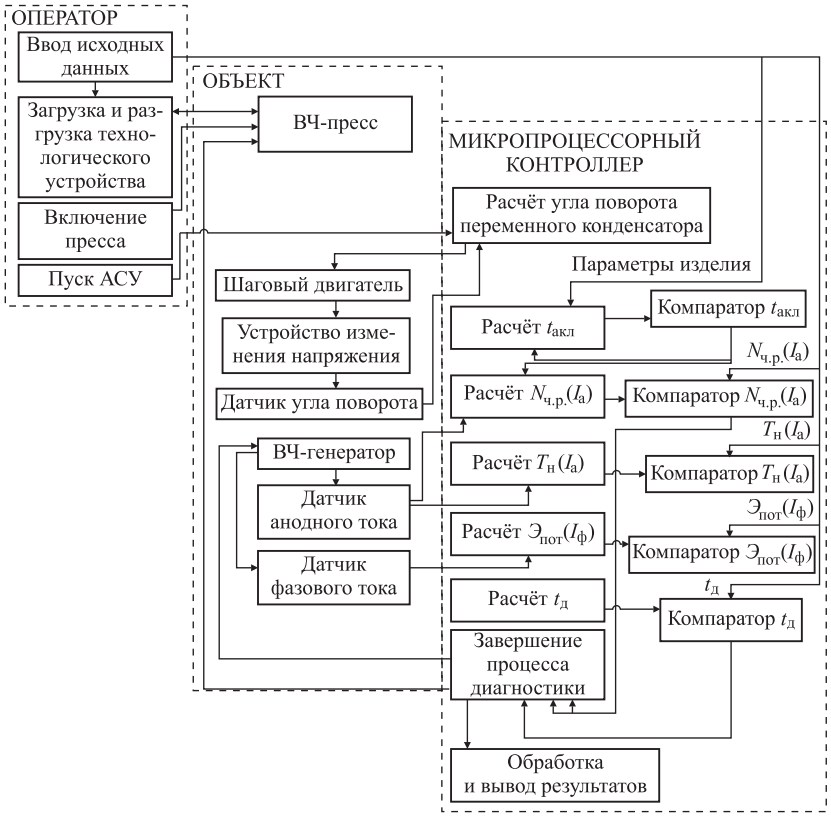

Рис. 6. Структурная схема автоматизированной системы управления процессом ВЧ-диагностирования

$$N_р(I_а) \geqslant N_{max}(I_а), \qquad (3)$$

где $N_р$ — количество зарегистрированных микроразрядов в процессе диагностирования; $I_а$ — анодный ток; N_{max} — заданное предельное количество микроразрядов, возможных при диагностировании изделия.

При достижении заданного максимально допустимого количества микроразрядов останавливается процесс диагностики, запускается блок обработки информации, выводится сообщение о наличии в изделии дефекта типа «воздушное включение», после этого запускается блок процесса восстановления изделия.

В блоке контроля дефектов типа «повышенная влажность» автоматически регистрируются показания анодного тока, программа обрабатывает мгновенные значения анодного тока, определяет и выстраивает плавный график усреднённых значений, соответствующий графику изменения температуры в изделии. При достижении максимума $T = 90$ % $T_{пл}$ за время, меньшее заданного $T_з$

$$T_н(I_а) \geqslant T_з(I_а), \qquad (4)$$

где $T_н$ — температура нагрева изделия в процессе диагностирования; $I_а$ — анодный ток; $T_з$ — заданная максимально допустимая температура нагрева изделия в процессе диагностирования.

процесс диагностирования останавливается, запускается блок обработки информации, выводится сообщение о наличии дефекта «повышенная влажность», информация записывается в базу данных, затем запускается блок процесса сушки. Методика процесса сушки описана в работах [3, 4].

В блоке контроля дефектов типа «металлическое включение» в процессе диагностики автоматически регистрируются показания анодного тока и производится подсчёт потребляемой энергии. При достижении максимума анодного тока и в случае, если потребляемая энергия меньше допустимого значения

$$Э_{пот}(I_ф) \geqslant Э_{рас}(I_ф), \qquad (5)$$

где $Э_{пот}$ — потребляемая энергия при диагностировании изделия; $I_ф$ — анодный ток; $Э_{рас}$ — расчётная потребляемая энергия при диагностировании,

то процесс диагностирования останавливается, запускается блок обработки информа-

ции, выводится сообщение о наличии в изделии дефекта типа «металлическое включение». Кроме того, анализ потребляемой энергии позволяет судить о координатах расположения металлического включения.

В случае если металлические включения малы, есть вероятность, что установка обозначит данный дефект как «повышенная влажность», поэтому рекомендуется изделие отправлять на процесс сушки. После сушки оператору необходимо провести повторную диагностику.

Если процесс диагностирования длился в течение времени, установленного ранее оператором, и ни один из блоков не выдал сообщение о браке, тогда процесс диагностирования останавливается, запускается блок обработки информации, выводится сообщение о годности изделия.

Блок обработки информации включается сразу после отключения режима диагностики. Полученные результаты в этом блоке проходят обработку, по истечении которой делается окончательное заключение о состоянии изделия, и вся информация записывается в базу данных. Кроме этого, в случае присутствия дефектов «повышенная влажность» или «воздушное включение», по окончании обработки информации блок может запускать процесс восстановления.

После завершения процесса диагностирования происходит отключение АСУ, оператор извлекает изделие (оснастку).

Для стабильности и безопасности протекания процесса диагностирования в АСУ были предусмотрены блоки режима контроля фазового состояния и контроля динамики возникновения частичных разрядов.

Разработка и изготовление блока автоматизации процесса диагностирования методом высокочастотного излучения проводились исходя из разработанного блока автоматизации процесса сушки (сварки) изделий ВЧ-излучением, представленного в работах [3, 4]. Проведя модернизацию данного блока при создании автоматизированного устройства диагностики изделий из полимеров, было введено в действие следующее дополнительное оборудование: шаговый двигатель, датчик угла поворота, датчик потребляемой мощности (датчик тока по трём фазам), монитор. Структурная схема блока автоматизации представлена на рис. 7.

Особенностью разработанного блока автоматизации является то, что не вносятся изменения в существующие принципиальные электрические схемы устройств высоко-

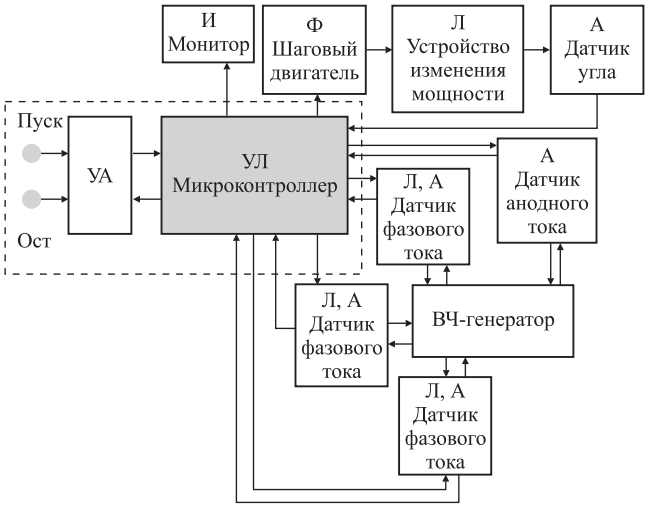

Рис. 7. Структурная схема блока автоматизации

частотной обработки и в разработанные блоки автоматизации ВЧ-обработки. Блок прост в изготовлении и может быть использован не только для диагностики, но и для других методов ВЧ-обработки изделий. Таким образом, созданная по данной методике АСУ позволяет проводить в автоматизированном режиме диагностирование изделий, определять наличие дефекта, его тип и координаты расположения.

Предложенные авторами устройства и системы автоматизированного управления процессом высокочастотного диагностирования изделий из полимеров внедрены в действие на вагоноремонтном предприятии компании ОАО «ВРК-1». Годовой экономический эффект от внедрения автоматизированного устройства диагностики изделий из полимерных материалов составляет более 400 тыс. руб.

Библиографические ссылки

1. **Кислякова Е.В.** Частичные разряды в диагностике изоляционных систем высоковольтного оборудования // Современные тенденции технических наук: материалы II межд. науч. конф. Уфа, май 2013. С. 36—38.

2. **Пат. 132209 РФ МПК G01N29/04.** Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, С.И. Попов, Н.Г. Филиппенко. Заявлен 10.09.2013, №132209.

3. **Попов С.И.** Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2013. 120 с.

4. **Филиппенко Н.Г.** Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2012. 160 с.

УДК 681.513:62-52

Ю.Н. Бугров, канд. техн. наук
(ООО «Дживс», г. Кимры),
Е.В. Курнасов, канд. техн. наук
(Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики)

mra2013@yandex.ru

АЦП ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ДВОИЧНО-ДЕСЯТИЧНЫХ ЧИСЕЛ В ДВОИЧНЫЙ КОД ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрены вопросы схемотехники параллельных АЦП, реализованных с арифметико-логическим преобразованием полученного результата измерения в позиционный десятичный код, и далее — в двоичный параллельный, чем достигаются установленная точность измерения, быстродействие и производительность обработки данных, например в интерфейсе управляющих устройств типа УЧПУ, ПЛК и др.

Ключевые слова: десятичный и двоичный коды; параллельные АЦП; логические и арифметико-логические преобразователи; ЦАП; микроконтроллеры; ПЛК; УЧПУ.

Circuit technology questions of the parallel analog-to-digital converter (ADC), implemented with arithmetical-logical transformation of the received measuring result in positional decimal code, and further in binary parallel code are considered, that provide the specified measuring accuracy, high-speed performance and productivity of data handling, for example in the interface of the control devices such as CNC, PLC and etc.

Key words: decimal and binary codes; parallel ADC; logical and arithmetic-logical converters; DAC; microcontrollers; PLC; CNC.

В системах управления особая роль всегда отводилась устройствам сбора и обработки информации, зачастую оказывая непосредственное влияние на эффективность управления в целом. Так, в адаптивной системе управления контурной скоростью [1], информация с аналоговых датчиков (пьезодатчиков, датчиков Холла) обрабатывается в устройстве ЧПУ (УЧПУ) с помощью специального программно-аппаратного интерфейса, основу которого составляет аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

АЦП может быть реализован на различных архитектурах со всевозможными конфигурациями, с заложенными в них подходами и идеями по достижению оптимального соотношения функциональных возможностей и требуемых рабочих характеристик. Однако во многих промышленных областях применения, например в автоматизированном оборудовании с ЧПУ, целесообразно использовать АЦП параллельного типа с преобразованием двоично-десятичных чисел в двоичный код для программно-аппаратного интерфейса УЧПУ.

В параллельных АЦП, реализованных на известном принципе сравнения измеряемого сигнала с эталонными напряжениями, и арифметико-логической обработкой полученного результата измерения в позиционный десятичный код (PDC), достигаются как необходимая точность измерения, так и максимальная производительность обработки данных [2].

Схема и работа базовой части АЦП этого типа может быть рассмотрена на примере принципиальной схемы многоразрядного АЦП (рис. 1).

Входной аналоговый сигнал U10 подаётся на первый АЦП, на выходе которого формируются старший разряд выходного кода. Эти разряды подключаются также на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Выходной сигнал ЦАП сравнивается в усилителе разности (УР) с входным сигналом. Разность этих сигналов подаётся на вход второго АЦП, который преобразует её в выходной код следующих и, далее — младших разрядов.

Промежуточный декадный разряд АЦП с реальным преобразователем многоразрядного числа, например для одной из декад, содержит:

эталонный делитель опорного напряжения (U11.1 = 10V) на резисторах R10—R19 для эталонных напряжений, производных от 10V {для m = 0, 1, 2, 3,..., 9};

дискриминаторы A10—A19, A21—A29,..., An0—An9, и элементы D10—D19 для сравнения с измеряемым сигналом U10;

выделения условия U11.1 ⩾ {0, 1, 2, 3,..., 9} и формирования позиционного сигнала на соответствующий разряд ЦАП на A13 с входными ключами VT10—VT19 для резисторов R30—R39;

модифицирующие сумматоры на A41, A42 — значения цифры U10.n − 1 = 9,999, ..., V, в U10.0 = 0,999, ..., V для младших разрядов;

следующие и последняя младшая декады преобразования числа U10 = 9,999, ..., V в U10 = 0,90V и в U10 = 0,09V и т. д. может, как АЦП, рассматриваться унифицированной схемой для любого промежуточного декадного разряда.

Возможным ограничением для применения схемы АЦП параллельного типа (см. рис. 1), например, в известных АЦП с преобразованием аналогового сигнала непосредственно в принятую форму параллельного кода, может быть отсутствие на их выходе блока формирователя цифровых данных в двоичный код с интерфейсом вывода результатов измерения. Для расширения возможностей рассмотренной схемы АЦП данного типа (см. рис. 1) она модифицирована на основе ряда дополнений (рис. 2).

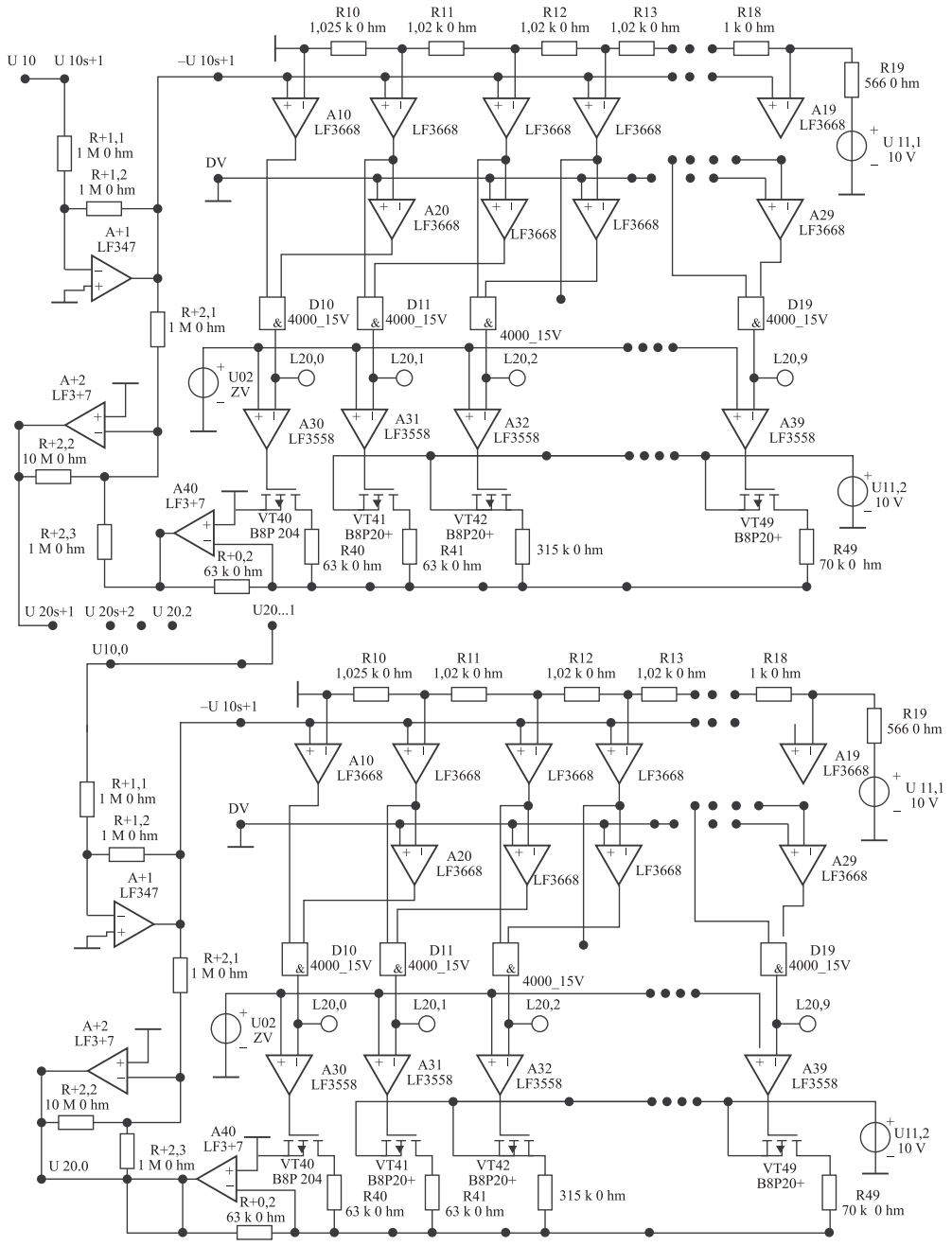

Рис. 1. АЦП параллельного типа с преобразованием измеряемых сигналов U10 ⩽ ⩽ 9,99...9 V в десятичный позиционный код Ln0, Ln1, ..., Ln9, в каждом из *n*-декад

Такая модификация схемы (см. рис. 1) в схему на рис. 2 реализована авторами дополнением её комбинированным преобразователем кодов и интерфейсом (INTF) и основана на последовательно-параллельном сравнении в каждом декадном разряде входного сигнала с одинаковыми эталонами, соответствующими позиционному десятичному коду (PDC), и далее — кодировании PDC на декадных шифраторах (COD) в двоично-десятичный код (BCD). Затем код BCD преобразуется в общий параллельный двоичный код (BIN) с выводом данных через INTF.

Параллельное преобразование декадных BCD в общий и соответствующей разрядности код BIN является наиболее быстродействующим, так как преобразование осуществляется за один цикл (одна операция сравнения).

В таких параллельных преобразователях несколько десятипозиционных АЦП параллельно соединяются подекадно между собой через про-

межуточные логические преобразователи (ЛП), где позиционный код PDC преобразуется в код BCD.

Построение комбинированного ЛП для АЦП в объёме *n*-декадного АЦП показано на рис. 3, где количество разрядов выходного кода определяет количество возможных уровней квантования входного сигнала. Для *m*-разрядного двоичного кода BIN это количество составляет *n*-декадное преобразование кода PDC в код BCD и, соответственно, в *m*-разрядный BIN.

Основными параметрами АЦП являются количество разрядов выходного кода, статическая и динамическая точность, параметры входных сигналов, уровни выходных сигналов, ток потребления, тип выходного кода и т. п. [3, 4].

Разрешающая способность определяется минимальным входным напряжением, соответствующим изменению выходного кода на единицу младшего разряда.

Для двоичного *m*-разрядного выходного кода BIN при максимальном напряжении измеряемого сигнала $U10_{max}$ разрешающая способность равна:

$$\Delta_0 = U10_{max}/(2^{m-1}).$$

Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы измерений — отклонение напряжения от номинального значения, соответствующего, например, конечной точке преобразования. Эта погрешность зависит от шага квантования (методическая погрешность) и инструментальных погрешностей, вносимых узлами ЦАП.

Последние погрешности могут корректироваться изменением напряжения источника эталонного напряжения U_{on} или сопротивлений матрицы делителя, подключённого к нему.

