Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71
8
2017

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (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)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
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 — **Мымрина И.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.
ПИ № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России 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.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Мешков Н.А., Пьо Си Тху. Исследование подходов к задаче идентификации динамических объектов 339

Ведель М.В., Домбровский И.В. Применение активного управляемого инструмента при глубоком сверлении 346

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кай Шэнь, Селезнева М.С. Разработка численного критерия степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем 351

Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Чжо Зин Хтут. Редуцированная динамическая экспертная система с интеллектуальной компонентой для контроля прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата 356

Володина К.В. Использование системы АСОНИКА для исследования влияния температуры на параметры электромагнитной взаимосвязи печатных проводников 360

Балахонов К.А., Шахтарин Б.И., Лихоеденко К.П. Схема Костаса с использованием вентилей «исключающее ИЛИ» вместо других входных схем смесителей 364

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Доронина Ю.В., Карпова Т.С., Доронина Е.Б. Формализация процесса управления жизненным циклом информационной системы на основе анализа её ресурсов 367

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Сулавко А.Е., Жумажанова С.С., Семёнова З.В., Ковальчук А.С., Борисов Р.В. Комплексная система распознавания водителей транспортных средств и их психофизиологического состояния по динамическим биометрическим признакам . . 373

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Быстрянцев Е.В., Логойда В.С. Методика определения рациональных параметров информационного обеспечения автомобильного транспорта 381

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Meshkov N.A., Pio Si Tkhu. Investigation of approaches to the task of dynamic objects identifying 339

Vedel M.V., Dombrovskiy I.V. The use of an active tool for deep drilling 346

MODERN TECHNOLOGY

Kay Shen, Selezneva M.S. Development of a numerical criterion for the observability degree of the nonlinear systems variables state. 351

Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Chzho Zin Khtut. Reduced dynamic expert system with an intelligent component for monitoring the sight-navigation complex of an aircraft 356

Volodina K.V. Using the ASONIKA system to investigate the temperature influence on the parameters of the printed conductors electromagnetic interconnection. 360

Balakhonov K.A., Shakhtarin B.I., Likhoedenko K.P. The Costas scheme using «exclusive-OR» valves instead of the others input mixer circuits. 364

INFORMATION TECHNOLOGY

Doronina Yu.V., Karpova T.S., Doronina E.B. Control process formalization of the information system lifecycle based on an analysis of its resources 367

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Sulavko A.E., Zhumazhanova S.S., Cemenova Z.V., Kovalchuk A.S., Borisov R.V. Complex system for vehicles drivers recognition and their psychophysiological state by dynamic biometric characteristics 373

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bystryantsev E.V., Logoyda V.S. The method of determining rational parameters for information support of motor transport 381

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

Сдано в набор 31.05.2017.
Подписано в печать 11.07.2017.
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», 2017

УДК 681.5.015

Н.А. Мешков, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского),
Пьо Си Тху
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

nmeshkov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены методы решения задач управления динамическими объектами с использованием математических моделей исследуемых процессов. Уточнение структуры и параметров моделей систем управления проведено с использованием различных алгоритмов идентификации и алгоритмов построения моделей. Исследованы подходы к задаче идентификации динамических объектов. Рассмотрена классификация математических моделей. Построена схема процесса имитационного моделирования систем управления.

Ключевые слова: идентификация динамических объектов; алгоритмы идентификации; математическое моделирование систем управления; аналоговое и квазианалоговое моделирование; кибернетические системы; имитационное моделирование систем управления.

The methods for control problems solving of dynamic objects through the use of mathematical models of the investigated processes are considered. Structure and parameters clarification of control systems models was carried out through the use of various identification algorithms and model building algorithms. Approaches to the task of identifying dynamic objects are investigated. The classification of mathematical models is considered. The process scheme of the control systems simulation modeling is constructed.

Keywords: identification of dynamic objects; identification algorithms; mathematical modeling of control systems; analog and quasi-analog modeling; cybernetic systems; simulation modelling of control systems.

Введение. Решение задач управления 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, 2]. 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 модели требует дополнительных исследований. Алгоритмы идентификации позволяют определить отдельные параметры модели, структура которой задана априори. Точность определения параметров модели зависит от свойств модели и точности алгоритма идентификации, который выбирается из соображений возможностей реализации в имеющемся вычислителе и имеющейся априорной информации о моделируемом объекте.

Цель и задачи исследования. Современный уровень вычислительной техники позволяет реализовать сложные алгоритмы управления. В практических приложениях некоторые параметры моделей систем управления достоверно неизвестны, поэтому проводится их идентификация, которая позволяет получить наиболее точные модели.

Метод научного исследования. Одним из видов познавательной деятельности является научное исследование — процесс выработки новых научных знаний.

Научное исследование характеризуется полнотой, достоверностью, объективностью, воспроизводимостью, доказательностью, точностью.

При научном исследовании можно выделить два взаимосвязанных уровня: эмпирический и теоретический. На эмпирическом

уровне исследователи устанавливают и обобщают новые научные факты и на их основе формулируют конкретные эмпирические закономерности. На теоретическом уровне — выдвигают и формулируют общие для данной предметной области теоретические закономерности, позволяющие не только объяснить ранее зафиксированные факты и выявленные эмпирические закономерности, но и предсказать будущие события.