Абсолютная погрешность включает в себя нелинейность и

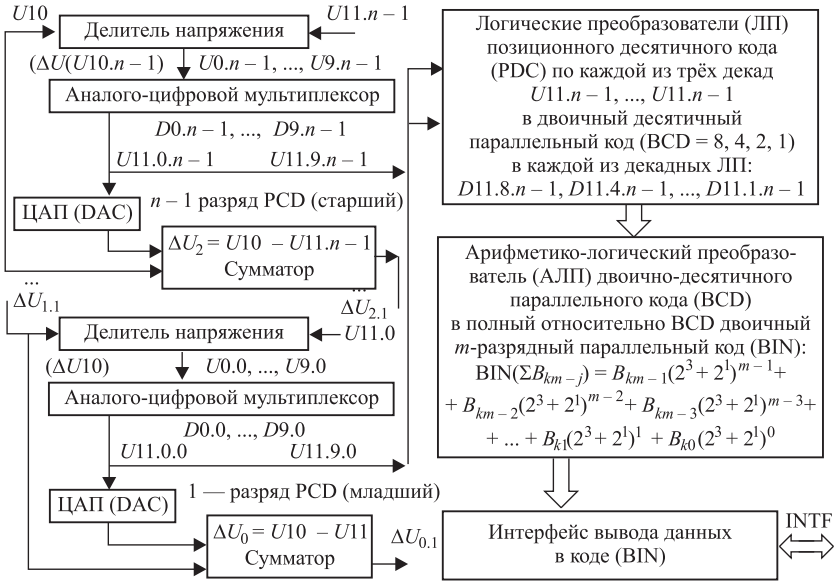

Рис. 2. Структурно-функциональная схема преобразования и ввода-вывода данных для *n*-разрядного параллельного АЦП из кода PDC в каждой из *n*-декад в код BCD и далее — в общий параллельный *m*-разрядный код BIN с выводом данных через интерфейс INTF

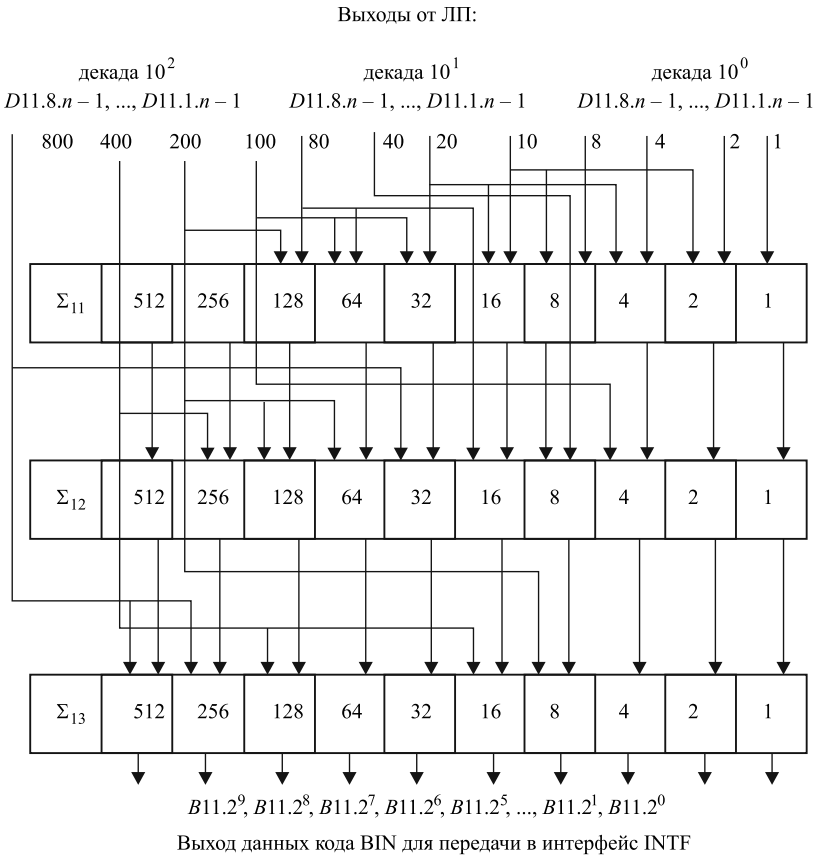

Рис. 3. Функциональная схема АЛП на трёх десятиразрядных сумматорах Σ_{11}, Σ_{12}, Σ_{13} для преобразования декадных кодов BCD от ЛП в параллельный двоичный код BIN для вывода через интерфейс INTF

дифференциальную нелинейность. Рассмотренные погрешности являются статическими, т. е. погрешностями одного отсчёта.

При измерении напряжения (аналоговой величины) последнее представляется рядом дискретных значений, каждое из которых преобразуется в код.

Интервал времени, через который определяется значение напряжения, является периодом дискретизации T_d. Этот период выбирается, исходя из времени, необходимого для процесса обработки сигнала (измерения) $U_{и\,max}$, без потери информации об аналоговом сигнале.

Максимальный период T_{max} дискретизации для выполнения последнего условия определяется по известной теореме Котельникова:

$$T_{max} \leqslant 1/2 f_{max},$$

где $f_{max} = 1/T_{max}$ — максимальная частота сигнала.

Динамическая погрешность не учитывается, если частота преобразований (выдачи выходного кода) более чем в 2 раза превышает частоту входного сигнала.

Время преобразования $t_{прб}$ — интервал от момента заданного изменения сигнала на входе до появления на выходе установившегося кода. Часто вместо времени преобразования быстродействие преобразователя характеризуется частотой преобразования $f_{прб}$.

Кроме рассмотренных основных параметров, АЦП характеризуются диапазоном и полярностью входных напряжений питания $U_{п1}$, $U_{п2}$, ..., (чаще два $U_{п1}$ и $U_{п2}$) и уровнями $U^0_{вых}$, $U^1_{вых}$ выходных цифровых сигналов, возможностью совместной работы с микропроцессорами, величиной температурной стабильности основных параметров АЦП и др.

Микросхемы АЦП обычно имеют диапазон изменения входного напряжения 0...10 В, а некоторые АЦП допускают использование двухполярного входного сигнала.

Разрядность двоичных АЦП параллельного типа составляет 6...12, причём некоторые АЦП допускают наращивание разрядности, что объясняется понижением точности резисторов в эталонном делителе по мере наращивания разрядов свыше 12.

Быстродействие АЦП определяется в основном методом преобразования и элементной базой (ТТШЛ, ЭСЛ, КМДП, МОП, и др.). Наибольшее быстродействие имеют АЦП параллельного действия на базе ЭСЛ и МОП-элементов ($t_{прб}$ = 20 нс и менее).

Преобразователи по уровням выходных сигналов согласуются с ТТЛ, ЭСЛ и КМДП-микросхемами. Большинство микросхем АЦП на сегодня совместимо с микропроцессорными устройствами, микроконтроллерами, программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), УЧПУ. Следовательно, их интерфейс должен работать с двоичными числами, например, в объёме от одного до нескольких байт, т. е. с 8 ~ 16 разрядами и более.

Выходные цепи в таких АЦП имеют три устойчивых состояния: логический 0, логическую 1 и состояние высокого сопротивления (шина микропроцессора не нагружается).

Выходным кодом АЦП чаще всего является двоичный код (BIN), где для представления каждого десятичного знака используются четыре двоичных разряда. Используются также обратный двоичный код и код с дополнением до двух (прямой и обратный).

Ряд АЦП разработан с расчётом на использование определённых видов индикаторов на выходе, например, светодиодных и жидкокристаллических. Для обеспечения работы большинства АЦП потребуется один или два источника питания [3].

Некоторые АЦП представляют собой БИС аналого-цифровой системы сбора данных. В состав этой системы, кроме преобразователя входят: многоканальный мультиплексор, оперативное запоминающее устройство, буферные схемы с тремя устойчивыми состояниями, схема управления и т. п. [1, 4].

Основными направлениями совершенствования АЦП являются повышение быстродействия основных узлов, особенно компараторов, а также использование АЦП комбинированного действия.

Отличием представленной разработки комбинированного параллельного АЦП является то, что в этом варианте выполняются одновременно преобразования кодов PDC в BCD отдельно для каждой декады, и наконец, коды BCD преобразуются на выходе в полный многоразрядный параллельный двоичный код BIN.

В общей структурной схеме АЦП параллельного типа, например в объеме n-разрядного позиционного десятичного кода (для реального преобразования аналогового сигнала U10 = 0 ~ 9,99...9 V), кроме декадных АЦП, используются следующие элементы (см. рис. 2):

логические преобразователи (ЛП) позиционного десятичного кода (PDC) по каждой из трёх декад U11.8.n − 1,..., U11.1.n − 1 в двоич-

ный десятичный параллельный код (BCD = 8, 4, 2, 1) в каждой из декадных ЛП: $D11.8.n-1$, $D11.4.n-1$,..., $D11.1.n-1$;

арифметико-логический преобразователь (АЛП) двоично-десятичного n-разрядного параллельного кода (BCD) в полный относительно BCD двоичный m-разрядный параллельный код (BIN).

Например, преобразование десятичных чисел, представленных в каждой B_{km-j} декаде как двоичные четырёхразрядные числа B_{km-j} в коде BCD, в общий двоичный код BIN(ΣB_{km-j}), выполняется последовательно на основе арифметико-логических операций сложения и сдвиговых операций для умножения на 10^{m-j}.

В арифметико-логическом преобразователе двоично-десятичного n-разрядного кода (BCD) в полный относительно BCD двоичный m-разрядный параллельный код выполняются указанные выше операции сложения и сдвига по уравнению, где учитывается замена операций умножения на 10^{m-j} на сдвиговые операции и сложение $B_{km-j}(2^3+2^1)^{m-j} = B_{km-j}(\leftarrow 3+\leftarrow 1)^{m-j}B_{km-j}$,
соответственно в каждой декаде:

$$\begin{aligned}\mathrm{BIN}(\Sigma B_{km-j}) &= B_{km-1}10^{m-1} + \\ &+ B_{km-2}10^{m-2} + B_{km-3}10^{m-3} + \ldots + \\ &+ B_{k1}10^1 + B_{k0}10^0 = B_{km-1}(2^3+2^1)^{m-1} + \\ &+ B_{km-2}(2^3+2^1)^{m-2} + B_{km-3}(2^3+2^1)^{m-3} + \\ &+ \ldots + B_{k1}(2^3+2^1)^1 + B_{k0}(2^3+2^1)^0.\end{aligned}$$

Значения коэффициентов B_{km-j} в каждом из двоичных составляющих принимает значения {9, 8,..., 1, 0} в соответствии с текущими значениями в кодах BCD соответствующих декад.

В структурной схеме, показанной на рис. 3, в ЛП применены компоненты, например, шифратор PDC в BCD, а также интерфейс INTF, которые достаточно известны в наборах ИМС [3, 4].

Функциональная схема АЛП, например, для трёхразрядного АЦП (см. рис. 3), выполнена из трёх параллельных групп десятиразрядных полных двоичных сумматоров Σ_{11}, Σ_{12}, Σ_{13}.

При сложении в сумматорах Σ_{11}, Σ_{12}, Σ_{13} используется известный принцип преобразования кодов BCD от выходов из каждой декады (D11.8.n—1, D11.4.n—1, D11.2.n—1, D11.1.n—1, ..., D11.8.0, D11.4.0, D11.2.0, D11.1.0) в двоичный код BIN [3].

Основой преобразования, здесь в блоке из трёх сумматоров Σ_{11}, Σ_{12}, Σ_{13}, является параллельное сложение с одновременным умножением всех значащих двоичных кодов в трёх декадах, а в общем случае также и аналогичное преобразование в двоичные разряды кодов BCD каждой из $n-1$ декад с одновременным умножением их на 10^{n-1} (табл. 1).

Сравнение параметров и характеристик представленной разработки параллельных АЦП с комбинированной обработкой кодов в ЛП и АЛУ, а также с применением интерфейса связи с оборудованием устройства ЧПУ [5, 6] демонстрирует значительно лучшие показатели по уровню точности, быстродействия и производительности как в сравнении с известными АЦП отечественного производства, так и с зарубежными аналогами (табл. 2).

Таблица 1

Сравнительная оценка точности δ_{ij} = (|U10—U20|)/U10 и $\delta_{0j} = \delta_i 100/k$ по выборке числа измерений $k = 5$ для АЦП параллельного типа с $n = 3$, 4-декадными преобразованиями кодов BCD (PCD) в 10 ~ 14-разрядные коды BIN

Вход U10 V	Выход U20 декады 3 BCD	3D δ_{1i}	3D δ_{0j}, %	Выход U20 декады 4 BCD	4D δ_{1i}	4D δ_{0j}, %	BIN 3D	BIN 4D
0,134	0,13	0,00	0,00	0,132	0,002	0,2	0000001101	00000010000110
2,345	2,34	0,00	0,00	2,344	0,001	0,1	0011101010	001001001001101
4,567	4,56	0,00	0,00	4,566	0,001	0,1	0111000001	01000111010101
6,789	6,78	0,00	0,00	6,788	0,001	0,001	1101001111	01111010001010
9,999	9,99	0,00	0,00	9,999	0,000	0,000	1111110111	10011100001111
δ_{13}, δ_{14}, δ_{15} $\delta_{0i} = \delta_{0j}100/k$	Измерения	0,00	0,00	Измерения	0,001	0,1 %	10-разрядный код	14-разрядный код

Таблица 2

Параметры точности, быстродействия и производительности в различных типах параллельных АЦП в объёме 8 ~ 14-разрядных двоичных кодов BIN

Тип АЦП	Число разрядов двоичных	δ_0, %	$t_{пр}$, мкс	Число источников питания	Аналоги	Примечание, применение
К1107ПВ4	8	±0,75	0,03	2	TDC1025	—
К1107ПВ6	10	±1,5	0,0	2	TDC1025	—
К1108ПВ1	10	±0,75	0,03	2	TDC1025	—
К1108ПВ2	12	±1,00	0,9	2	TDC1013	—
с ЛП + АЛП 3D	10	0	0,002	2	Аналогов нет	УЧПУ, ПЛК, КИП
с ЛП + АЛП 4D	14	0,1	0,003	2	Аналогов нет	УЧПУ, ПЛК, КИП, видео- и аудиоаппаратура

Производительность преобразования измеряемого сигнала U10 = 0 ~ 9,99 V в АЦП с параллельным преобразованием кодов, построенных в соответствии с предложенными выше схемами (см. рис. 1—3), зависит только от быстродействия отдельных элементов, входящих в ЛП и АЛП.

Точности δ_{ij}, δ_{0j} многоразрядных АЦП на примерах трёх-, четырёхдесятичных разрядного типа (декады 3BCD; декады 4BCD) можно оценить по результатам преобразования набора из пяти входных сигналов U10 V {0,134; 2,345; 4,567; 6,789; 9,999}.

Результаты точности преобразования (см. табл. 1), рассчитанные по каждому измерению δ_{ij} (δ_{13}, δ_{14}) и по средней величине погрешности δ_{0j}, не превосходят 0; 0,1 %, соответственно, по декадам от трёх до четырёх разрядов,

$$\delta_{ij} = (|U10—U20|)/U10;$$

$$\delta_{0j} = \delta_{ij}100/k.$$

Проведённый анализ устройств АЦП параллельного типа многоразрядных десятичных АЦП с использованием в каждой декаде ЛП и АЛП комбинированной обработки аналоговых и цифровых сигналов из позиционного кода в двоично-десятичный и далее — двоичного выходного кода с выводом данных через интерфейс даёт основание для широкого применения наиболее перспективных АЦП этого типа.

Диапазон применения предложенного АЦП не ограничивается управляющими устройствами типа УЧПУ, ПЛК, микроконтроллерами. Они могут использоваться и в системах автоматизированного управления технологическими процессами, в различных устройствах аудио- и видеотехники, а также в контрольно-измерительной аппаратуре обычного и специализированного назначения.

Библиографические ссылки

1. **Бугров Ю.Н., Курнасов Е.В.** Преобразование аналоговых сигналов на основе цифровых процессоров и микроконтроллеров в интерфейсе многоканальных датчиков // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 3. С. 13—19.

2. **Бугров Ю.Н.** Функциональные и программно-аппаратные особенности высокопроизводительных аналого-цифровых преобразователей в системах управления станков и оборудования с ЧПУ // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. III Междунар. науч. конф. М.: Машиностроение, 2014. С. 62—64.

3. **Токхейм Р.** Основы цифровой электроники / пер. с англ. М.: Мир, 1988. 392 с.

4. **Лебедев О.Н.** Цифровые микросхемы. Микросхемы памяти. Микросхемы ЦАП и АЦП: справочник. М.: Радио и связь, 1994. 159 с.

5. **Курнасов Е.В.** Практическая реализация объектной привязки технических устройств в SCADA-системах // СТИН. 2012. № 8. С. 2—6.

6. **Бугров Ю.Н.** Цифровая фильтрация сигналов управления и контроля в системах управления технологическим оборудованием и специализированными станками // Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении: науч. тр. Междунар. науч.-практич. конф. М.: Машиностроение, 2010. С. 347—353.

УДК: 517.925

А.И. Власов, канд. техн. наук, доц., **Д.Е. Зотьева, В.С. Евдокимов, Г.Г. Ревзин, Д.В. Феоктистов**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

vlasov@iu4.bmstu.ru

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Рассмотрены особенности проектирования универсального бортового радиоэлектронного оборудования для малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Формализованы требования к БПЛА. Кратко проанализированы направления разработки и тестовая платформа малого беспилотного аппарата. Рассмотрены особенности концептуального и структурного проектирования системы автопилотирования для БПЛА. Сформулирвоаны требования к разрабатываемому оборудованию, исходя из особенностей современных БПЛА.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; система управления; система навигации; автопилот; стабилизатор полёта; траектория полёта; бортовое радиоэлектронное оборудование; авионика;

The designing features of the universal bourd radio-electronic equipment for for small unmanned Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are considered. Requirements for UAV are formalized. The development direction and test platform of small UAV are briefly analyzed. The conceptual and structural designing features of the system autopiloting for the UAV are considered. The requirements to developed equipment based on the features of modern UAVs are formulated.

Key words: unmanned ferial vehicles; control system; navigation system; autopilot; flying stabilizer; the fying trajectory; bourd radio-electronic equipment; avionics.

Введение. К 2014 г. мировой оборот рынка БПЛА достиг 91 млрд дол. США [1], 10 млрд из которых относятся к рынку гражданских БПЛА. Это обусловлено свойствами БПЛА: компактностью, мобильностью, реализацией сложных маршрутов полётов [2]. Подобное сочетание характеристик открывает множество возможностей применения БПЛА в гражданской и в специальных сферах. Классификация БПЛА представлена на рис. 1 (см. обложку).

Важной составляющей БПЛА является бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО), во многом определяющее его функциональные возможности. При этом основное значение имеет навигационная система (НС), обеспечивающая точность позиционирования БПЛА во время автономной работы [3]. Обобщённая схема компонентов управления БПЛА представлена на рис. 2.

В концепции разрабатываемого комплекса электронного оборудования предусмотрена отдельная роль для системы автопилотирования: это исполнительный механизм для управления непосредственно планером. От способностей автопилота, его универсальности и надёжности зависит судьба воздушного судна, важных грузов и выполнение боевой задачи [4].

Первые системы автопилотирования появились в 1912 г. и представляли собой гидравлические приводы, управляющиеся гироскопами и высотомерами. Эти системы обеспечивали только стабилизацию полёта летательного аппарата с фиксированным крылом [5]. С развитием авиации и увеличением времени полёта воздушных судов стабилизирующие системы автопилотирования получили широкое развитие [6]. Виды автопилотируемых систем представлены на рис. 3 (см. обложку).

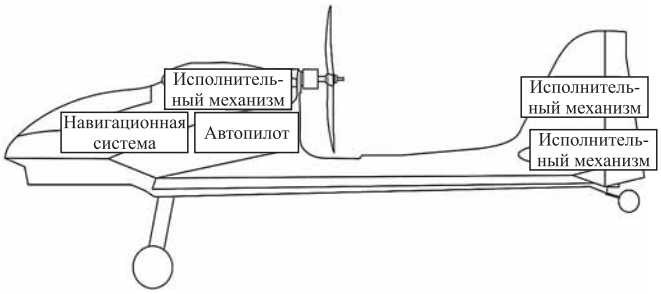

Рис. 2. Обобщённая схема компонентов управления БПЛА

Система автопилотирования должна обеспечивать ряд требований:

возможность выполнения предварительно заданного полётного задания в автоматическом режиме с возможностью перехода на ручное управление (в автономном режиме БПЛА должен следовать по заданному маршруту и вернуться в заданную точку) [7];

автопилот должен быть универсальным, что означает максимально широкие возможности программирования и конфигурации под различные беспилотные платформы;

система автопилотирования должна быть расширяемой, т. е. иметь возможность добавления желаемых модулей без значительного изменения существующей конструкции, а также замены устройств и механизмов, с которыми работает система автопилотирования, и максимально простую их интеграцию;

наличие командного пункта, где осуществляется мониторинг телеметрии и, в случае необходимости, ручное управление летательным аппаратом.

Анализ особенностей проектирования БПЛА. Обобщённая схема полёта БПЛА представлена на рис. 4. БРЭО воспринимает сигналы изменяющейся среды при помощи датчиков считывая величины скорости, углов наклона, высоты и другие параметры. Далее один из компонентов БРЭО производит обсчёт полученных данных и вырабатывает решения, которые подаются на интерпретатор. Сигнал управления влияет на органы управления планера, что, в свою очередь, приводит к изменениям параметров полёта [8].

Актуальным является разработка универсальной платформы БРЭО для малых БПЛА с фиксированным крылом. Особое внимание уделяется безопасности и отказоустойчивости БРЭО [9] ввиду высокой стоимости конкретного экземпляра БПЛА.

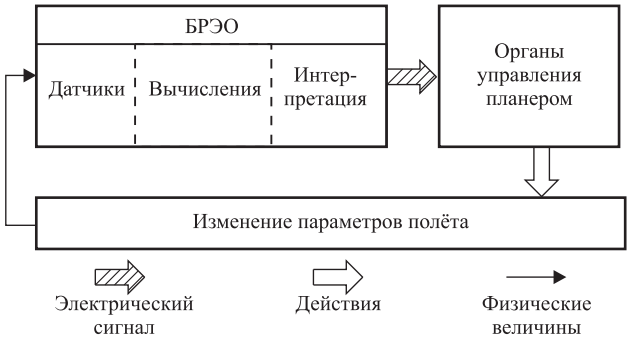

Рис. 4. Обобщённая схема управления полётом БПЛА

Анализ архитектуры бортового радиоэлектронного оборудования. БРЭО для БПЛА должно удовлетворять как конструкторским (минимально возможная масса, низкое энергопотребление, малые геометрические размеры и др.), так и системотехническим требованиям. Рассмотрим системотехнические требования к БРЭО.

Расширяемость. Современные БПЛА выполняют множество задач: гражданских (видеонаблюдение, системы фото- и видеосъёмки в сложных условиях, научные измерения, развлекательные задачи и др.) и специальных (разведка, целеуказание и т. п.). Многие из систем, используемые для этих задач (системы стабилизации, наведения оружия, видеокамер, антенн) требуют для работы те же пилотажные и навигационные данные, которые необходимы для управления летательным аппаратом. Например, системе лазерного целеуказания, автопилоту и системе наблюдения требуются значения углов самолёта по тангажу, крену и рысканию.

Большая часть систем автоматического пилотирования, доступных на рынке, исходя из конструкторских ограничений по массе и геометрическим размерам, интегрируют навигационную часть и автопилот в одну структурную единицу, что создаёт сложности для расширения такой системы. Например, популярная коммерческая система управления для малых БПЛА «FY-41 AP» не предусматривает возможность получения навигационных или пилотажных данных в течение полёта [6].

Несмотря на существенное усложнение конструкции, в разрабатываемом БРЭО предлагается разделить навигационную систему и автопилот на две отдельных обособленных структурных системных единицы, соединённых двусторонней информационной шиной, на которой навигационная подсистема широковещательно выдаёт навигационные и пилотажные данные для всех подключённых к шине устройств. При такой организации структуры БРЭО подключение любого дополнительного оборудования требует лишь спецификации на передачу навигационных и пилотажных данных (рис. 5).

Дополнительной возможностью при использовании общей шины является передача информации между всеми её устройствами при необходимости, например, управление действиями автопилота от системы автоматического ведения огня. В качестве используемой шины может применяться шина Controller Area

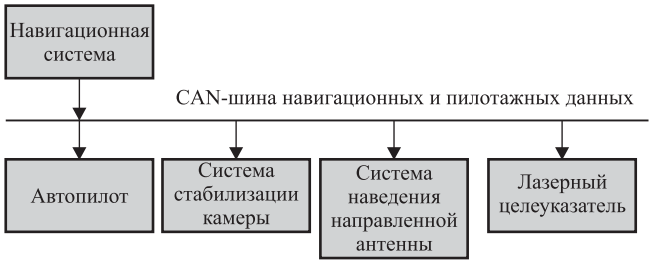

Рис. 5. Структурная схема возможных составляющих БРЭО

Таблица 1

Возможные конфигурации каналов управления

№ канала	Угол управления	Органы управления		
		Традиционный планер	V-образное оперение	Летающее крыло
1	Крен	Элероны	Элероны	Элероны
2	Тангаж	Руль высоты	Ruddervator	
3	Рыскание	Руль направления		Руль направления

Network. Это обусловлено её широкой распространённостью на транспорте и высокой скоростью (до 10 Мбит/с) передачи данных.

Универсальность. Существует множество конфигураций БПЛА с фиксированным крылом. Способы управления разными аэродинамическими конфигурациями, несмотря на одинаковые общие принципы управления полётом, отличаются. Традиционный планер управляется двумя элеронами по крену, рулём или рулями высоты и рулём направления, может иметь закрылки, тормозные щитки, шасси и т. д. Хвостовое оперение также может быть V-образным, с гибридными рулями направления и высоты (англ. «ruddervator»). Встречаются конфигурации, в которых функции закрылков выполняют отклоняемые на постоянный угол элероны («флапероны»). В конфигурациях типа «безхвостка» и «летающее крыло» управление происходит «элевонами» — гибридами элеронов и руля высоты. Силовые установки могут быть электрическими, бензиновыми или реактивными, каждая из них со своим способом управления. На БПЛА также могут быть установлены спасательные парашюты и другие устройства, управляющие полётом [7].

Каждая из возможных конфигураций обычно подходит для решения определённых задач. Разнообразие конфигураций требует закладывать в архитектуру БРЭО определённую универсальность. Использование микроконтроллера и ПЛИС в системе управления (автопилоте) обеспечивает возможность сравнительно легко подстраиваться под конкретную конфигурацию.

В табл. 1 рассмотрены возможные конфигурации каналов управления, реализуемые в аппаратной части автопилота. Конфигурация изменяется перепрограммированием контроллеров и ПЛИС, используемых в подсистемах БРЭО.

Функциональное устройство автопилота. Задачей НС является постоянное формирование полной навигационно-пилотажной картины БПЛА и передача этой информации автопилоту и другим устройствам, требующим эти данные (рис. 6).

Реализуемая для малых БПЛА НС представляет собой бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) с коррекцией от спутниковой навигационной системы и системы воздушных сигналов [10]. Инерциальная часть навигационной подсистемы реализуется на MEMS-датчиках, что позволяет отнести её к микроминиатюрным БИНС (МБИНС).

Одним из ограничений при проектировании систем инерциальной навигации является высокая стоимость традиционных акселерометров и гироскопов, являющихся основными составляющими этих систем. Естественным является интерес к сравнительно недавним

Рис. 6. Схема основных понятий систем инерциальной навигации

микроэлектромеханическим (MEMS) гироскопам и акселерометрам, в основном используемым в потребительской электронике, ввиду их крайне низкой по сравнению с другими стоимостью и малыми геометрическими размерами.

С другой стороны, MEMS-устройства отличаются сравнительно низкой точностью, что критически важно для задач инерциальной навигации ввиду аккумулирования ошибок интегрирования в ИНС и, соответственно, недостоверности навигационной информации [11]. Хорошим способом увеличения точности позиционирования является коррекция данных МБИНС с помощью спутниковой навигационной системы (СНС) или иных датчиков, характерных для объекта навигации, например системы воздушных сигналов (СВС) летательного аппарата.

Для объединения положительных сторон ИНС и СНС и взаимного исключения недостатков применяется гибридная система [12]. Кроме того, дополнительная коррекция осуществляется с помощью системы воздушных сигналов (СВС), что, как показано в работе [13], значительно улучшает качество фильтрации.

В качестве **инерциальных датчиков** выбраны высокоинтегрированные цифровые MEMS-датчики Insense MPU-9250A, сочетающие в себе 16-битный трёхосевой гиросокоп, трёхосевые акселерометр и магнетометр. Датчики подключаются по сравнительно высокоскоростному протоколу SPI [14].

Для увеличения частоты опроса датчиков, что положительно сказывается на качестве фильтрации, в систему включается два датчика, каждый из которых будет опрашиваться на частоте 2—3 кГц. Использование MPU-9250A значительно упрощает схемотехнику инерциальной части системы по сравнению с использованием отдельных трёхосевых датчиков. Кроме того, объединение трёх измерительных устройств на одном кристалле в заводских условиях значительно уменьшает ошибку несовпадения осей между разными устройствами.

Магнетометры позволяют эффективно демпфировать накапливающуюся ошибку гироскопов с помощью оценки ориентации самолёта в пространстве относительно магнитного севера.

MEMS-датчики, изначально предназначенные для неточных устройств ввода-вывода (например, датчики ориентации в смартфонах) и получения грубых сведений о состоянии устройства (например, детекторы свободного падения), обладают невысокой точностью. Без какой-либо коррекции расчётное положение статической системы на аналогичных датчиках «уходит» со скоростью 7 м/с. Даже с меньшим шумом на порядок ошибка интегрирования быстро сделает показания ИНС совершенно оторванными от реальности [15].

Специальные методы подавления ошибок MEMS-датчиков, начиная от усреднения нескольких показаний датчика за период времени и заканчивая составлением подробной математической модели ошибки датчика, хотя и благотворно действуют на точность полученных показаний, всё равно не способны полностью решить проблему накопления ошибки интегрирования. Таким образом, для МБИНС строго необходима периодическая коррекция от некоторого внешнего эталона и МБИНС пригодны лишь для краткосрочной навигации.

Требование к наличию внешней коррекции хорошо сочетается с типовыми характеристиками современного приёмника СНС. Так, например, частота обновления положения в популярном семействе GPS-приёмников uBlox не превышает 5 Гц. Очевидной является целесообразность объединения системы на основе MEMS-датчиков и GPS-приёмника: в промежутки между обновлениями положения от GPS-приёмника навигация осуществляется по интегрированию MEMS-датчиков, которые постоянно корректируются по GPS-приёмнику, что подавляет накопленную ошибку интегрирования.

Для реализации **гибридной системы** использован приёмник uBlox LEA-6S с возможностью «горячей замены» на другие приёмники семейства LEA-6, в том числе на приёмник LEA-6N с возможностью приёма сигналов системы ГЛОНАСС. Управление приёмником осуществляется по интерфейсу UART через двоичный протокол UBX, что позволяет достигнуть большой скорости обмена данными.

Приёмники семейства LEA-6 имеют выход GPS-времени TIMEPULSE, который можно использовать в качестве очень точного тактового сигнала для часов реального времени в используемых микроконтроллерах.

Качество фильтрации измеренной скорости и демпфирования случайной и постоянной составляющей в ИНС можно значительно повысить, используя мгновенные показания СВС (рис. 7), не подверженных накоплению ошибок интегрирования.

В качестве СВС используется измерительное устройство на основе трубки Пито. Ос-

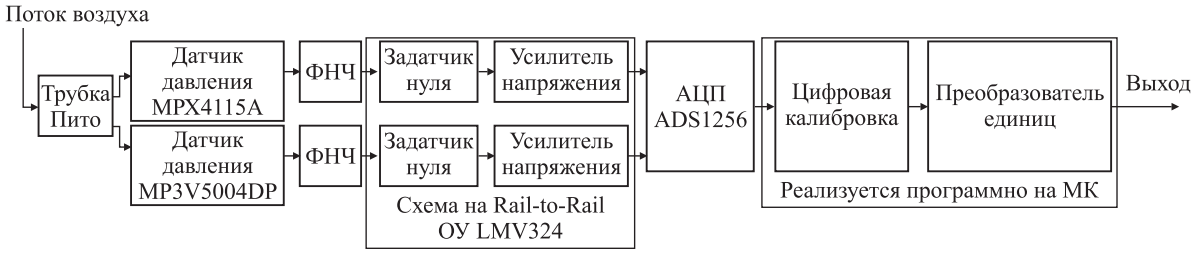

Рис. 7. Структурная схема системы воздушных сигналов

новными элементами СВС являются датчики статического и динамического давления, а также трубка Пито (приёмник воздушного давления). В качестве датчика статического давления выбран датчик MPX4115A, а в качестве датчика динамического давления — MP3V5004DP. Выбранные датчики обеспечивают необходимую точность при заданном диапазоне значений и условиях эксплуатации.

Получаемые данные обрабатываются микроконтроллером. Входные данные для микроконтроллера поступают с 24-разрядного АЦП ADS1256, обеспечивающего высокую точность преобразования сигнала. Для наиболее полного использования возможности датчиков давления и АЦП выходной сигнал датчиков давления усиливается таким образом, чтобы его максимальное значение было близко к максимальному значению входного сигнала АЦП, а минимальное равнялось нулю. Для этого используется предварительное задание нуля, которое осуществляется с помощью сумматоров на операционных усилителях (которые вычитают постоянную составляющую выходов датчиков давления) и усилительных каскадах с отрицательной обратной связью, отображающих диапазон выходов датчиков на весь диапазон напряжения питания АЦП. Применяемые операционные усилители LMV324, по четыре операционных усилителя с CMOS-выходами на кристалле, предназначенные специально для использования в схемах с однополярным питанием. Для того, чтобы исключить высокочастотные помехи на входе каскадов, применяются фильтры низких частот с частотой среза 30 Гц, представляющие собой RC-цепочки.

Надёжная оценка воздушной (приборной) скорости летательного аппарата требует значения температуры воздуха, от которой зависит плотность, и, следовательно, разность давлений в трубке Пито.

Вычислительная система. Показания датчиков собираются и обрабатываются 32-битным ARM-микроконтроллером ST Microelectronics STM32F429 с сопроцессором чисел с плавающей запятой. Качество инерциальной навигации находится в прямой зависимости от частоты опроса инерциальных датчиков, поэтому разумно всю вычислительную мощность этого микроконтроллера использовать только для опроса датчиков, первичной обработки и цифровой фильтрации их показаний. Как правило, настройка и работа с цифровыми датчиками требует отправки, приёма и обработки большого количества различных пакетов по шинам разных стандартов, что создаёт значительную нагрузку на процессор и требует постоянного переключения между выполняемыми задачами, что снижает эффективность конвейера инструкций процессора [10].

В задачи первичной фильтрации датчиков входит усреднение показаний, удаление известной постоянной составляющей, перевод в значащие единицы измерения (отсчёты АЦП в измеряемую физическую величину). Микроконтроллер опроса датчиков контролирует показания датчиков и сигнализирует на цепь аварии при отказе какого-либо из них.

Другим важным фактором является частота формирования навигационного решения. Чем меньше частота получения пилотажной картины, тем меньше значения производных углов управления, которые может выдерживать автопилот без опасности ввести БПЛА в опасный режим полёта. Для максимального использования ресурсов и обработки наибольшей возможной частоты формирования навигационного решения эту задачу решает отдельный микроконтроллер STM32F439 с подключённой внешней оперативной памятью. Математический аппарат инерциальной навигации достаточно сложен, поэтому разумно полностью использовать ресурсы отдельного микроконтроллера именно под эту задачу.

Между собой микроконтроллеры связаны двумя шинами USRT (Universal Synchronous Reciever-Transmitter — универсальный синхронный приёмопередатчик), вариантом распространённого протокола UART с использованием синхросигнала, что позволяет выставить

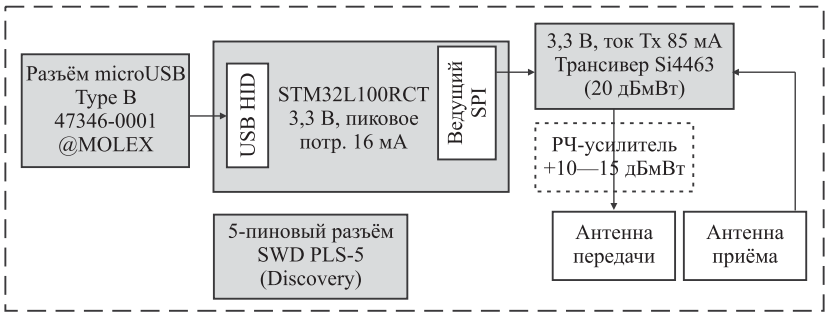

Рис. 8. Структурная схема наземного терминала

скорость обмена значительно выше, чем принятые условно-максимальными в UART сотни килобод в секунду.

Полученное навигационное решение в установленном формате широковещательно передаётся на шину CAN через приёмопередатчик для использования другими подсистемами БРЭО.

Наземный терминал и дистанционное управление. Управление и наблюдение за полётом БПЛА осуществляется с командного пункта (КП) (рис. 8).

Для обеспечения связи с БПЛА используется двунаправленный цифровой радиоканал, основанный на микросхеме-трансивере Silicon Labs Si446X, развивающей до 1 Вт выходной мощности на широкой полосе частот, включающей гражданские диапазоны 433 и 868 МГц и обеспечивающей надёжную связь на расстоянии до 10 км.

Наземная станция управления БПЛА представляет собой модем-приставку к управляющей ЭВМ. Специализированное программное обеспечение на ЭВМ формирует команды для передачи на БПЛА и позволяет следить за его режимами полёта, выполняя функцию телеметрии.

Дублирование контуров управления. Конечной целью разработки БРЭО является полная реализация управления через цифровой канал. Однако целесообразно для универсальности БРЭО реализовать запасной источник управления:

частичного или полного перехвата управления в случае критического отказа автопилота или навигационной подсистемы;

отладки алгоритмов стабилизации по отдельным углам пилотирования;

оценки работоспособности и точности показаний навигационной подсистемы без передачи управления на автопилот, если исправность навигационной подсистемы вызывает сомнения.

В качестве запасного источника управления выбираются стандартные авиамодельные приёмник и передатчик Sanwa RDS8000 2,4 ГГц, обеспечивающие дистанционное управление по восьми каналам на расстоянии до километра прямой видимости, а с направленной антенной и усилителем мощности передаваемого сигнала — до 10 км. БРЭО совместимо и с другими системами радиоуправления. Источник управления переключается от одного из дополнительных каналов системы радиоуправления (для RDS8000 — 7 или 8 канал «AUX1/2»).

Схема переключения источника управления реализуется на цифровых мультиплексорах так, что при переключении неактивный источник управления полностью отключается от исполнительных сервоприводов и неспособен повлиять на исполнительные сервоприводы. Так как авиамодельные радиопередатчики ориентированы на управление сервоприводами, то для того, чтобы двухпозиционным переключателем менять логический уровень для управления мультиплексорами, его необходимо предварительно преобразовать. Стандартные сервоприводы управляются специальным вариантом широтно-импульсной модуляции с периодом импульса 24 мс (рис. 9). Длина импульса, управляющего углом разворота сервопривода, составляет от 1100 до 1900 нс. Принимая, например, 1100 нс за «1» и 1900 нс за «0» (в зависимости от желаемого «выключенного» положения тумблера на приёмнике), можно разработать соответствующий преобразователь.

Схему мультиплексирования можно реализовать на дискретных элементах стандартной логики (рис. 10), а именно мультиплексорах-переключателях 2-1 и 4-1, но так как в любом случае требуется реализация преобразователя, который требует большого количества логических элементов, разумно использовать программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), например, семейства Altera MAX II.

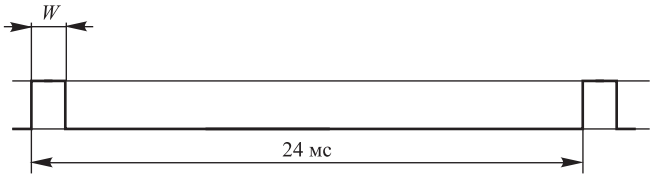

Рис. 9. Сигнал управления сервоприводами

В зависимости от логического уровня, формируемого положением тумблера на передатчике системы радиоуправления, сигналы управления приходят либо с ручного радиопередатчика, либо с автопилота. При нештатной ситуации и срабатывании цепи аварии на регулятор оборотов двигателя будет подан логический ноль, что вызовет его остановку вне зависимости от текущего источника управления.

Дополнительным преимуществом ПЛИС является возможность переконфигурирования логической схемы под другие типы радиоуправления или двигателя. Например, для электрического бесколлекторного мотора сигналом остановки является логический ноль, но для двигателя внутреннего сгорания необходимо подать сигнал, соответствующий закрытому положению дроссельной заслонки. Для переустановки БРЭО в бензиновый БПЛА потребуется только сменить прошивку ПЛИС, а не конструировать новое схемотехническое решение.

Платформа для испытания БРЭО. Для отработки алгоритмов управления и проведения стендовых и лётных испытаний БРЭО использована беспилотная платформа на основе малого планера VolantexRC Ranger EX 757-3 (рис. 11, см. обложку) [16]. Данная система изначально предназначена для FPV-полётов (направление в современном авиамоделизме, связанное с полётами с использованием камеры на дальние расстояния).

Размах крыла планера 2 м, длина фюзеляжа 1,2 м. Аэродинамическая компоновка — высокоплан с толкающим винтом и классическим хвостовым оперением. Вид тяги — бесколлекторный электрический мотор мощностью 500 Вт. Взлётная масса планера 4 кг, собственная масса 1,2 кг.