Основными элементами научного исследования являются: обнаружение проблемы; формулирование целей и задач исследования; декомпозиция задач исследования; анализ имеющейся информации; изучение методов решения задач данного типа; формулирование исходных гипотез; анализ исходных гипотез; планирование и подготовка наблюдений (экспериментов, измерений); имитация условий; проведение наблюдений; анализ и обобщение данных наблюдений; проверка исходных гипотез на основе полученных данных; уточнение исходных гипотез в соответствии с полученными данными; прогнозирование новых результатов; определение направлений дальнейших исследований.

Идентификация объекта исследования. Построение оптимальной, в некотором смысле, математической модели объекта исследования по реализациям её входных и выходных сигналов называется идентификацией объекта исследования.

К основным задачам идентификации объекта исследования относятся: выбор класса используемых моделей и критериев соответствия модели и объекта исследования; выбор метода идентификации и разработка соответствующего алгоритма.

Класс используемых моделей выбирают на основе теоретического и экспериментального анализов объекта исследования с использованием общих закономерностей протекающих в нём процессов. С помощью экспериментального анализа проводятся количественная оценка объекта исследования и проверка соответствия ему выбранной теоретической модели.

Методы идентификации объектов исследования делятся на два класса: методы функциональной идентификации, использующие самые общие гипотезы об объекте исследования; методы параметрической идентификации, применяемые в тех случаях, когда параметры математических моделей объектов исследования известны и нужно лишь получить их количественную оценку.

Идентификация систем управления. Под идентификацией системы управления понимается решение задачи построения математической модели исследуемой системы управления по данным наблюдений за её поведением — значениям входных и выходных сигналов. На практике под этим подразумевается построение достаточно «хорошей и надёжной» модели системы (с точки зрения её последующего применения) ценой «разумных» (допустимых) затрат.

В процессе идентификации систем управления можно выделить три основных этапа: регистрация данных наблюдений за поведением системы; определение множества моделей-кандидатов; выбор метода идентификации — правила оценки степени соответствия модели данным наблюдений.

Функциональная идентификации систем управления проводится при самых общих гипотезах о системе управления (предположении о её линейности, стационарности, детерминированности и др.). Параметрическая идентификация используется в тех случаях, когда математическая модель системы известна с точностью до параметров, значения которых необходимо оценить.

Завершается процесс идентификации систем управления процедурой подтверждения модели — проверкой соответствия выбранной модели исследуемой системе (априорной информации о системе, данным наблюдений, полученным в ходе экспериментов, целевому назначению системы).

Процесс идентификации систем управления является итеративным. Если выбранная модель в чём-либо не удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям, все предусмотренные алгоритмом действия повторяются, но уже с учётом накопленного опыта. Схема идентификации представлена на рис. 1.

Проблемы, возникающие в процессе идентификации системы управления, могут объясняться следующими причинами: неудачно выбран критерий соответствия модели исследуемой системе; численными методами нельзя найти наилучшую по используемому критерию модель; среди моделей-кандидатов нет «хорошей и надёжной» модели исследуемой системы; данные наблюдений за поведением системы недостаточно информативны.

При постановке и решении задач идентификации важное значение имеют условия использования ожидаемых результатов: если при исследовании системы управления ставится

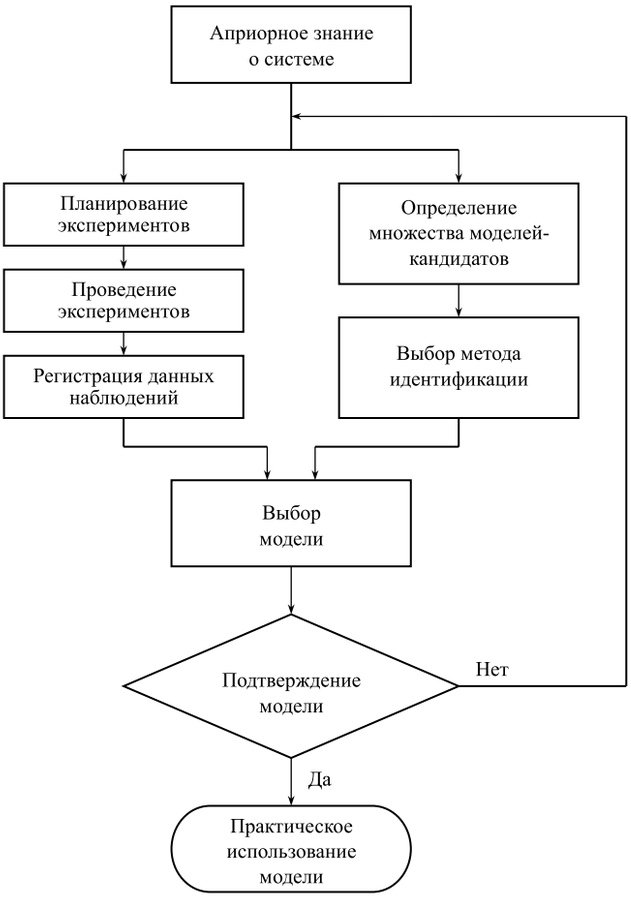

Рис. 1. Схема идентификации системы управления

задача определения структуры и оценки параметров модели, адекватно отражающей основные закономерности процессов, протекающих в объекте исследования, то в задачах управления строгая адекватность моделей объектам исследования не является необходимой.