На борту платформы оборудованы цепи для питания бортовой аппаратуры от аккумуляторов высокой ёмкости через высокоэф-

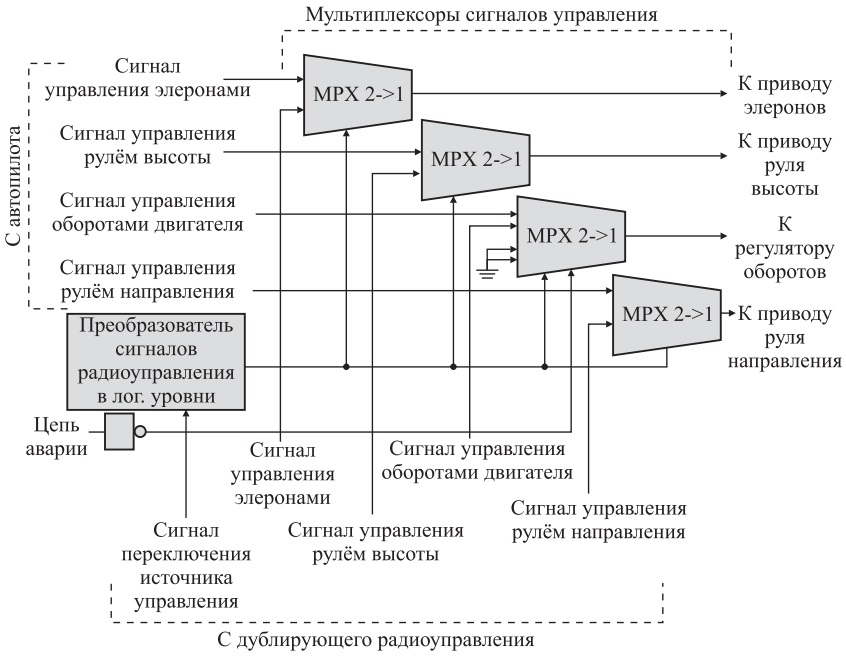

Рис. 10. Логическая схема ПЛИС дублирования контуров управления

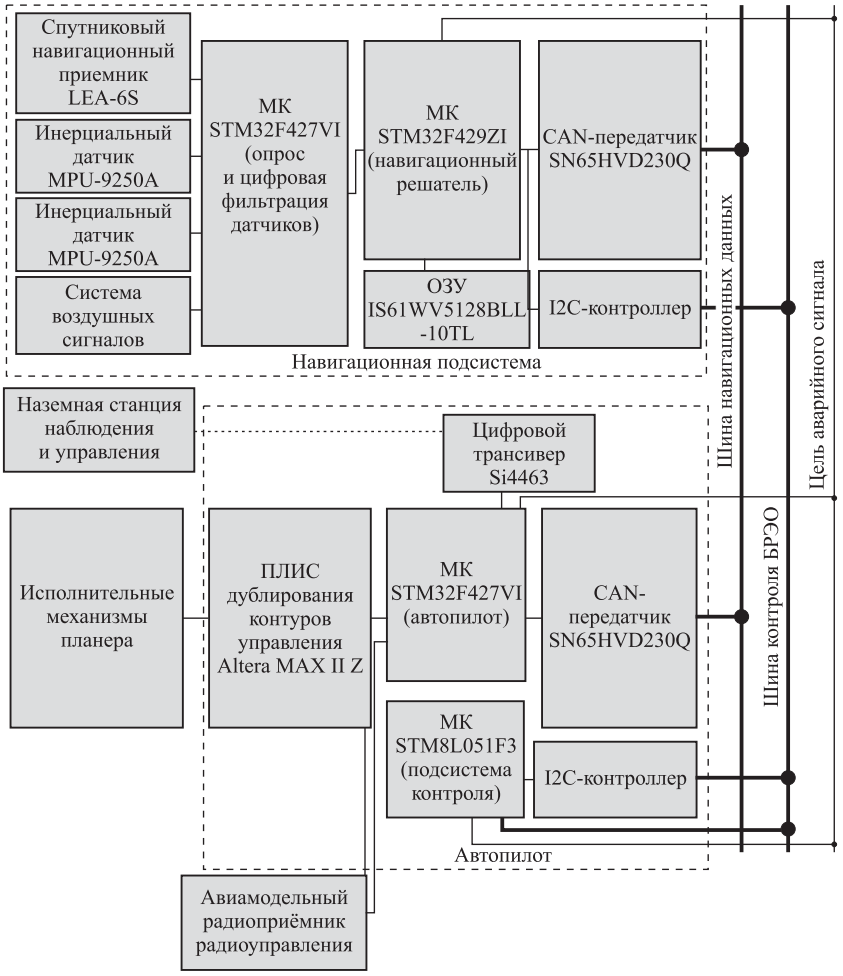

Рис. 12. Обобщённая структурная схема БРЭО

Таблица 2

Назначенные каналы управления в испытательной платформе

№	Ranger EX	
	Обозначение	Назначение
1	РВ	Серворуль высоты
2	Э	Два сервоэлерона (Y-кабель)
3	ОД	Выход регулятора двигателя
4	РН	Серворуль направления
5	УВП	Устройство выпускного парашюта
6	ЗЛ	Сервозакрылок
7	РУ	Переключение управления
8	РЗ	Резерв — 1

фективные импульсные источники питания. Борт оборудован радиоприёмником дублирующего радиоуправления на частоте 2,4 ГГц RX-841FS для возможности перехвата управления в случае отказа разрабатываемого оборудования, антенной 868 МГц с круговой поляризацией для огранизации связи с наземной станцией через трансивер Si4463. Установлено устройство управления оборотами бесколлекторного двигателя (рис. 12).

Специальные отверстия в носовой части планера служат для вентиляции электроники внутри и установки трубки Пито — приёмника воздушного давления. Установлены две термопары для дальнейшего подключения к БРЭО для контроля за температурой ответственных узлов. Назначение каналов управления БРЭО для работы на данной платформе приведено в табл. 2.

Таким образом, используемая платформа является усреднённой моделью планера, с которой может работать разрабатываемая БРЭО.

Анализ принципов работы систем безопасности полётов. Основные методы контроля работоспособности аппаратуры и безопасности полётов представлены на рис. 13 (см. обложку) [11].

При этом БРЭО является сложной технической системой, что означает, во-первых, высокую стоимость комплекта оборудования для оснащённого БПЛА, во-вторых, — увеличение вероятности отказа, угрожающего БПЛА, особенно в период разработки подсистем проектируемого БРЭО, что требует наличия системы спасения БПЛА в аварийной ситуации.

На рынке системы спасения представлены специальными миниатюрными парашютами, обеспечивающими сравнительно безопасную вертикальную посадку отказавшего БПЛА. БРЭО, соответственно, должно принимать решение о выпуске парашюта и отключении ходового двигателя при аварии, причём отключение должно происходить вне зависимости от сигналов, формируемых в этот момент автопилотом (рис. 14).

В простейшем случае устройство спасения может активироваться по команде оператора с земли, однако реакции оператора может быть недостаточно для своевременного предотвращения крушения, что требует автоматического срабатывания системы спасения. Кроме того, источником отказа может быть любая из бортовых подсистем, а отказы отдельных подсистем могут быть как обнаружены самой подсистемой (например, отказ акселерометра будет обнаружен микроконтроллером НС), так и не обнаружены (например, полное «зависание» микроконтроллера автопилота).

Другим важным требованием является независимость функционального блока, отвечающего за обеспечение безопасности от какой-либо из подсистем БРЭО [17]. Иными словами, для улучшения надёжности БПЛА функции контролирования работоспособности системы не возлагаются на существующие микроконтроллеры подсистем, а вводится дополнительная подсистема для контроля и управления аварийными ситуациями.

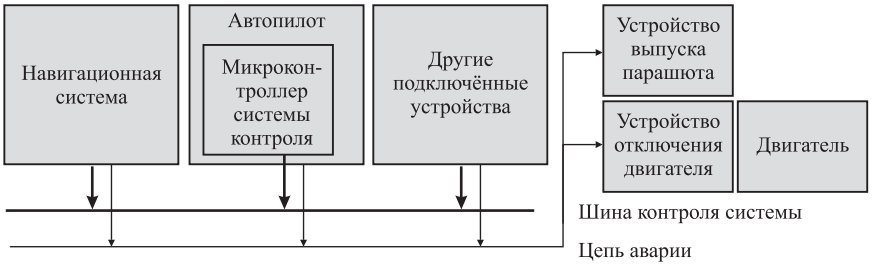

Рис. 14. Обеспечение безопасности БПЛА

Предлагаемое архитектурное решение заключается в следующем:

1. Все подсистемы БРЭО подключаются к шине контроля системы, в качестве которой используется двухпроводная шина I2C. В подсистему автопилота

включается отдельный специальный микроконтроллер системы контроля (ведущий на шине), задача которого — поочерёдно отправлять на все подсистемы пакеты случайных данных [18]. Подсистема, получившая данные, вычисляет их контрольную сумму с использованием полинома, общего для всех подсистем, и отправляет её назад. Микроконтроллер самостоятельно вычисляет контрольную сумму и сверяет её с полученной. Несовпадение контрольной суммы или её отсутствие является основанием для принятия решения об аварии. Такая схема контроля позволяет обнаружить «зависание» подсистемы, порчу её прошивки, отсутствие напряжения питания подсистемы и другие отказы. В свою очередь, контролируемое устройство может принять решение о сигнализации аварии, если оно не получает пакета дольше некоторого обусловленного времени.

2. Все подсистемы БРЭО (и микроконтроллер системы контроля) подключаются на общую электрическую цепь, подтянутую к логической единице, причём выходы этой цепи должны представлять собой «открытый коллектор». Высокий логический уровень в цепи означает штатную ситуацию, низкий уровень означает нештатную ситуацию и является сигналом для отключения двигателя и выпуска парашюта. Подключение через открытый коллектор означает, что каждое из устройств, включая микроконтроллер подсистемы контроля, может задать низкий уровень в цепи и таким образом сигнализировать об аварии вне зависимости от других устройств и их состояния.

Критически важно в этой системе схемотехнически реализовать аппаратный канал управления двигателя так, чтобы при низком уровне в цепи аварии двигатель отключался вне зависимости от формируемых автопилотом или ручным радиоуправлением сигналов [19].

Итак, между подсистемами БРЭО проходят три соединения:

шина навигационных и пилотажных данных [18], по которой навигационная система широковещательно передаёт данные о состоянии БПЛА: углы крена, тангажа, рысканья, скорость, координаты и т. д. Тип шины — CAN.

шина контроля системы, через которую постоянно контролируется исправность всех подсистем БРЭО БПЛА. Тип шины — I2C (DDC/IIC).

цепь аварии, сигнализирующая о нештатной ситуации с одной из подсистем.

Предлагается все подсистемы оснащать стандартными разъёмами (табл. 3).

Таблица 3

Распиновка стандартного разъёма БРЭО

№ контакта	Шина	Сигнал
1	Шина навигационных и пилотажных данных (CAN)	CANH
2		CANL
3	Земля	GND
4	Земля	GND
5	Шина контроля I2C	SDA
6		SCL
7	Цель аварии	GLOB_FAILURE

Применение в автопилотах [20] промышленных бортовых ЭВМ и полноценной операционной системы обеспечивает относительную простоту разработки программного кода для управления системами БПЛА. Однако использование распространённых и хорошо известных решений приводит к появлению вредоносных программ, позволяющих считывать полётные данные или даже получить контроль над БПЛА, что приводит к необходимости обеспечения безопасности программного обеспечения и передаваемых данных, подобно тому, как это происходит в персональных компьютерах, что является достаточно сложной задачей. Альтернативой является отказ от использования готовых систем и самостоятельное проектирование БРЭО (например, с использованием программируемых микроконтроллеров и/или программируемых логических интегральных схем).

Важным компонентом БПЛА является система спасения. В простейшем случае она может активироваться по команде оператора с земли, однако реакции оператора может быть недостаточно для своевременного предотвращения крушения, что требует автоматического срабатывания системы спасения. Кроме того, источником отказа может быть любая из бортовых подсистем, а отказы отдельных подсистем могут быть как обнаружены самой подсистемой (например, отказ акселерометра будет обнаружен микроконтроллером НС), так и не обнаружены (например, полное «зависание» микроконтроллера автопилота).

На рынке системы спасения представлены специальными миниатюрными парашютами [21], обеспечивающими сравнительно безопасную вертикальную посадку отказавшего БПЛА. БРЭО, соответственно, должно прини-

мать решение о выпуске парашюта и отключении ходового двигателя при аварии, причём отключение должно происходить вне зависимости от сигналов, формируемых в этот момент автопилотом.

Заключение. Таким образом, были рассмотрены типовые задачи, решаемые ИНС. Учтены особенности гибридной системы навигации, рассмотренны источники данных для коррекции и демпфирования накапливающихся ошибок интегрирования в ИНС. Предложенная архитектура имеет широкие возможности по добавлению дополнительных модулей и характеризуется повышенной безопасностью. Основным требованием при этом является стандартизация протокола обмена данными. Обоснован выбор элементной базы для реализации схемотехнического решения, исходя из поставленных требований и выработанной архитектуры.

Обеспечение безопасности полёта является одной из наиболее важных задач при проектировании БПЛА. Предложенные методы контроля работоспособности оборудования и защиты от отказов обеспечивают достаточную степень надёжности. Для посадки БПЛА могут использоваться классические решения [21].

Библиографические ссылки

1. **ReportsnReports.** The Global UAV Market 2013-2023. 2013, Dallas, TX: 2008 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.reportsnreports.com/reports/266211-the-global-uav-market-2013-2023.html (дата обращения: 09.02.2015).

2. **Guilin Feiyu** Electronic Technology Co., Ltd. FY-41AP Lite AutoPilot & OSD System Installation & Operation Manual. Gui Lin: 2013. 32 p.

3. **Rade Stančić**, **Stevica Graovac**. Land Vehicle Navigation System Based on the Integration of Strap-Down INS and GPS (англ.) // ELECTRONICS. 2011. Т. 15. № 1. С. 54—61.

4. **Jordan Crittenden, Parker Evans.** MEMS Inertial Navigation System. Cornell University, United States, 2008. 164 p.

5. **Ефимова М.Г.** Конструкция и основные функциональные системы летательных аппаратов: учебное пособ. М.: МГТУГА, 2005. 52 с.

6. **Кузовков Н.Т., Салычев О.С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.

7. **Мкртчян В.И.** Решение задачи навигации с помощью бесплатформенной инерциальной системы навигации и системы воздушных сигналов // Молодежный научно-технический вестник. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 16.

8. **uBlox Inc.** u-blox 6 GPS, QZSS, GLONASS and Galileo modules [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA6_ProductSummary_(GPS.G6-HW-09002).pdf (дата обращения: 09.02.2015).

9. **Метод** и устройство предотвращения несанкционированного полёта летательного аппарата // Патент США №20040217232 A1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahtml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=7475851.PN.&OS=PN/7475851&RS=PN/7475851 (дата обращения: 09.02.2015).

10. **Первый** дрон с автопилотом под APM Linux. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL www.xakep.ru/2014/12/23/erie-brain/ (дата обращения: 09.02.2015).

11. **Бэкдор Maldrone** позволяет перехватить управление беспилотником. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: www.ferra.ru/ru/techlife/news/2015/01/30/Maldrone/ (дата обращения: 09.02.2015).

12. **Терентьев Д.С., Власов А.И.** Бортовые сенсорные панели с дактилоскопическими датчиками на транспорте // Датчики и системы. 2014. № 4. С. 45—55.

13. **Шахнов В.А., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др.** Гибридные чувствительные элементы интеллектуальных сенсоров распределённых управляющих систем // Отчёт о НИР № 7.6161.2011. 01.01.2013. 154 с.

14. **Антохин А.И., Власов А.И., Косолапов И.А.** Концепция системы стабилизации на базе МЭМС гироскопа // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 10. С. 51.

15. **Vlasov A., Yudin A.** Distributed control system in mobile robot application: general approach, realization and usage // Communications in Computer and Information Science. 2011. Т. 156 CCIS.С. 180—192.

16. **Кузнецов И.А., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Исследование навигационных систем в процессе полунатурного эксперимента // Сб. «Достижения вузовской науки». Труды междунар. научн.-практ. конф. 2014. С. 152—156.

17. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кузнецов И.А.** Исследование особенностей спутниковых навигационных систем // Сборник «Теоретические и практические исследования XXI века». Труды междунар. научно-практической конференции. М., 2014. С. 579—583.

18. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шэнь К.** Алгоритмические способы коррекции автономных инерциальных навигационных систем // Сб. «Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014)». 7-я Российская мультиконф. по проблемам управления. ГНЦ РФ ОАО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР». 2014. С. 637—641.

19. **Неусыпин К.А., Кочешков М.А.** Метод регенерации навигационного комплекса летательного аппарата // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 22—27.

20. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

21. **Каталог** продукции — парашютные системы. М.: ООО «Paraavis». 2012. 144 с.

УДК 004.6

А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пронин,**
Е.В. Смирнова, канд. техн. наук, доц., **М.А. Шпак**
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

pav@bmstu.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ МИГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ В ОНТОЛОГИЮ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Предложена технология автоматизированной миграции данных из реляционной базы данных в онтологию предметной области. Кратко описана существующая медицинская информационная система, на примере которой рассмотрен процесс конвертации данных из существующей системы с помощью вспомогательной структуры представлений данных.

Ключевые слова: база данных; извлечение знаний; электронный архив; онтология; информационная система; интеллектуальная система.

The technology of automatic data migration from relative databases in to object area ontology is proposed. The existence medical information system is briefly described. Data conversion process from existence system by means of data presentation auxiliary structure is considered as an example of the existence medical information system.

Key words: database; knowledge extraction; electronic archives; ontology; information system; intellectual system.

Проблема извлечения знаний из архивов информационных систем, представляющих собой в большинстве случаев реляционные базы данных, в наши дни становится все более актуальной. Средствами стандартных общеупотребительных поисковых систем она не решается. Публикации последних дней показывают интерес исследователей к использованию новых средств для построения баз знаний. В работе [1] предложена процедура практической реализации системы извлечения знаний из электронного архива проектной документации с использованием иммунного алгоритма мультимодальной оптимизации. В работах [2, 3] исследуется вопрос использования онтологии для системы извлечения знаний в образовательной информационной системе. Об автоматизации разработки системы управления инновационным развитием информационных систем говорится в работе [4].

В предлагаемой статье рассмотрена процедура преобразования реляционной базы данных в базу знаний, построенную на онтологии предметной области применительно к медицинской тематике. В области информационных технологий онтология — это семантическая сеть, построенная таким образом, чтобы понятия, как вершины сети, описывали определённый предмет (тему), а связи между понятиями отражали использование этих понятий совместно. Формально понятие в онтологии идентифицируется как объект или класс, который соединён с другими объектами или классами. Класс идентифицируется как множество сущностей с общими характеристиками, содержит описание самих сущностей и их характеристик. Использование (иерархической базы данных) онтологии приводит к существенному прогрессу в инженерном образовании, когда становится возможной автоматизированная интеллектуальная генерация тестового материала [3].

Ниже описана последовательность шагов по извлечению информации из записей реляционных баз данных. Извлечённая информация на следующем шаге должна быть преобразована в иерархическое представление. В качестве системы хранения будет использована онтология предметной области.

Использование онтологии предметной области применительно к инженерным знаниям означает наличие формализованного и декларативного описания предмета изучения. Часто такую онтологию называют онтологической базой знаний [3], которая может быть выделена в специфическую область. Авторы статьи сотрудничают с информационным отделом в медицинской клинике, которая имеет локальную сеть с разработанной только для нужд клиники медицинской информационной системой (МИС), имеющей в качестве системы хранения информации реляционную базу данных MySQL. Пользователи, в данном случае это врачи, средний медперсонал и администра-

тивные работники, имеют доступ к данным и к самой МИС через веб-интерфейсы, написанные на языках HTML, PHP, JavaScript.

Как правило, МИС, разработанные стихийно (зачастую, непрофессионалами), работают с большими проблемами и ошибками. Отсутствует документация об архитектуре МИС, а руководства и описания, если они имеются, относятся только к инструкциям для пользователя, и никак — не для администрирования самой МИС. Это значит, что внести какие-либо изменения или осуществить модернизацию в МИС невозможно. Наличие php-скриптов, таблиц базы данных и процедур, написанных на языке JavaScript — это, как правило, та информация, опираясь на которую приходится разбираться со структурой базы данных (в нашем случае, шесть баз данных, к которым мог обращаться один запрос сразу).

Процесс реинжиниринга состоял из следующих шагов:

получение доступа к базе(ам) данных;

отображение базы данных с помощью средств администрирования в табличный вид на рисунке;

выявление внутренних связей полями таблиц;

выявление случаев избыточного дублирования одних и тех же полей в разных таблицах (что в большинстве случаев приводит к сбоям в работе системы).

Выполнение этих шагов является необходимой основой для проектирования перехода от базы данных к базе знаний.

Краткая характеристика существующей МИС. Медицинская система служит для хранения всевозможных записей врачей. В существующей системе насчитывается более 300 различных типов записей. Для хранения заполненных врачами данных используется база данных, имеющая 50 различных таблиц. В среднем в каждой таблице насчитывается по шесть типов записей. Существует таблица связки, где собрана информация о том, какой тип записи в какую из таблиц записывает входные, внесённые пользователями данные. Кроме этого, еще одна вспомогательная таблица хранит соотношения между полями форм интерфейса и номерами столбцов в таблице хранения, т. е. имеется список номеров столбцов в конкретной таблице. Номера столбцов передаются в php-скрипт, который последовательно определяет имена столбцов вставки данных. Строка запроса на добавление внесённой пользователем информации формируется в специальной процедуре, в нужные поля найденной ранее таблицы заносятся входные данные.

Даже из упрощённого описания видно, что такой подход значительно замедляет процесс записи информации при работе с системой, а большое количество дублируемых столбцов и отсутствие единой структуры делает почти невозможным получение достоверной информации в процессе поиска данных, проведения анализа и составления статистики.

Результат отображения содержания одной из шести баз данных в существующей МИС клиники, относящей к электронной истории болезни пациента, приведён на рис. 1, из которого очевидно, что связи между полями таблиц отсутствуют. Из установленного факта понятно, что все связи организованы на уровне выполнения скриптов. Такой, часто встречающийся, случай реализации баз данных может быть объяснён лишь низкой компьютерной (программистской) грамотностью создателей МИС.

Например, выяснилось, что идентификационный номер каждого пациента patientID в существующей МИС спрятан внутри базы данных в большей части таблиц (epm_records,

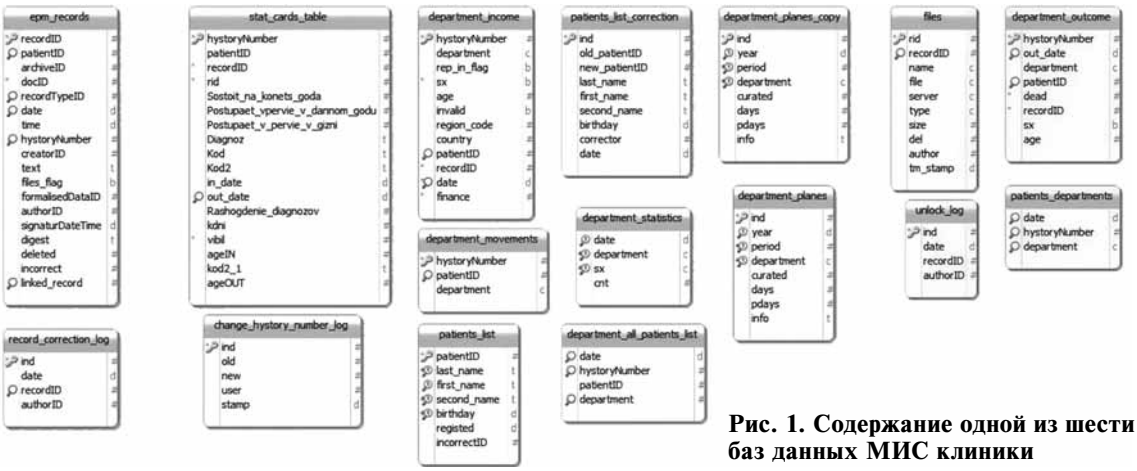

Рис. 1. Содержание одной из шести баз данных МИС клиники

stat_cards_table, department_income records и др.). В результате система не может идентифицировать пациентов с одинаковыми именами. Более того, система рассматривает их как различных пациентов.

Выше на примерах описаны и показаны несколько проблем существующей МИС. Можно сказать, что количество таких «проблем» достигает сотни, но вряд ли этично по отношению к первопроходцам, которые разработали первые МИС, упрекать их в этом. В любом случае — МИС работает и значительно облегчает жизнь врачам.

После выявления всех связей между полями было создано справочное руководство, позволяющее «добираться» до каждой сущности кратчайшим путём в этой «запутанной сети». Для извлечения информации и организации доступного отображения существующей базы данных написано несколько процедур конвертации. Описанию одной из них посвящён следующий раздел статьи.

Процедура конвертации данных из реляционной базы данных и подготовка процедуры миграции. Для запуска процесса конвертации данных из существующей системы необходимо создать вспомогательную структуру представлений данных, позволяющих уйти от вынесения данных во внешние обработчики, например в php-скрипты.

Конвертация данных происходит в несколько этапов:

«обследование» — процесс выявления связей таблиц и полей в существующей структуре и написание руководства по эксплуатации системы;

«таблицы связки» — подготовка вспомогательных представлений и группирующих таблиц на основе выявленных связей;

«временный каркас» — создание промежуточной консолидирующей структуры хранения данных;

«разработка процедур» — составление процедур конвертации данных из существующей структуры в промежуточный каркас, отладка и оптимизация процедур за счёт создания вспомогательных индексных таблиц связки (как-то надо этот каркас описать в общепринятых терминах);

«перенос данных» — поэтапный процесс заполнения промежуточного каркаса данных.

Этап «Обследование». Процесс обследования занимает самую продолжительную часть времени. Составленное грамотно руководство позволяет лицам, производящим конвертацию данных, избежать возможных ошибок и раскрывает тонкости работы системы в целом.

Этап «Таблицы связки». Для создания вспомогательных таблиц связок, в рамках примера, описанного выше, необходим сбор информации об именах таблиц и полей для всех 55 таблиц хранения в связке с данными о типах записей. Для этого использованы системные таблицы MySQL, хранящие полную информацию обо всей структуре базы данных. Группирующий запрос связал эту информацию с данными из таблиц медицинской системы о записях и полях в них, в результате чего получен единый справочник по всем типам записей. Похожим образом были получены вспомогательные сводные таблицы пользователей, пациентов и других сущностей.

Этап «Временный каркас». В качестве промежуточной консолидирующей структуры хранения данных выбрана так называемая структура «Бездонный стакан», которая состоит из трёх таблиц: справочник типов, таблица-связка событий и таблица значений (рис. 2, см. обложку).

Таблица-справочник имеет иерархическую структуру и может хранить любую структуру типов. Типы записей имеют первый уровень и ссылаются на корневую запись, а поля каждого типа записей имеют второй уровень и ссылаются на свой тип записи. Таблица событий хранит журнал событий определённого типа, где ID типа ссылается на запись первого уровня таблицы типов. Таблица значений ссылается на определённую запись в таблице событий и на запись в таблице типов со вторым уровнем.

Этап «Разработка процедур». Процедура переноса не должна пропустить ни одной записи в существующей системе, поэтому в качестве основного списка работы процедуры следует использовать существующий журнал событий МИС. Для каждой записи необходимо произвести перегруппировку данных для внесения её в промежуточный каркас.

На основе вспомогательных представлений, полученных на этапе «Таблицы связки», данные каждой записи разбиваются на поля для таблицы журнала и записи для таблицы значений. Следует предусмотреть обработчики исключений, так как существующие данные могут содержать в себе неверные записи, хранить значения Null, текстовые поля могут содержать служебные символы, что сделает работу процедуры переноса невозможной.

Ниже в качестве примера приведены листинги процедур конвертации.

Листинг 1. Процедуры выборки журнала переноса

```
DECLARE cur2 CURSOR FOR                    Курсор основного цикла
      SELECT t2.recordID                   Получаем список записей за период
      FROM main _ base.epm _ records as t2
      where
      (t2.deleted!=1 AND t2.incorrect!=1 AND t2.digest IS NOT NULL)
      and t2.date between dt1 and dt2
      UNION
      SELECT t2.recordID
      FROM main _ base _ archive.epm _ records as t2
      where
      (t2.deleted!=1 AND t2.incorrect!=1 AND t2.digest IS NOT NULL)
      and t2.date between dt1 and dt2;
DECLARE CONTINUE HANDLER FOR SQLSTATE '02000' SET done = 1;
OPEN cur2;                                 Основной цикл работы курсора
      REPEAT                               В цикле происходит вызов
        FETCH cur2 INTO _ EID;             процедуры добавления записей
        IF NOT done THEN                   в промежуточный каркас
                call ijp.put _ data( _ EID);
        select _ EID;
        END IF;
      UNTIL done END REPEAT;
CLOSE cur2;
```

Листинг 2. Процедура внесения данных в промежуточный каркас

```
DECLARE cur1 CURSOR FOR SELECT t1.TID,t1.RID FROM ijp.t3 _ tpe as t1
WHERE t1.ParentID=@rtpeID;                 Курсор прохода по полям одной записи
DECLARE CONTINUE HANDLER FOR SQLSTATE ‘02000’ SET done = 1;
Запрос получения данных для таблицы событий промежуточного каркаса
      SELECT * into @formilisedID, @rtpeID, @crt _ dt, @sub _ dt, @creator,
      @subscriber
      FROM (
                SELECT t1.formalisedDataID,
                t1.recordTypeID,
                concat(t1.date,’ ‘,t1.time) as q,
                t1.signaturDateTime,
                t1.creatorID,
                t1.authorID
                FROM main _ base _ archive.epm _ records as t1
                where t1.recordID= _ EID
            union
                SELECT t1.formalisedDataID,
                t1.recordTypeID,
                concat(t1.date,’ ‘,t1.time) as q,
                t1.signaturDateTime,
                t1.creatorID,
                t1.authorID FROM
                main _ base.epm _ records as t1
                where t1.recordID= _ EID) as q;
Внесение данных в таблицу событий каркаса
INSERT INTO `ijp`.`t4 _ event` (`EID`, `TID`, `crt _ dt`, `sub _ dt`, `creator`,
`subscriber`) VALUES ( _ EID, @rtpeID, @crt _ dt, @sub _ dt, @creator, @subscriber);
OPEN cur1;                                 Основной цикл сбора данных
      REPEAT                               для внесения в таблицу значений
      FETCH cur1 INTO _ TID, _ RID;        промежуточного каркаса
      IF NOT done THEN                     в соответствии с полями
        IF @formilisedID then              конкретного типа записи
```

```
            set _ d _ table=
            (SELECT t2.d _ table from ijp.rtpe _ full as t2 where
            t2.recordTypeID=@rtpeID and t2.num= _ RID);
            set _ col _ name=
            (SELECT t2.COLUMN _ NAME from ijp.rtpe _ full as t2 where
            t2.recordTypeID=@rtpeID and t2.num= _ RID);
            set @qe:=concat(
            ` SELECT `, _ col _ name,`` into @VAL2 from `vmh _ db`.`, _ d _ table,`
            where rid=',@formilisedID);
                prepare qe1 from @qe;
                EXECUTE qe1;
                DEALLOCATE PREPARE qe1;
        IF @VAL2 is not null THEN
            INSERT INTO `ijp`.`t5 _ value` (`EID`, `TID`, `VALUE`) VALUES
            ( _ EID, _ TID, @VAL2);
        END IF;
        END IF;
      END IF;
      UNTIL done END REPEAT;
CLOSE cur1.
```

В ходе работы первых вариантов процедур переноса выявляются ошибки и недочёты запросов сбора данных.

В качестве стандартных рекомендаций в процессе переноса можно привести следующие:

за один запрос к базе данных следует получать максимум данных для дальнейшей работы скрипта. В цикличных скриптах один долгий запрос на все необходимые поля предпочтительнее, чем цикл быстрых запросов на каждое поле в отдельности;

если часть данных журнала или справочника является статичной, следует сформировать вспомогательную таблицу, а не получать данные из представления или запроса;

процесс внесения изменений в таблицы промежуточного каркаса следует вызывать для максимально возможного количества добавляемых строк данных;

вызов процедуры переноса необходимо осуществлять по частям, в связи с тем, что процесс переноса данных выполняется безостановочно. Это может вызвать переполнение буферов данных и ошибки в работе скрипта.

При реальной конвертации данных были получены результаты оптимизации процедуры переноса данных (см. таблицу). Максимально сокращает время работы процедуры конвертации перенос статических вспомогательных данных из представлений в индексированные таблицы. Добавление большого количества записей за одну команду Insert также ускоряет процесс работы скрипта. С ростом количества событий в журнале работы скрипта будет

Результаты оптимизации процедуры конвертации данных

Подзадача процесса	Сбор данных для основного журнала переноса, с/100 событий	Получения данных на одно событие, с/100 событий	Внесение данных в таблицы промежуточного каркаса, с/100 событий	Итого, с/100 событий
Первичный вариант до оптимизации	9 ± 2	187 ± 10	53 ± 5	249 ± 20
Получение части данных каждого события во внешней процедуре обработки журнала	10 ± 3	72 ± 6	53 ± 5	135 ± 10
Перенос статических данных из представлений и запросов в таблицу с индексами	10 ± 3	0,7 ± 0,2	53 ± 4	63 ± 6
Сбор нескольких Insert в один запрос добавления с большим количеством значений	10 ± 3	0,7 ± 0,2	13 ± 2	23 ± 4

нивелироваться время, затраченное на сбор информации для основного журнала, и приросты в скорости могут достигать нескольких порядков. Также следует учитывать зависимость скорости запроса на добавление от максимальной частоты работы процессора, а скорость запроса на сбор большого числа данных — от доступного объёма оперативной памяти.

Создание OWL документа. После извлечения информации из существующей реляционной базы данных создаётся новая структура — онтологическая база знаний. Для последней использовалась каноническая модель данных CDM (рис. 3), отображающая процесс миграции данных из реляционной БД в онтологическую.

Относительно частый случай, когда сотрудники разных отделов, структурных подразделений организации используют разные термины для обозначения одного и того же понятия (объекта, класса), что приводит к ошибкам в общении и интерпретации результатов. Использование модели CDM позволяет перейти к одному общеупотребительному языку, такому, на котором определены все сущности организации, тогда сотрудники смогут легко общаться даже в смешанных командах и подразделениях на одном языке [5]. Если имеется чётко описанная модель CDM, то процедура миграции данных между приложениями не нужна. Вместо этого достаточно показать связь между приложениями и CDM, выполнив эту процедуру единожды, и не возвращаться каждый раз, когда появляется новый интерфейс.

Применительно к медицинской тематике определён необходимый инструментарий для реализации CDM-модели данных, который планируется использовать. Это будет система управления информацией IBM IMS [6], работающая на большой ЭВМ класса IBM Mainframe E12.

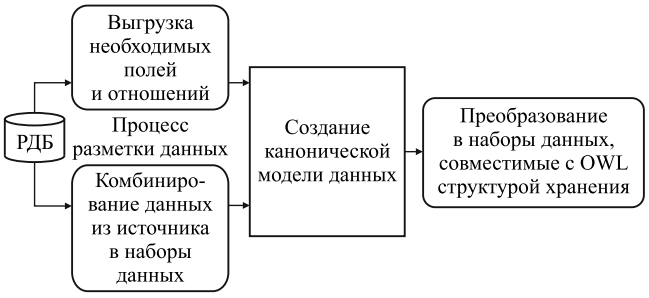

Рис. 3. Процесс миграции данных из реляционной базы данных в онтологическую базу знаний

Имеет смысл обосновать такое решение применительно к описываемому случаю:

имеется возможность привести список всех главных сущностей, требующихся для работы клиники (доктора, пациенты, медицинские назначения и т. д.);

описаны связи между сущностями;

определены атрибуты сущностей.

Одним из наиболее важных принципов, который необходимо установить, является принцип управления моделью CDM.

Модель управления должна гарантировать следующее:

любая новая версия будет совместима с предыдущей версией;

изменения могут быть выполнены последовательно и не потребуют больших усилий;

изменения документируются и каждый, кто использует модель, будет информирован об изменениях.

Заключение. Таким образом, описана первая часть преобразования реляционной базы данных в онтологическую базу знаний. Текущий 2015 г. по плану реализации проекта будет посвящён практической реализации онтологии предметной области с использованием продукта корпорации IBM «IBM Web Ontology Manager». Процесс миграции данных отлажен, начался процесс разработки системы тестирования, которая обеспечит разработчиков средствами сравнения количественных показателей работоспособности существующей и новой МИС. В частности, будет определена относительная скорость извлечения информации из онтологической базы знаний и её зависимость от организации дискового пространства системы хранения данных, о которой в статье не упоминалось, но правильная архитектура которой является ключевой компонентой в обеспечении работоспособности МИС.

Авторы смогли применить принципы международных стандартов OWL, RDF, CDM, описанные в работе [7] для создания проекта извлечения информации из реляционных баз данных небольшой медицинской информационной системы. Для этого выполнено отображение работы клиники с помощью Google Maps (рис. 4, см. обложку), где показана структура клиники и более детально приведены связи между некоторыми её отделениями.

Авторы ориентированы на использование онтологической базы знаний ещё и потому, что такая форма организации данных работает с большими объёмами данных, так называемой Big Data, и в планах объединение нескольких

баз знаний в единую. Для реализации такого плана будет использоваться уже упоминавшийся программный продукт IBM IMS (Information Management System), основной отличительной чертой которого является иерархический принцип построения онтологии, что обеспечивает удобную для понимания и модернизации систему хранения и использования.

Статья написана в рамках проекта, выполняемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана и финансируемого Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.577.21.0135 от 24.11.2014 г.

Библиографические ссылки

1. **Еременко Ю.И., Мельникова И.В., Шаталов А.А.** Построение интеллектуальной системы извлечения знания из электронного архива проектной документации на базе иммунного алгоритма мультимодальной оптимизации CLONALG // Автоматизация и современные технологии 2014. № 3. С. 17—23.

2. **Smirnova E., Dobryakov A., Proletarsky A., Willmot P.** (UK) Rubrics to assess student competerces: a structured approach URL:http://library.iated.org/view/SMIRNOVA2013RUB (дата обращения 08.03.2015).

3. **Smirnova E., Shpak M., Syuzev V.** Ontology based system for students knowledge control // International Conference Edulearn2014 Proceedings, July 2014 URL: http://library.iated.org/view/SMIRNOVA2014ONT (дата обращения 08.03.2015).

4. **Александров А.А., Абрамешин А.Е., Мешков Н.А., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Разработка и исследование системы управления инновационным развитием Российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество. Инновации. Образование. 2012. № 10. С. 2—15.

5. **Стандарт** SOA and Canonical Data Model URL: http://www.eai-ideas.com/architecture-ideas/soa-and-canonical-data-model-cdm (дата обращения 08.03.2015).

6. **Smirnova E.V.** IBM IMS and Mainframe: Education Quality System / Technical Symposium // Germany, Knigstein, Germany 12—15 November 2012. Big Data and Ontology Electronic Mapping Systems, Inc., October 2014 URL: http://www.e-mapsys.com/BigDataOntology1.pdf (дата обращения 08.03.2015).

УДК 681.513

Т.Ю. Цибизова, д-р пед. наук, доц., **Чан Нгок Хыонг**

vesta952006@yandex.ru

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА ВОЛЬТЕРРА

Исследованы способы реализации процедуры идентификации на борту летательного аппарата. Разработаны способы реализации фильтра Вольтерра второго порядка. Работоспособность предложенных алгоритмов продемонстрирована на примере моделирования погрешности навигационной системы в определении скорости летательного аппарата.

Ключевые слова: идентификация; фильтр Вольтерра; погрешности навигационной системы.

Implementation ways of the identification procedures on the flyind device board are researched. The implementation methods of the second-order Volterra filter are developed. The efficiency of the proposed algorithm is demonstrated as an example of the navigation system error modelling at determining of the flying device speed.

Key words: identification; Volterra filter; navigation system errors.

Введение. Решение задач управления различными динамическими объектами предполагает использование математической модели исследуемого процесса. Математические модели, полученные на основе физических или каких-либо других законов, в практических приложениях, как правило, не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации и построения моделей [1—4]. Алгоритмы построения моделей позволяют получить высокоточные математические модели исследуемых объектов, однако их использование для управления затруднительно, так как структура модели заранее неизвестна и вопрос проверки устойчивости требует дополнительных исследований. Алгоритмы идентификации позволяют определить отдельные параметры матрицы модели, структура которой задана априори.

Точность определения параметров модели зависит от свойств матрицы модели и точности алгоритма идентификации, который выбира-

ется из соображений возможностей реализации в имеющемся вычислителе (спецвычислитель, БЦВМ).

Фильтр Вольтерра второго порядка. Ниже исследована проблема идентификации нелинейных систем. В качестве основной трудности данной проблемы можно назвать необходимость обработки большой базы данных, характеризующей работу идентифицируемой системы. Конструктивным подходом в решении данной задачи является использование фильтрующей структуры в виде последовательности Вольтерра. Однако одной из главных причин достаточно редкого применения методики фильтрации Вольтерра на практике является значительная сложность, связанная с реализацией фильтров Вольтерра. Таким образом, главной задачей является нахождение упрощений в разработке и реализации фильтра Вольтерра.

Теория идентификации нелинейных систем, впервые сформулированная в начале XX в., применима для широкого круга нелинейных задач, описывающих большинство сложных процессов. В качестве основной трудности проблемы идентификации можно назвать необходимость обработки большой базы данных, характеризующей работу идентифицируемой системы. Конструктивным подходом в решении данной задачи является использование фильтрующей структуры в виде последовательности Вольтерра. Однако, несмотря на длинную историю и популярность в теоретическом изучении ряда Вольтерра, относительно мало исследователей пытались применить методику фильтрации Вольтерра на практике.

Оказывается, что одна из главных причин — это значительная сложность, связанная с реализацией фильтров Вольтерра. Так как особенная структура фильтра Вольтерра не берётся во внимание, то возникают серьёзные проблемы с матрицами. Количество операций, необходимое для решения проблемы, увеличивается экспоненциально с увеличением порядка фильтра. Таким образом, главной задачей является нахождение упрощений в разработке и реализации фильтра Вольтерра [3].

Исследуем фильтр Вольтерра 2-го порядка (ФВ2), который состоит из параллельной комбинации линейного и квадратичного фильтров.

Первым шагом в определении минимума среднеквадратической ошибки (СКОШ) ФВ2 порядка является требование бездрейфового выхода фильтра, так как основной сигнал имеет нулевое математическое ожидание.

Следующий шаг — определение линейного и квадратичного весов фильтра, которые определяют минимум СКОШ. Для этого выведем простое решение для оптимального ФВ2 в предположении, что на входе фильтра белый гауссовый шум.

Определим кросс-корреляционную и кросс-бикорреляционную функции [3].

Определим линейный и квадратичный операторы ФВ2 с минимальной СКОШ. Линейный оператор оптимального ФВ2 — это то же самое, что и оптимальный линейный фильтр. Следовательно, можно сконструировать фильтр добавлением квадратичного фильтра параллельно созданному линейному фильтру.

Предлагается два класса реализации квадратичного оператора ФВ2.

Квадратичный фильтр класса I имеет вид:

Класс I (умножитель + линейный фильтр)

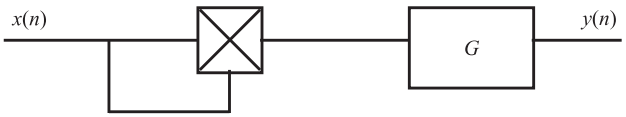

Рис. 1. Функциональная схема реализации фильтра класса 1

Как видно из рис. 1, квадратичный фильтр класса I состоит из умножителя и следующего за ним линейного фильтра. Такая реализация также соответствует случаю, когда квадратичный оператор фильтра диагональный.

Таким образом, оператор квадратичного фильтра может быть разложен на два линейных фильтра.

Класс II (линейные фильтры + умножитель)

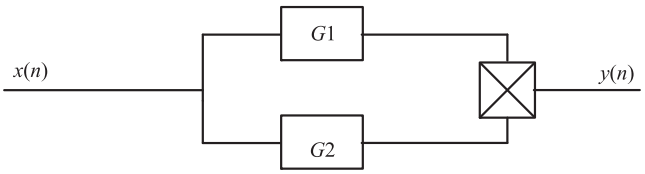

Рис. 2. Функциональная схема реализации фильтра класса 2

Следовательно, как показано на рис. 2, фильтр состоит из параллельной комбинации двух фильтров, выходные значения которых перемножаются для получения выходного значения всего фильтра.

Следующим шагом должна быть минимизация по G_1, G_2. Однако одновременная минимизация по $2N$ переменным представляет собой потенциальную вычислительную проблему из-за связи между G_1 и G_2. В качестве альтер-

нативы одновременной минимизации предлагается методика последовательных итераций:

Шаг 1: произвольно выбрать первый линейный фильтр G_1.

Шаг 2: с выбранным G_1 определить G_2.

Шаг 3: с выбранным G_2, определить G_1.

Шаг 4: повторять шаги 2 и 3 до тех пор, пока значение минимизированной СКОШ не станет пренебрежительно мало.

Результаты математического моделирования. Успешное решение задач управления летательным аппаратом ЛА во многом определяется уровнем развития измерительной техники, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов различных навигационных систем, используемых для управления. Источником информационно-измерительных сигналов о местоположении, ориентации, скорости и других параметрах движения являются различные измерительные системы и навигационные комплексы. Базовой системой измерительного комплекса ЛА является инерциальная навигационная система (ИНС), которая часто используется как автономная система [5].

Измерительные сигналы ИНС имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями, условиями их функционирования и особенностями режимов полёта ЛА. Повышение точности измерительной информации алгоритмическим путём представляет собой важную и актуальную задачу, так как позволяет быстро с минимальными затратами повысить точность навигационной информации серийных систем.

При функционировании ИНС на достаточно длительных интервалах времени погрешности могут достигать недопустимо больших величин. Коррекция ИНС осуществляется различными источниками внешней навигационной информации и алгоритмического обеспечения, в которое обычно включают различные алгоритмы оценивания [6]. Однако используемые в алгоритмах модели часто неадекватны реальному процессу. Поэтому целесообразно идентифицировать параметры модели или осуществлять построение модели с помощью генетических алгоритмов, нейронных сетей и др. Алгоритмы построения моделей требуют повышенной производительности БЦВМ.

Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов проведено математическое моделирование. В качестве модели погрешностей ИНС использована тестовая модель горизонтального канала ИНС [7].

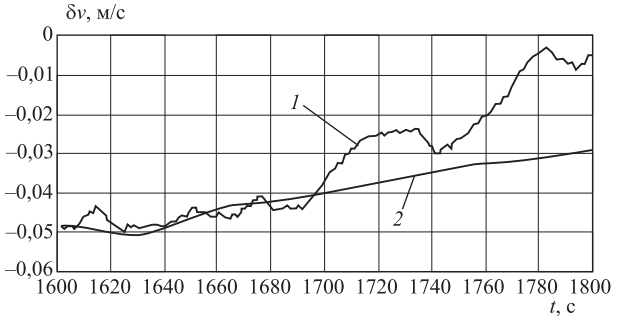

Рис. 3. Результаты моделирования:
1 — погрешности ИНС в определении скорости ЛА; *2* — оценки погрешностей ИНС в определении скорости ЛА, полученные с использованием идентифицированной модели

Результаты математического моделирования продемонстрировали достаточно высокую точность разработанного алгоритма. На рис. 3 представлены результаты моделирования: фактические значения погрешности ИНС в определении скорости; оценки значения погрешности ИНС, полученные с помощью алгоритма оценивания с идентифицированной моделью.

Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанного алгоритма, который может быть использовать не только для коррекции ИНС, но и в других практических приложениях.

Анализ методов идентификации параметров движения ЛА. Рассмотрим решение задач по идентификации ряда параметров ЛА и уточнению характеристик движения ЛА в процессе полёта. Большой практический интерес вызывают методы решения этой задачи автономным образом, т.е. с использованием измерений инерциального типа и различного рода априорной информации (характеристики атмосферы, скорость ветра, аэродинамические характеристики ЛА и др.). Очевидным является и то, что для практического решения задачи необходимо получение уравнений, которые описывают взаимосвязь «уточняемых» в процессе полёта ЛА параметров движения (навигационных погрешностей), «разбросов» параметрического характера характеристик ЛА, погрешностей приборов инерциального типа и др. Корректное описание этих связей в основном и определяет эффективность в решении задачи идентификации. Поскольку речь идёт о бортовой реализации алгоритмов, то, естественно, необходимо иметь более простые и эффективные, с точки зрения реализации, формы. На практике обычно используют различные варианты построения алгоритмов с использованием ли-

нейных уравнений наблюдения и простейших дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения параметров. Очень важным является и то, что необходимая проверка «работоспособности» алгоритмов проводится с использованием статистики, получаемой проведением «электронных» запусков ЛА.

Часто применяют рекуррентный вариант алгоритма оптимальной фильтрации Калмана для получения оценки вектора состояния и, следовательно, искомые величины поправок к навигационному значению высоты, номинальным характеристикам ЛА и параметрам атмосферы.

Однако отбрасывание членов более высокого порядка малости может привести к неустойчивости решения. Чтобы избежать этого, целесообразно ввести так называемый «стабилизирующий шум», некоррелированный от измерения к измерению.

В целом разработанный алгоритмический подход представляется весьма перспективным. По результатам математического и полунатурного моделирования предполагается повышение точности в определении скорости ЛА в 1,5—2 раза [5,7]. В дальнейшем после проверки работоспособности можно проводить усовершенствование алгоритма для уменьшения загрузки БЦВМ как по памяти, так и по быстродействию.

Библиографические ссылки

1. **Эйкхофф П.** Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680с.

2. **Фам С.Ф., Цибизова Т.Ю.** Методы построения математических моделей: генетические алгоритмы // Достижения вузовской науки: Труды междунар. науч.-практ. конф. (Московская область, г. Дедовск, 15—20 сентября 2014 г.). Часть 2. М.: ИИУ МГОУ, 2014. С. 158—162.

3. **Цибизова Т.Ю.** Методы идентификации нелинейных систем управления // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: http://www.science-education.ru/121—1791

4. **Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С.** Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 1. С. 16—20.

5. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

6. **Неусыпин К.А., Шелухина Н.А.** Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 4. С. 21—23.

7. **Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А.** Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7. С. 11—15.

УДК 621.317.2:519-7:519.85

И.В. Фролова
(Новокубанский филиал «Российского научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ), г. Новокубанск)

irina_vladim@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Показаны основные проблемы, связанные с защитой информации в измерительно-информационных системах, приведены наиболее популярные способы их решения в области измерения для испытаний и исследований, в том числе аппаратные и программные методы.

Ключевые слова: измерительные средства; программное обеспечение; методы защиты информации; шифрование; испытания; измерения.

The basic problems associated with the information protection in the measuaring and information systems are shown, the most popular ways of their solution in the measurement area for test and research, including hardware and software methods are adduced.

Key words: measuring means; software; information protection methods; encryption; test; measurement.

Современные измерительно-информационные системы представляют собой высокотехнологичные устройства или комплексы, в которых используются новейшие способы обработки и передачи измерительной информации, основанные, в том числе, на беспроводных технологиях. Как правило, измерительные комплексы включают в себя измерительный блок (один или несколько) со встроенным программным обеспечением (ПО) и принимающую информационную часть в виде прикладной программы, обеспечивающей приём данных с измерительных блоков.

В лабораторных условиях используют измерительные стенды, включающие в себя ПК и стационарную измерительную установку, когда передача результатов измерений осуществляется на основе проводных технологий (RS-232 и др.). В полевых условиях требуются более мобильные технологии, в этом случае прикладное ПО устанавливают на ноутбук, используют беспроводную передачу измерительной информации с электронных измерительных блоков (технологии Bluetooth, GSM) [1].

Иногда измерительный процесс осуществляется в полевых условиях, а обработка данных ведётся лабораторно, т. е. измерительная информация накапливается в памяти электронного измерительного блока, а при помощи прикладного ПО сохранённые данные импортируются и обрабатываются, чаще всего на стационарном ПК [2]. Между снятием измерений и получением результатов проходит неопределённый промежуток времени, в течение которого данные испытаний не наблюдаются.

Таким образом, становится актуальной проблема защиты данных измерений от физического уничтожения, искажения или несанкционированной (случайной или умышленной) модификации. Кроме того, информация о результатах измерений может подвергаться непреднамеренной порче со стороны некомпетентных пользователей или же вследствие халатности при проведении измерений и обработке данных. К повреждающим факторам можно отнести также сбои и неисправности в работе технических средств (сбои питания, поломки оборудования и др.) [3].

При разработке измерительных систем должен обеспечиваться принцип информационной безопасности данных измерений. Это касается и технической части измерительных систем, и программного обеспечения как встроенного, так и прикладного.

Физически, в качестве аппаратной защиты, электронные измерительные блоки заключаются в опломбированные влаго- и пылеустойчивые корпуса, слоты для прошивки также пломбируются. Разъёмы для передачи данных обеспечиваются защитой от попадания пыли. Сохранность данных обеспечивается энергонезависимой памятью.

Практически информационная безопасность в измерительно-информационных системах обеспечивается общепринятыми технологиями. Функционально технология управления доступом к измерительной информации представлена следующими методами:

идентификация и проверка подлинности — используется для проверки соответствия электронного блока и принимающей части (чаще этот этап осуществляется в фоновом режиме в момент подключения аппаратуры к ноутбуку или ПК, проверка соответствия основывается на соответствии идентификационного или серийного номера электронного блока и ключа программы);

идентификация и разрешение доступа при попытке использования слота для прошивки — обеспечивается проверкой шифруемого пароля (доступ разрешён только лицу, уполномоченному производить «прошивку» (внедрение программного кода) измерительного средства);

применение санкций — набор действий, которые предпринимаются при попытке несанкционированного доступа или некорректного обращения с измерительным блоком или программой (от предупредительных сообщений до полной блокировки).

При проверке подлинности, идентификации, соответствия, паролей используют различные методы шифрования информации. На сегодняшний день криптография (шифрование) является одним из самых надёжных и перспективных методов защиты компьютерной информации. [4]

Шифрование основано на использовании криптостойких (устойчивых к взлому) ключей, в качестве которых применяются генераторы псевдослучайных чисел. Ключи различаются в соответствии с алгоритмами, в которых они используются:

симметричные (секретные) — осуществляется как прямое, так и обратное криптографическое преобразование, чаще одним и тем же ключом (наиболее защищённый алгоритм);

ассиметричные — используется ключевая пара: закрытый ключ, известный владельцу, и открытый ключ, используемый для проверки

подлинности (он вычисляется по значению функции от закрытого ключа);

сеансовые (сессионные) — используются для защиты канала связи на основе секретного ключа, с одной стороны, и открытого — с другой (для обеспечения такой защиты могут использоваться различные протоколы, одним из которых является алгоритм Диффи — Хеллмана);

подключи — информация, вырабатываемая в процессе работы криптографического алгоритма на основе специальной процедуры развертывания ключа.

Помимо этого, широко применяют и другие методы защиты информации:

вычисление/проверка контрольной суммы по содержимому памяти (таким способом гарантируют целостность встроенного ПО и данных измерений);

проработка алгоритма получения и преобразования входных сигналов (импульсов) с измерительных датчиков (должен обеспечиваться принцип достоверности данных измерений, а измерительное средство — откалибровано и пройдено поверку, если таковая предполагается);

подготовка персонала для работы с измерительным устройством и программным обеспечением (минимизируется возможность порчи технической части и информации под влиянием человеческого фактора).

Нормативно информация в измерительно-информационных системах, в частности для испытаний и исследований защищена нормативными документами, такими как:

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119 — 2000 «Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестирование»;

ГОСТ 28147 — 89 «Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования»;

ГОСТ Р 8.596 — 2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения»;

ГОСТ Р 8.654 — 2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения»;

МИ 2891-2004 «Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к программному обеспечению средств измерений»;

МИ 2955-2005 «Государственная система обеспечения единства измерений. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений и порядок её проведения»;

Руководство WELMEC 7.1 «Требования к ПО на основе директивы по измерительным приборам» и др.

Заключение. В современных условиях разработка измерительного оборудования, особенно для испытаний и исследований сопряжена не только с проработкой технической части, разработкой методики измерения при помощи нового средства и соблюдением метрологических требований, но и подразумевает создание таких программных средств (встроенного ПО и прикладной программы), которые обеспечивают целостность данных измерений, достоверность и точность расчётов, защиту от несанкционированного доступа, умышленного или случайного уничтожения или модификации данных измерений. Это во многом обеспечивается соблюдением требований нормативной документации, регламентирующей процесс создания измерительных средств и ПО, начиная с разработки алгоритма или методики до момента поверки или тестирования.

Библиографические ссылки

1. **Попелова И.Г.** Применение и развитие современных информационных технологий в системе машиноиспытаний / Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. С. 524—527.

2. **Фролова И.В., Трубицын Н.В.** Перспективные средства создания измерительных информационных систем для проведения эксплуатационно-технологической оценки // Техника и оборудование для села. 2014. № 4. С. 36—37.

3. **Фролова И.В.** Актуальные проблемы метрологической безопасности встроенного программного обеспечения средств измерений / Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. С. 428—431.

4. **Дудыкин А.А., Кудеяров Ю.А.** Проблемы аттестации встроенного программного обеспечения средств измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2007. № 1. С. 22—26.

УДК 629.7

Г.П. Шибанов, д-р техн. наук, проф.
(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)
gpshibanov@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

На основе многокритериального подхода рассмотрены процедуры оценки эффективности внедрения новых технологий в образцы авиационной техники военного назначения. Предложен алгоритм оценки целесообразности доработки находящейся в эксплуатации авиационной техники.

Ключевые слова: оценка; эффективность; новые технологии; образец; авиационная техника; стоимость.

Implementation efficiency valuation methods of the new technologies in the pattern of the military purpose aircraft equipment is considered from a multicriterion approach. Assess the feasibility of the algorithm improvements located on the aircraft operation is proposed.

Key words: valuation; effectiveness; new technology; pattern; aircraft equipment; cost.

Эффективность внедрения новых технологий в образцы авиационной техники военного назначения (АТ ВН) может быть оценена на основе традиционного подхода, заключающегося в сравнении оценок эффективности образца АТ ВН, полученных до и после внедрения рассматриваемой технологии. Такая оценка может проводиться по двум основным схемам:

оценка прироста некоторой обобщённой характеристики эффективности образца АТ ВН при внедрении новой технологии с учётом затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов;

сопоставительная оценка основных (наиболее существенных) свойств образца АТ ВН до и после внедрения новой технологии на основе решения многокритериальной задачи.

Многообразие новых технологий обусловливает необходимость проведения их классификации для разработки соответствующих методов исследования эффективности внедрения в перспективные и модернизируемые образцы АТ ВН. В качестве основы для такой классификации и упрощения процедур оценки эффективности образцов АТ ВН в работе [1] всё множество технологий предложено условно разделить на три группы.

В первую группу включаются технологии, обеспечивающие возможность создания качественно новых образцов АТ ВН с радикально отличающимися от существующих обликом и принципами боевого применения, а иногда и функционирования;

позволяющие решать принципиально новые или ранее не решавшиеся основные и вспомогательные задачи;

изменяющие формы и способы ведения боевых действий.

К технологиям первой группы относятся основные базовые военные технологии.

В качестве примера технологий поражения можно привести технологии использования на борту боевых летательных аппаратов средств поражения, построенных на новых физических принципах (лазерное, пучковое, СВЧ-оружие, электромагнитное, высокоточное самонаводящееся ракетное вооружение и т. д.). Иллюстрацией технологий защиты являются технологии создания защитных материалов для изготовления элементов лёгкой керамической брони для образцов АТ ВН и бронежилетов лётного состава.

Примером технологий доставки к цели средств поражения (технологий платформ) являются гиперзвуковые технологии, обеспечивающие создание летательных аппаратов нового класса, применение которых изменит характер, формы и способы ведения воздушных и противовоздушных операций и боёв.

К технологиям *второй группы* предлагается отнести технологии, направленные на изменение большинства свойств (групп свойств), придание образцу АТ ВН новых свойств или

качественно новых возможностей функционирования в процессе его модернизации.

Технологиями *третьей группы* в рамках предложенной классификации являются технологии, позволяющие изменить отдельные характеристики свойств как единичных элементов, агрегатов, узлов, так и образца АТ ВН в целом.

Технологии второй и третьей групп составляют базовые военные технологии. В частности, к технологиям второй группы можно отнести технологии создания систем и средств автоматизированного управления, цифровой связи и телекоммуникаций, на основе которых создаются локальные вычислительные сети командных пунктов и штабов различных органов управления ВВС и других силовых структур, на вооружении которых находятся боевые и военно-транспортные авиационные комплексы.

Примером технологий третьей группы может служить технология восстановления реборд рабочих лопаток турбин двигателей самолётов типа Су-27, внедрение которой позволило увеличить ресурс работы лопаток с 500 до 5000 ч и обеспечило снижение на 50 % стоимость ремонта турбин.

К показателям эффективности внедрения новых технологий первой группы наиболее целесообразно отнести количество циклов полезной работы, необходимых группировке ВВС для выполнения поставленной типовой боевой (условной) задачи — n. Наименование и численное значение данного показателя зависит от конкретного функционального предназначения образца АТ ВН, характера задач, стоящих перед группировкой, внешних и внутренних факторов. Величина n может характеризовать не только количество циклов, но и время достижения цели.

В качестве критерия оценки эффективности внедрения технологий первой группы наиболее целесообразно принять разность стоимости выполнения фиксированной боевой задачи группировки ВВС, оснащённой базовым образцом АТ ВН, и образцом, в котором использована новая технология:

$$\Delta Э_1 = С_{бо} - С_{нт}, \qquad (1)$$

где $\Delta Э_1$ — величина военно-экономического эффекта от внедрения новых технологий первой группы; $С_{бо}$ — стоимость выполнения поставленной боевой задачи группировкой ВВС, оснащённой базовым образцом АТ ВН; $С_{нт}$ — стоимость выполнения поставленной боевой задачи группировкой ВВС, оснащённой образцами АТ ВН, в которых используются новые технологии.

В соответствии с существующей иерархией военно-экономических показателей для большей части боевых действий различных видов и родов авиации ВС РФ боевая задача включает в себя ряд последовательно или параллельно выполняемых единичных задач (например, уничтожение наземных целей типа РЛС ПВО противника в заданном позиционном районе), т. е. предполагает получение ряда непосредственных и конечных результатов.

Таким образом, с учётом классификации формула (1) принимает вид:

$$\Delta Э_1 = С_{ед.бо} n_{бо} - С_{ед.нт} n_{нт}, \qquad (2)$$

где $С_{ед.бо}$ — стоимость единичного цикла полезной работы при оснащении группировки ВВС базовым образцом АТ ВН; $С_{ед.нт}$ — стоимость единичного цикла полезной работы при оснащении группировки ВВС образцом АТ ВН, в котором применены новые технологии; $n_{бо}$ — количество циклов полезной работы, необходимых группировке ВВС для выполнения поставленной типовой (условной) задачи при её оснащении базовым образцом АТ ВН; $n_{нт}$ — количество циклов полезной работы, необходимых группировке ВВС для выполнения поставленной типовой (условной) задачи при её оснащении образцами АТ ВН, в которых использована новая технология.

Количество циклов полезной работы (например, количество боевых вылетов с однотипными средствами поражения наземных целей), реализуемых группировкой ВВС для выполнения поставленной типовой боевой (условной) задачи, является показателем эффективности внедрения новых технологий первой группы и определяется в соответствии с выражением

$$n = \frac{\ln(1 - P_{тр})}{\ln(1 - P_1)}, \qquad (3)$$

где $P_{тр}$ — требуемая вероятность выполнения типовой (условной) боевой задачи группировкой ВВС; P_1 — вероятность выполнения той же боевой задачи при единичном воздействии образца АТ ВН по цели (в единичном боевом вылете).

Если в результате расчётов получится, что $\Delta Э_1$ существенно больше нуля, то внедрение новой технологии первой группы может быть признано целесообразным, так как стоимость выполнения фиксированной задачи группировкой ВВС, оснащённой образцом АТ ВН с применением новой технологии, будет меньше, чем при применении базового образца. Если же окажется, что $\Delta Э_1 < 0$, то внедрение

новой технологии следует признать нецелесообразным. При $\Delta Э_1 \approx 0$ решение должно приниматься, главным образом, с учётом других, неэкономических факторов.

В качестве показателей эффективности внедрения новых технологий второй группы целесообразно принять показатель, характеризующий количество циклов полезной работы, выполняемой образцом АТ ВН, или показатель существенных свойств образца АТ ВН — показатель качества образца АТ ВН.

Если новая технология оказалась затратной, т. е. её внедрение сопровождается увеличением стоимости как самого образца АТ ВН, так и выполнения им поставленных типовых задач, то в качестве показателя эффективности внедрения данной технологии принимается показатель, характеризующий количество циклов полезной работы, выполняемых образцом АТ ВН. Его значения рассчитываются с использованием выражения (2). Критерий эффективности в этом случае определяется в соответствии с выражениями (1)—(3).

При ресурсосберегающем характере новой технологии (в результате её внедрения уменьшается трудоёмкость процесса изготовления образца АТ ВН, снижаются расходы на повышение эффективности выполнения им боевых задач) в качестве показателя эффективности её внедрения целесообразно принять показатель качества образца АТ ВН. Критерием эффективности внедрения технологий в данном случае выступает критерий технического уровня образца АТ ВН $К_{ТУ}$, который, в соответствии с ГОСТ 15467—79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения», представляет собой относительную характеристику качества продукции, основанную на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с соответствующими базовыми значениями.

Для расчёта показателя качества образца АТ ВН используются методы, основанные на экспертных оценках, применении свёртки показателей, характеризующих отдельные свойства, а также на математическом моделировании процессов функционирования образца АТ ВН. При этом наиболее часто используются первая и вторая из перечисленных групп методов [2].

Каждый образец АТ ВН представляется в виде системы, характеризуемой совокупностью объективных свойств и характеристик, определяющих её пригодность для использования по прямому назначению. Причём свойство образца АТ ВН рассматривается как объективная особенность, которая может проявляться при его создании, эксплуатации и применении по назначению. Данное свойство выступает в качестве параметра, характеризующего определённые возможности анализируемого образца АТ ВН. Под характеристикой образца АТ ВН понимается формализованное описание его внутренних и внешних свойств.

В «широком» понимании показатель качества — это отображение совокупности внешних и внутренних свойств конкретного образца АТ ВН. Мерой данного показателя является функция совокупности его свойств

$$К = F\{S_i\},$$

где $\{S_i\}$, $i = 1, 2, ..., N$ — множество свойств образца АТ ВН; К — показатель качества образца АТ ВН.

В свою очередь, свойство образца АТ ВН — это функция совокупности характеристик данного свойства:

$$S_i = f(X_{ij}),$$

где (X_{ij}), $j = 1, 2, ..., M_n$ — множество характеристик i-го ($i = 1, 2, ..., n$) свойства.

Таким образом, существует зависимость между качеством образца АТ ВН и множеством характеристик:

$$К = F[f(X_{ij})].$$

Схематично качество образца АТ ВН представляется в виде «дерева» существенных свойств, под которым понимается графическое представление иерархической структуры, состоящей из свойств и связанных с ними характеристик (более низкий ранг). На самом высоком уровне этой упорядоченной многоуровневой иерархической структуры находится качество образца АТ ВН, на среднем — существенные свойства, а на самом низком — характеристики. Иными словами, «дерево» существенных свойств — это связный граф, выражающий соподчинение и взаимосвязи свойств, показывающий членение свойств на более простые характеристики следующего меньшего уровня сложности и т.д.

Для определения показателя эффективности внедрения технологий второй группы

(при внедрении ресурсосберегающих технологий) рассчитывается показатель качества образца АТ ВН:

$$\mathrm{K} = \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m_n}\alpha_{ij}P_{ij}\right)\beta_i,$$
$$i = 1, 2, \ldots, N;\ j = 1, 2, \ldots, M_n;$$
$$\sum_{j=1}^{m_n}\alpha_{ij} = 1;\ \sum_{i=1}^{n}\beta_i = 1,$$

где α_{ij} — весовой коэффициент j-й характеристики i-го свойства образца АТ ВН; P_{ij} — относительное (нормированное) значение j-й характеристики i-го свойства образца АТ ВН; β_i — весовой коэффициент i-го свойства образца АТ ВН; N — суммарное количество свойств; M_n — суммарное число характеристик, отображающих i-е свойство.

При этом относительное значение j-й характеристики i-го свойства образца АТ ВН для случая, когда большее значение более предпочтительно, чем меньшее, имеет вид:

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}^{\bullet} - P_{ij\,\min}^{\bullet}}{P_{ij\,\max}^{\bullet} - P_{ij\,\min}^{\bullet}}.$$

В противном случае

$$P_{ij} = \frac{P_{ij\,\max}^{\bullet} - P_{ij}^{\bullet}}{P_{ij\,\max}^{\bullet} - P_{ij\,\min}^{\bullet}},$$

где $P_{ij\,\max}^{\bullet}, P_{ij\,\min}^{\bullet}, P_{ij}^{\bullet}$ — максимальное, минимальное и текущее значения j-й характеристики.

Весовые коэффициенты α_{ij}, β_i, характеризующие степень вклада каждого свойства и характеристики в величину показателя качества образца АТ ВН, определяются организованным опросом экспертов и представляют собой оценки относительной важности элементов иерархии.

После определения показателя качества образца АТ ВН при внедрении новой ресурсосберегающей технологии второй группы рассчитывается критерий эффективности (технический уровень образца АТ ВН) как отношение качества образца, при создании которого применена новая ресурсосберегающая технология, и качества базового образца-аналога:

$$\mathrm{K}_{\text{ТУ}} = \frac{\mathrm{K}_{\text{нт}}}{\mathrm{K}_{\text{бо}}},$$

где $\mathrm{K}_{\text{нт}}$ — показатель качества образца АТ ВН, при создании или модернизации которого применена новая технология второй группы; $\mathrm{K}_{\text{бо}}$ — показатель качества базового образца — аналога.

Если $\mathrm{K}_{\text{ТУ}} > 1$, то принимается решение о целесообразности внедрения новой технологии второй группы, а при $\mathrm{K}_{\text{ТУ}} < 1$ — прямо противоположное решение.

Внедрение новых технологий третьей группы позволяет усовершенствовать количественные значения характеристик свойств образца АТ ВН. Показателем эффективности в данном случае является характеристика, позволяющая сравнить отдельные свойства образцов до и после внедрения этих технологий.

В качестве метода решения задачи определения эффективности внедрения новых технологий третьей группы можно рекомендовать метод многокритериального потокового ранжирования. При использовании данного метода сравниваются свойства образца АТ ВН, при создании или модернизации которого использована новая технология, и свойства его базовых аналогов. Результат выражается в терминах предпочтения.

Целесообразность внедрения новых технологий третьей группы в образцы АТ ВН при решении задачи методом потоков определяется на основании следующих критериев:

внедрение технологии признаётся целесообразным, если образец АТ ВН, модернизированный на основе новой технологии, предпочтительнее базовых образцов-аналогов;

внедрение новой технологии признаётся нецелесообразным, если образец-аналог оказывается предпочтительнее образца, при создании или модернизации которого использована новая технология.

Рассмотренные методические подходы учитывают всё множество новых технологий, в том числе и критических, и позволяют применить методики расчёта для оценки эффективности их внедрения в перспективные и модернизируемые образцы АТ ВН.

Библиографические ссылки

1. **Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю.** Программно-целевое планирование и управление созданием научно-технического задела для перспективного и нетрадиционного вооружения. М.: Издательский дом «Граница», 2007. 408 с.

2. **Шибанов Г.П.** Порядок формирования экспертных групп и проведения коллективной экспертизы // Информационные технологии. № 12. 2003. С. 19—22.

УДК 004.421

В.А. Головешкин, д-р техн. наук, проф., **А.Н. Выборнов**, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Московский государственный университет приборостроения и информатики),
М.В. Ульянов, д-р техн. наук, проф.
(Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН, г. Москва)

muljanov@mail.ru

ОПЕРАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АЛГОРИТМОВ

Рассмотрена новая оценка качества алгоритмов — операционная чувствительность алгоритма по функции трудоёмкости и особенности её применения. Предложен вариант функционала операционной чувствительности, т.е. её количественной оценки на основе информационной чувствительности алгоритма и размаха варьирования трудоёмкости. Предложенная оценка проиллюстрирована на модельном примере.

Ключевые слова: алгоритмическое обеспечение; операционная чувствительность; критерий временной устойчивости.

A new valuation of the algorithms quality — the algorithm operating sensitivity on function of labor input and feature of its application is considered. A variant of the functional operating sensitivity, ie, its quantitative valuation from a algorithm information sensitivity and labor input scaling swing is proposed. The proposed valuation is illustrated in the model example.

Key words: algorithmic ensuring; operating sensitivity; temporal stability criterion.

Введение. Решение задачи выбора алгоритма, рационального по комплексному критерию качества, для данной проблемной области применения является актуальной задачей разработки алгоритмического обеспечения программных средств. В таких проблемных областях, как системы реального времени и распределённые вычисления к применяемым алгоритмам, предъявляются жёсткие требования не только по собственно временной эффективности, но и по временной устойчивости [1], что связано с необходимостью обеспечения балансировки загрузки процессоров. В этой связи актуальным является построение такой оценки качества алгоритма, которая объединяла бы эти требования.

Одной из наиболее важных ресурсных функций алгоритма является функция трудоёмкости, отражающая требования алгоритма к операционному ресурсу механизма реализации. Функция трудоёмкости в худшем и лучшем случаях определяется, соответственно, как максимальное и минимальное число элементарных операций в принятой модели вычислений, заданных алгоритмом на входах фиксированной длины [2]. При исследовании временной эффективности программных реализаций алгоритма функция трудоёмкости ассоциирована со временем получения результата на определённых исходных данных. В этом аспекте результаты ресурсного анализа алгоритма должны обеспечивать возможность прогнозирования его трудоёмкости как для разных длин входов, так и для различных входов фиксированной длины. Общепринятым является подход, при котором прогнозирование по изменению длин входов осуществляется на основе трудоёмкости в среднем, а прогнозирование на фиксированной длине входа — по трудоёмкостям в лучшем и худшем случаях [3]. В аспекте решения задачи прогнозирования на фиксированной длине входа количественно-зависимые алгоритмы (класс *N* [4]) представляют собой наиболее благоприятный класс. Но, к сожалению, подавляющее большинство алгоритмов относятся к количественно-параметрическому классу (класс *NPR* [4]) и обладают ненулевым, а в ряде случаев, и значительным размахом варьирования трудоёмкости при фиксированной длине входа. Для целого ряда алгоритмов (на актуальных длинах входа) значение этого размаха достаточно велико. Прогнозирование по трудоёмкости в худшем случае (гарантированная оценка сверху) даёт для этого класса почти всегда сильно завышенные результаты, а прогнозирование по трудоёмкости в среднем не учитывает информацию о размахе варьирования. При этом очевидно, что качество прогноза во многом определяется тем, насколько велико влияние различных входов фиксированной длины на трудоёмкость, т. е. насколько велика инфор-

мационная чувствительность исследуемого алгоритма [5] в рамках выбранной количественной оценки. В связи с этим, в аспекте проблематики прогнозирования временной эффективности для программных реализаций алгоритмов и оценки их стабильности по времени для последующего рационального выбора, представляет интерес задача введения оценки качества алгоритма, отражающей его операционную стабильность.

Далее в статье будет использоваться следующая терминология и обозначения [1, 2], связанные с анализом ресурсной эффективности алгоритмов:

D — вход алгоритма A: конечное множество слов фиксированной длины в бинарном алфавите, задающее конкретную решаемую задачу;

$n = \lambda(D)$ — длина входа алгоритма: $D \xrightarrow[\lambda]{} N$, целочисленная функция, в общем случае определяемая как функция от мощности множества D: $\lambda(D) = \lambda(|D|) = n$;

$f_A(D)$ — трудоёмкость алгоритма A на входе D — целочисленная функция, значение которой есть число элементарных операций (в принятой модели вычислений), заданных алгоритмом A на входе D;

$D_n = \{D|\lambda(D) = n\}$ — множество всех входов алгоритма A, имеющих длину n;

$f_A^{\wedge}(n)$ — трудоёмкость алгоритма в худшем случае на всех допустимых входах длины n, т. е. максимум $f_A(D)$ на множестве D_n;

$f_A^{\vee}(n)$ — трудоёмкость алгоритма в лучшем случае, — минимум $f_A(D)$ на множестве D_n.

При этом для всех классов алгоритмов всегда выполнено: $f_A^{\vee}(n) \leqslant f_A(D \in D_n) \leqslant f_A^{\wedge}(n)$.

Информационная чувствительность и её статистическая оценка. Впервые понятие информационной чувствительности алгоритма по трудоёмкости введено в работе [5]. Понятие «информационная чувствительность» отражает тот факт, что на разных входах D, имеющих фиксированную длину n, алгоритм задаёт различное число элементарных операций принятой модели вычислений. Ключевым для содержательной интерпретации этого термина является выбор функционала — количественной оценки, обладающей свойством сопоставимости, т. е. дающей возможность решения задач сравнения алгоритмов и их рационального выбора. Разброс значений трудоёмкости алгоритма на различных входах фиксированной длины означает его ненулевую информационную чувствительность. В общем случае причиной такой вариации является влияние значений элементов конкретного входа и/или их порядка, равно как и других содержательных особенностей входов при их фиксированной длине на число задаваемых алгоритмом элементарных операций. Теоретические границы такого разброса на входах длины n задаются значениями функций $f_A^{\wedge}(n)$ и $f_A^{\vee}(n)$. Рассматривая трудоёмкость алгоритма на фиксированной длине входа как дискретную ограниченную случайную величину, можно либо теоретически обосновать задаваемый алгоритмом закон распределения, либо на основе экспериментальных данных вычислить статистические оценки такого распределения и предложить некоторую аппроксимацию, удовлетворяющую одному из критериев согласия. Таким образом, основной идеей построения количественной оценки информационной чувствительности является рассмотрение трудоёмкости алгоритма как дискретной ограниченной случайной величины. Для решения задач прогнозирования и рационального выбора такая оценка должна, очевидно, вводиться как функция длины входа алгоритма.

Статистическая оценка информационной чувствительности предложена в работе [5] на основе следующих рассуждений. На множестве входов фиксированной длины трудоёмкость алгоритма рассматривается как дискретная ограниченная случайная величина. Классической точечной мерой рассеяния случайной величины является σ — среднеквадратическое отклонение, которое оценивается по данным выборки через выборочную исправленную дисперсию [6]. Корректное определение количественной оценки информационной чувствительности должно учитывать также и длину сегмента варьирования. Это связано с тем, что при одинаковом значении дисперсии достоверно более чувствительным должен быть алгоритм с большей длиной сегмента возможных значений трудоёмкости. Для учёта длины этого сегмента используется такое понятие математической статистики, как размах варьирования [6]. Очевидно, что теоретический размах варьирования трудоёмкости алгоритма является функцией длины входа, и, вводя для него обозначение $R(n)$, получаем:

$$R(n) = f_A^{\wedge}(n) - f_A^{\vee}(n). \qquad (1)$$

На этой основе в работе [5] вводится понятие нормированного (относительного) размаха варьирования функции трудоёмкости для

входов длины n — $R_N(n)$ как отношение половины теоретического размаха варьирования к его середине:

$$R_N(n) = \frac{f_A^{\wedge}(n) - f_A^{\vee}(n)}{f_A^{\wedge}(n) + f_A^{\vee}(n)}. \qquad (2)$$

При этом значение $R_N(n) = 0$ соответствует ситуации, когда $f_A^{\wedge}(n) - f_A^{\vee}(n) = 0$, т. е. идентифицирует принадлежность алгоритма к классу N — классу количественно-зависимых алгоритмов.

Одной из общепринятых точечных характеристик выборки является коэффициент вариации V, определяемый как отношение стандартного отклонения к среднему значению [6]. Для выборки, полученной на основе экспериментального исследования трудоёмкости алгоритма, коэффициент вариации V также зависит от размерности и имеет вид:

$$V(n) = s_{f_A}(n) \big/ \overline{f_A}(n),\ 0 \leqslant V(n) \leqslant 1, \qquad (3)$$

где $s_{f_A}(n)$ — выборочное стандартное отклонение трудоёмкости как дискретной ограниченной случайной величины при фиксированной длине входа n; $\overline{f_A}(n)$ — выборочное среднее, рассчитанное по данным выборки.

С учётом этих рассуждений в работе [5] на основе формул (2) и (3) вводится статистическая количественная оценка информационной чувствительности алгоритма по трудоёмкости:

$$\delta_{IS}(n) = V(n)\ R_N(n),\ 0 \leqslant \delta_{IS}(n) \leqslant 1. \qquad (4)$$

Поскольку оценка $\delta_{IS}(n)$ использует только статистические точечные оценки трудоёмкости как случайной величины, то её применение возможно и при отсутствии знаний о законе распределения значений трудоёмкости или какой-либо его аппроксимации. Таким образом, значения оценки $\delta_{IS}(n)$ могут быть получены на основе экспериментальных исследований алгоритма, по результатам которых вычисляется значение $V(n)$, и его теоретического анализа, необходимого для вычисления нормированного размаха варьирования по формуле (2).

Содержательно важным недостатком статистической количественной меры является то, что она не позволяет указать интервал значений трудоёмкости при заданной вероятности, а следовательно, не может быть адаптирована к требованиям разработчиков алгоритмического обеспечения, в частности, для обеспечения требований стабильности по времени.

Квантильная оценка информационной чувствительности. Задача теоретического обоснования закона распределения, соответствующего данному алгоритму, даже при фиксированной длине входа является достаточно сложной. Идея рассмотрения трудоёмкости алгоритма при фиксированной длине входа как ограниченной случайной величины, аппроксимируемой некоторой известной функцией плотности распределения вероятностей, привела к введению понятия доверительной трудоёмкости [7] на основе вычисления γ-квантиля аппроксимирующего закона распределения. На основе этого подхода в работе [8] была предложена и квантильная оценка информационной чувствительности алгоритмов. Основная идея состоит в определении длины сегмента нормированных значений трудоёмкости, по которому интеграл от функции плотности равен заданной вероятности (надёжности) γ, отражающей требования разработчиков по информационной чувствительности, а по сути — особенности проблемной области применения алгоритма. Нормированные значения трудоёмкости вычисляются по формуле

$$x_f = \frac{f - f_A^{\vee}(n)}{f_A^{\wedge}(n) - f_A^{\vee}(n)} = \frac{f - f_A^{\vee}(n)}{R(n)}. \qquad (5)$$

Содержательно такая количественная оценка с обозначением $\delta_{IQ}(\gamma)$ [8] есть доля теоретического сегмента варьирования трудоёмкости, в которой с заданной вероятностью γ будут наблюдаться значения трудоёмкости алгоритма на произвольных входах фиксированной длины. В общем случае задача определения сегмента, по которому интегрируется заданная вероятность при известной функции плотности, имеет бесконечное множество решений [9]. Традиционное решение этой задачи — определение длины сегмента, задающего вероятность γ, симметрично относительно медианы распределения. При известной функции распределения вероятностей эта задача решается на основе вычисления $1/2 \pm \gamma/2$-квантилей этого распределения. Такая оценка информационной чувствительности является характеристикой алгоритма для входов фиксированной длины. Очевидно, что для практического применения и теоретического исследования алгоритма необходимо рассматривать $\delta_{IQ}(\gamma)$ не только как функцию вероятности γ, но и как функцию длины входа n, т. е. $\delta_{IQ} = \delta_{IQ}(\gamma, n)$.

Пусть $\Phi = \{ f(n, x)\}$, $x \in [0, 1]$ есть семейство непрерывных функций плотности распреде-

ления, аппроксимирующих нормированные значения трудоёмкости, параметризированное аргументом n — длиной входа алгоритма. Зафиксируем некоторое значение длины входа n, тогда для любой непрерывной, не обращающейся в нуль на интервалах, функции плотности распределения вероятностей $f(n, x)$ из семейства Ф соответствующая интегральная функция распределения вероятностей $F(n, x)$ является монотонно возрастающей, в силу чего имеет обратную функцию. Обозначим через $F^{-1}(n, x)$ функцию, обратную к $F(n, x)$, тогда согласно [9]

$$\delta_{IQ}(\gamma, n) = F^{-1}\left(n, \frac{1}{2} + \frac{\gamma}{2}\right) - F^{-1}\left(n, \frac{1}{2} - \frac{\gamma}{2}\right). \quad (6)$$

Интуитивно понятно, что с уменьшением разброса значений трудоёмкости относительно математического ожидания, приводящего к уменьшению дисперсии, информационная чувствительность алгоритма по трудоёмкости будет падать. Заметим, что использование медианы, а не математического ожидания в определении квантильной оценки информационной чувствительности связано с тем, что медиана и математическое ожидание не обязательно совпадают для несимметричных функций плотности распределения с ограниченной вариацией. Использование в этом случае значения математического ожидания как центра сегмента интегрирования функции плотности может привести, для значений γ, близких к единице, к выходу границ этого сегмента за границы определения функции плотности с ограниченной вариацией.

Использование квантильной оценки позволяет разработчикам, варьируя значение вероятности γ, гибко оценивать информационную чувствительность, учитывая требования технического задания на разработку программ. Заметим, что значение $\gamma = 1$ приводит к значению $\delta_{IQ}(1, n) = 1 \forall n$, т. е. информационной чувствительности по полному нормированному размаху варьирования. Отметим, что эта оценка не содержит информацию о положении γ-квантиля закона распределения на нормированном сегменте. Однако этот недостаток легко устраним при построении функционала операционной оценки.

Количественная оценка операционной чувствительности. Для более детального анализа алгоритма для разработчиков представляет интерес не только собственно длина сегмента, но и его положение, равно как и зависимость этих величин от длины входа. Таким образом модифицированная квантильная оценка информационной чувствительности запишется в виде:

$$\delta^*_{IQ}(\gamma, n) = \\ = \left(x^{(1)}_\gamma(n),\ x^{(2)}_\gamma(n),\ x^{(2)}_\gamma(n) - x^{(1)}_\gamma(n)\right), \quad (7)$$

т. е. количественная оценка $\delta^*_{IQ}(\gamma, n)$ задаётся тремя числами: значениями левой и правой границ нормированного сегмента, по которому интегрируется заданная вероятность γ, и длиной этого сегмента.

Однако для разработчиков более актуальной является информация, представленная не в относительных, а в абсолютных единицах — их интересует чувствительность алгоритма в элементарных операциях модели вычислений, на основе которой можно перейти к оценке разброса времени выполнения (оценке стабильности по времени программной реализации алгоритма). Такой переход от трудоёмкости к временной эффективности может быть осуществлён, например, по методике, предложенной в работе [3].

По замыслу авторов, операционная чувствительность должна показывать границы изменения трудоёмкости алгоритма на фиксированной длине входа при заданной исследователем доверительной вероятности. Для этого авторы предлагают использовать оценку $\delta^*_{IQ}(\gamma, n)$, прийдя в ней к абсолютным значениям. Обращение формулы (5) приводит к тому, что значению $x^{(1)}_\gamma(n)$ (рис. 1) соответствует $f^\vee_A(n) + x^{(1)}_\gamma(n)R(n)$, значению $x^{(2)}_\gamma(n)$ — $f^\vee_A(n) + x^{(2)}_\gamma(n)R(n)$, а длине нормированного сегмента $x^{(2)}_\gamma(n) - x^{(1)}_\gamma(n)$ — сегмент значений трудоёмкости, связанный с информационной

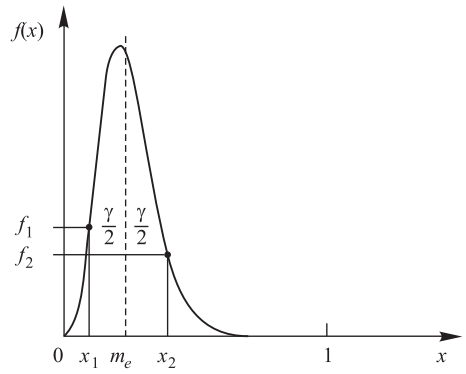

Рис. 1. Квантильная количественная мера информационной чувствительности: $\delta_{IQ}(\gamma, n) = x_2 - x_1$

чувствительностью $\delta_{IQ}(\gamma, n)$ соотношением $\delta_{IQ}(\gamma, n)R(n)$, где $R(n)$ определится по формуле (1).

Таким образом, вводим оценку операционной чувствительности с обозначением $\delta_{OP}(\gamma, n)$ на основе модифицированной квантильной оценки информационной чувствительности, размаха варьирования и обращения формулы (5):

$$\delta_{OP}(\gamma, n) = \\ = \begin{pmatrix} f_A^{\vee}(n) + x_{\gamma}^{(1)}(n)R(n), \\ f_A^{\vee}(n) + x_{\gamma}^{(2)}(n)R(n), \delta_{IQ}(\gamma, n)\ R(n) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Более корректно $\delta_{OP}(\gamma, n)$ есть функционал, отображающий алгоритм и множество входов фиксированной длины в три числовых значения, т.е. отображающий пару (A, D_n) в R^3, где A — алгоритм, D_n — множество входов фиксированной длины.

Методика экспериментального определения операционной чувствительности. Непосредственное применение формулы (8) приводит к необходимости построения аппроксимирующей функции плотности для наблюдаемых значений трудоёмкости. Если исследователь может быть удовлетворён менее точным определением границ сегмента информационной чувствительности, то в этом случае предлагается следующий, более простой метод определения значений $\delta_{OP}(\gamma, n)$:

1. Фиксация интересующей исследователя длины входа n и проведение экспериментального исследования программной реализации алгоритма для определения числа заданных элементарных операций. Рекомендуемое число экспериментов m не менее 10 000, при этом генерация входов может выполняться либо на основе псевдослучайного равномерного генератора, либо с учётом особенностей входов, определяемых областью применения.

2. Построение гистограммы относительных частот полученных значений трудоёмкости при разбиении полученного экспериментального размаха варьирования не более чем на $\sqrt{m}$ (правая граница рекомендуемого числа полусегментов [9]) равных полусегментов. При m = 10 000 получим 100 полусегментов гистограммы.

3. Задание доверительной вероятности γ для операционной чувствительности и определение значения $\alpha = (1 - \gamma)/2$.

4. Суммирование относительных частот в левых и правых полусегментах гистограммы вплоть до достижения полученного значения α. Тем самым отбрасываем левый и правый хвосты распределения (см. рис.1), имеющие вероятность α. Полученные таким образом границы и являются границами в $\delta_{OP}(\gamma, n)$.

Модельный пример. Проиллюстрируем предложенную оценку на основе данных экспериментального исследования [8] алгоритма Кнута—Морриса—Пратта для поиска подстроки в строке [10]. Этот алгоритм использует префиксную функцию для предобработки строки поиска. Теоретические функции трудоёмкости алгоритма Кнута—Морриса—Пратта в случае однократного вхождения подстроки, необходимые для нормирования значений трудоёмкости, получены в работе [11]. При этом трудоёмкость в лучшем случае имеет вид $f_A^{\vee}(n, m) = 14n + 17m - 7$, а функция трудоёмкости в худшем случае равна $f_A^{\wedge}(n, m) = 24n + 17m - 27$, где n — длина строки, m — длина подстроки. Заметим, что функция трудоёмкости для этого алгоритма имеет два аргумента. Для значений n = 10 000, m = 20 получаем теоретический минимум и максимум трудоёмкости для однократного вхождения:

$$f_A^{\vee}(10\ 000, 20) = 140\ 333,$$
$$f_A^{\wedge}(10\ 000, 20) = 240\ 313.$$

Экспериментальное исследование было проведено при n = 10 000 и m = 20 по методике, предложенной в работе [12]. Генерировались случайные входы, для которых случайно выбиралась подстрока с однократным вхождением. Проведено 20 000 экспериментов, в каждом из которых фиксировалось значение трудоёмкости — число элементарных операций (в модели вычислений [1]), заданных алгоритмом. На основе этих данных построена гистограмма относительных частот W значений трудоёмкости (рис. 2). Отметим, что поведение

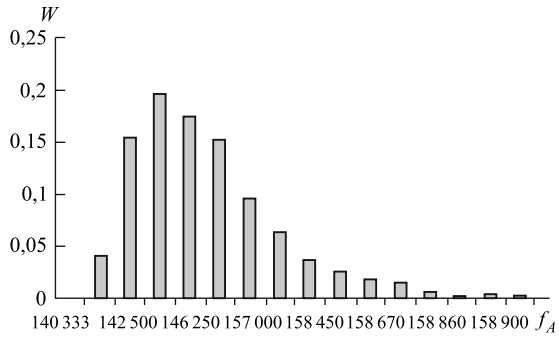

Рис. 2. Ненулевая часть гистограммы относительных частот значений функции трудоёмкости для алгоритма Кнута—Морриса—Пратта (n = 10 000, m = 20)

значений трудоёмкости как ограниченной случайной величины имеет для этого алгоритма и данных параметров входа ярко выраженную асимметрию, в данном случае — левую.

Нормирование значений трудоёмкости в сегмент [0, 1] проведено по теоретически полученным границам. Была выдвинута гипотеза H_0 об аппроксимации гистограммы нормированных относительных частот функцией плотности бета-распределения. Методом моментов [12] определены параметры аппроксимирующего бета-распределения: $\alpha = 1{,}42$; $\beta = 18{,}47$. После вычисления теоретических относительных частот для функции плотности бета-распределения с данными параметрами гипотеза H_0 подтверждена критерием согласия Пирсона. Для вероятности $\gamma = 0{,}95$ вычислено значение $\delta_{IQ}(\gamma) = 0{,}2104$, при этом границы сегмента, соответствующего $1/2 \pm \gamma/2$-квантилям бета-распределения (см. рис. 1), оказались равными: $x_1 = 0{,}0049$, $x_2 = 0{,}2153$. Операционная чувствительность, определённая по формуле (8), для $n = 10\,000$ при $m = 20$

$$\delta_{OP}(0{,}95\ 10\,000,\ 20) = \\ = (140\,823,\ 163\,349,\ 21\,526). \qquad (9)$$

Таким образом, для данного модельного примера при размахе варьирования в 99 980 элементарных операций операционная чувствительность при доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$ составляет 21 526 элементарных операций (менее 22 % размаха варьирования), а ожидаемое число элементарных операций при данной вероятности колеблется от 140 823 до 163 349, при этом положение сегмента операционной чувствительности близко к теоретическому лучшему случаю. Переходя в (9) от обобщённых операций к времени выполнения (для данного компьютера и данного языка программирования), можно получить значения временной чувствительности.

Заключение. На основе вероятностного подхода к описанию трудоёмкости алгоритма на входах фиксированной длины предложена новая оценка качества алгоритма — операционная чувствительность, которая строится на основе информационной чувствительности и теоретического размаха варьирования. Введённая оценка операционной чувствительности может быть использована при прогнозировании временной эффективности компьютерных алгоритмов, а также при решении задачи рационального выбора алгоритмов по критерию временной устойчивости (стабильности времени выполнения на разных входах фиксированной длины), равно как и при решении других задач прикладной теории алгоритмов.

Библиографические ссылки

1. **Ульянов М.В.** Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.

2. **Ульянов М.В.** Метод прогнозирования временных оценок программных реализаций алгоритмов на основе функции трудоёмкости // Информационные технологии. 2004. № 5. С. 54—62.

3. **Ульянов М.В.** Классификация и методы сравнительного анализа вычислительных алгоритмов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 212 с.

4. **Ульянов М.В., Головешкин В.А.** Информационная чувствительность функции трудоёмкости алгоритмов к входным данным // Новые информационные технологии: Сб. тр. VII Всероссийской науч.-техн. конф. М.: МГАПИ, 2004. С. 19—26.

5. **Ульянов М.В.** Система обозначений в анализе ресурсной эффективности вычислительных алгоритмов // Вестник МГАПИ. Серия: Естественные и инженерные науки. 2004 № 1 (1). С. 42—49.

6. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов, 9-е изд., М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

7. **Ульянов М.В., Петрушин В.Н., Кривенцов А.С.** Доверительная трудоёмкость — новая оценка качества алгоритмов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 2. С. 23—37.

8. **Ульянов М.В., Алексеенко А.С.** Вероятностный подход к определению количественной меры информационной чувствительности компьютерных алгоритмов // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 10. С.24—32.

9. **Лагутин М.Б.** Наглядная математическая статистика: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.

10. **Гасфилд Д.** Строки, деревья и последовательности в алгоритмах: Информатика и вычислительная биология. СПб.: Невский диалект, 2003. 654 с.

11. **Алексеенко А.С.** Информационная чувствительность алгоритма Кнута—Морриса—Пратта // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 / под общ. ред. Е.В. Никульчева. М.: МГУП, 2010. С. 7—10.

12. **Петрушин В.Н., Ульянов М.В.** Планирование экспериментального исследования трудоёмкости алгоритмов на основе бета-распределения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 2. С. 81—91.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Статическая крутильная жёсткость привода станка на основе эпициклоидально-цевочной передачи. *Вестник машиностроения.* 2015. № 1.

Приведены результаты экспериментального определения статической крутильной жёсткости электромеханического циклоидного привода станка. Даны рекомендации по синтезированию рациональных конструкций циклоидально-цевочных редукторов.

Определение декрементов собственных колебаний при резонансных испытаниях конструкций. *Вестник машиностроения.* 2015. № 1.

Предложены способы определения логарифмических декрементов (коэффициентов демпфирования) колебаний конструкций по экспериментальным амплитудным частотным характеристикам, мнимым и действительным составляющим частотных характеристик перемещений, скоростей и ускорений.

Повышение энергоэффективности и надёжности червячных передач оптимизацией подбора смазочных материалов по ускоренным испытаниям. *Вестник машиностроения.* 2015. № 1.

Рассматривается методика испытаний червячного редуктора, в которой для сравнительной оценки его надёжности по нагрузочной способности использовали тормозные моменты, соответствующие экстремуму КПД. Испытания проводили с различными смазочными материалами.

Исследование дисперсных металлических порошковых систем Al-3d с использованием электрофизической обработки. *Вестник машиностроения.* 2015. № 1.

Представлены результаты исследований композиционных материалов на основе порошковых систем Al-3d, прошедших обработку ВЧ-плазмой.

Результаты исследования планарных опаловых структур методами сканирующей туннельной микроскопии. *Наноинженерия.* 2015. № 1.

Анализируется возможность использования сканирующей туннельной микроскопии для изучения электрофизических свойств опаловых структур, формируемых для применения в микро- и наноэлектронике. Приведены результаты исследования тонких опаловых пленок на СЗМ Solver Next и комплексе УМКА.

Динамические магнитные свойства аморфного сплава 30КСР, подвергнутого термической обработке. *Наноинженерия.* 2015. № 1.

Изучено формирование динамических магнитных свойств аморфного сплава на основе железа при термической обработке в докристаллизационной области температур, где наблюдается наноструктурная перестройка. Проведено сравнение с результатами, полученными без отжига в образцах разного диаметра.

Исследование зависимости предела текучести от температуры на примере бездефектных нановолокон чистых металлов Ni и Al и интерметаллида Ni_3Al. *Наноинженерия.* 2015. № 1.

Проведена проверка возможности формирования положительной температурной зависимости значения параметра предела текучести в изначально бездефектных нановолокнах металлов Ni, Al и сплава интерметаллида Ni_3Al, имеющих ГЦК-структуру. Расчёт значений пределов текучести проводился методом молекулярной динамики с использованием парных потенциалов Морзе. Для расчёта откольной прочности моделировалась динамическая деформация нановолокон путём смещения абсолютно жёстких захватов. Температура эксперимента задавалась от 10 K до температуры, близкой к температуре плавления соответствующих материалов. Для термостабилизации использовался термостат Берендсена. По полученным результатам сделан вывод о наличии предпосылок к формированию положительной температурной зависимости предела текучести в исследуемых нановолокнах.

Транспортные свойства и фазовые характеристики нелегированных и легированных халькогенидных стеклообразных полупроводников состава GST-225. *Наноинженерия.* 2015. № 1.

Рассмотрены транспортные свойства и фазовые характеристики нелегированных и легированных бором и азотом халькогенидных стеклообразных полупроводников состава GST-225. Получены оптимальные параметры импульсов напряжения для изменения фазового состояния легированных ХСП состава GST-225, а также выявлено предельное число циклов изменения фазового состояния для каждого типа ХСП.

Комплексная автоматизированная обработка лопаток компрессора методами высокопроизводительного шлифования. *Наукоёмкие технологии в машиностроении.* 2015. № 1.

Представлены новая технология и прогрессивное оборудование для реализации комплексной автоматизированной обработки лопаток компрессора ГТД. Описаны принципы формообразования хвостовика и проточной части лопаток компрессора методом шлифования, а также поверхностей перехода аэродинамического профиля лопатки к хвостовику методом фрезерования.

Анализ причин снижения точности при изготовлении сборных зубчатых колес с болтовым соединением. *Наукоёмкие технологии в машиностроении.* 2015. № 1.

Рассмотрены процесс сборки сборных зубчатых колёс с помощью болтового соединения и возникающие при этом погрешности. Представлены расчёты различных вариантов соединения с помощью ЭВМ и специального программного обеспечения.

Влияние технологии получения электродного материала из отходов быстрорежущей стали на износостойкость электроискровых покрытий. *Наукоёмкие технологии в машиностроении.* 2015. № 1.

Представлены комплексные исследования влияния технологии получения электродного материала из отходов быстрорежущей стали электроэрозионным диспергированием на износостойкость электроискровых покрытий. Определены характеристики износостойкости электроискровых покрытий, такие как среднее значение коэффициента трения, фактор износа контртела и электроискрового покрытия.

Оптимизация технологии восстановления замковых соединений бурильных труб методом наплавки. *Наукоёмкие технологии в машиностроении.* 2015. № 1.

Рассмотрена оптимизация технологии ремонта бурильных труб методом наплавки. Проанализированы различные флюсы и их композиции, а также защитные газовые атмосферы при производстве наплавки. Произведена оценка физико-механических свойств восстановленных замковых соединений бурильных труб после восстановления в различных защитных средах. Проанализировано микроструктурное состояние основного металла, установлена зависимость размера зерна от толщины и количества наплавляемых слоёв.

Способ подтверждения технического ресурса и надёжности ЖРД с использованием толерантных пределов. *Полёт.* 2015. № 1.

Разработан способ подтверждения надёжности ЖРД ресурсными испытаниями 10...15 двигателей до предельного состояния с использованием толерантных пределов. Он позволяет на порядок сократить затраты на подтверждение требуемой надёжности (0,995...0,998) перспективных ЖРД по сравнению с используемым на практике способом подтверждения по наработке в успешных испытаниях.

Роговая и выносная аэродинамическая компенсация как способ уменьшения шарнирного момента органа управления летательного аппарата. *Полёт.* 2015. № 1.

Представлены виды аэродинамических компенсаций (роговая и выносная) как способы уменьшения шарнирных моментов, действующих на органы управления самолётов с ручным управлением. Использован электронный банк данных, созданный в ЦАГИ на основе многолетних экспериментальных исследований.

Выбор проектного облика аммиачной двигательной установки наноспутниковой платформы. *Полёт.* 2015. № 1.

Рассмотрен подход к созданию аммиачной двигательной установки наноспутниковой платформы с электротермическим микродвигателем с совмещённой с испарителем схемой, обеспечивающей запасы характеристической скорости наноспутника до 60 м /с. Приведены результаты экспериментальных исследований микродвигателя.

Нейросетевое полуэмпирическое моделирование продольного короткопериодического движения маневренного самолёта. *Полёт.* 2015. № 1.

Рассматривается проблема математического и компьютерного моделирования продольного короткопериодического движения маневренного самолёта. Целью работы является развитие класса модульных полуэмпирических моделей движения, обладающих свойством адаптивности. Работоспособность и перспективность подхода подтверждаются результатами вычислительных экспериментов.

Структура стационарной сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2015. № 1.

Показано, что стационарная сборка обычно реализуется в виде сборочного центра, включающего базовый комплект, операционный накопитель и систему управления. Такой сборочный центр представляет собой автономный сборочный модуль, который служит основой для формирования сборочных комплексов, линий и участков. Для сборки крупногабаритных изделий на базе сборочного центра формируют структуру групповой поточной сборки. В серийном производстве часто используют вариант стационарной сборки, построенной по циклонезависимой схеме, в которой цикл работы каждого оператора не зависит от остальных.

Точность автоматизированного контроля пористости материалов газодинамическим методом. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2015. № 1.

Теоретически обоснован способ автоматизированного определения пористости материалов. Разработано устройство контроля. Определена точность способа контроля пористости материалов.

Снятие нагара с направляющих аппаратов газотурбинного двигателя с использованием виброабразивной обработки. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2015. № 1.

Представлены результаты исследования способа очистки направляющих аппаратов газотурбинного двигателя при обработке в торовых вибрационных полировальных установках.