Решение задач управления динамическими объектами предполагает использование математической модели исследуемого процесса. Математические модели, полученные на основе физических или каких-либо других законов, в практических приложениях не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации и построения моделей. Алгоритмы идентификации позволяют определить отдельные параметры модели, которая задана априори. В качестве алгоритмов построения моделей часто используются наиболее точные алгоритмы: генетические алгоритмы, нейронные сети и методы самоорганизации (в частности, метод группового учёта аргументов) [3—5]. Алгоритмы построения моделей позволяют создавать модели исследуемых процессов с высокой точностью, но эти модели являются нефизичными, их структура заранее неизвестна и в процессе построения модели постоянно меняется.

Поэтому в практических приложениях для управления и анализа обычно используются физические модели с априорно известной структурой. В процессе функционирования динамического объекта в меняющихся условиях некоторые параметры моделей могут существенно изменяться, поэтому их необходимо определять с помощью алгоритмов идентификации. Точность определения параметров модели зависит от свойств модели и точностных характеристик алгоритма идентификации. Используемый алгоритм идентификации выбирается исходя из возможностей реализации в имеющемся вычислителе, экономических возможностей и особенностей проектируемого объекта. Точностные характеристики наиболее популярных алгоритмов идентификации известны. Свойства моделей различных динамических объектов, влияющие на точность определения отдельных параметров, изучены, в основном, для хорошо отработанных моделей (например, в ядерной технике, инерциальной навигации и некоторых других приложениях). Исследование конкретных моделей на предмет качества идентификации проводилось опытным путём. В общем случае применение такого подхода требует проведения серии сложных экспериментов, обработки большого статистического материала, длительного времени и существенных финансовых затрат [6, 7].

Известны различные методы определения идентифицируемости, позволяющие установить принципиальную возможность осуществления процедуры идентификации [8]. Также известны методы вычисления меры идентифицируемости, главный недостаток которых заключается в том, что они требуют проведение чрезвычайно сложных предварительных вычислений.

Математическое моделирование. Под математическим моделированием понимается метод исследования систем управления построением и изучением их математических моделей. В основу математического моделирования положена косвенная аналогия явлений различной физической природы. Эффективное управление динамическими объектами предполагает построение математической модели исследуемого процесса и изучение её свойств.

Однако реальная система отличается от построенной математической модели. Для приближения параметров математической модели к параметрам «истинной» системы используются алгоритмы идентификации и алгоритмы построения моделей. Для управления динамическими объектами обычно применяются методы параметрической идентификации.

Аналоговое и квазианалоговое моделирование. Под аналоговым моделированием понимается метод исследования систем управления, основанный на использовании аналоговых моделей. Аналоговой называется модель, отражающая и воспроизводящая структуру, свойства, взаимосвязи и отношения изучаемой системы управления.

Обобщением аналогового моделирования является квазианалоговое моделирование — исследование физического процесса путём изучения явления иной физической природы, которое описывается математическими соотношениями, эквивалентными относительно получаемых результатов, и допускает измерение значений неизвестных величин. Состояние объекта моделирования характеризуется группой неизвестных величин $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$, а состояние модели, находящейся в квазианалоговом соответствии с объектом, — группой величин $b_1x_1(t)$, ..., $b_nx_n(t)$, $z_{n+1}(t)$, ..., $z_{n+m}(t)$, где b_1, b_2, ..., b_n — некоторые константы.

Главная особенность квазианалогового моделирования заключается в том, что квазианалоговая модель является аналогом системы уравнений, отличных от уравнений объекта моделирования. Чтобы уравнения объекта моделирования и его квазианалоговой модели стали эквивалентны, необходимо выполнить ряд условий — условий эквивалентности. В частности, когда условия эквивалентности таковы, что для их реализации в модели не требуется использование получаемых в ней величин, то квазианалоговая модель по своим свойствам практически ничем не должна отличаться от моделей прямой аналогии. Такие модели классифицируют как квазианалоговые модели 1-го рода (неуправляемые, неуравновешиваемые). Единый подход к получению уравнений неуравновешиваемых квазианалоговых моделей состоит в замене исходных уравнений эквивалентными или расширенными.

В общем случае, когда реализация условий эквивалентности невозможна без использования получаемых в модели величин, то для реализации этих условий организуют специальное управление — уравновешивание. Модели такого типа называют квазианалоговыми моделями 2-го рода (управляемыми, уравновешиваемыми). Свойства уравновешиваемых моделей определяются структурой эквивалентных уравнений. Как и в случае неуравновешиваемых моделей, единый подход к получению эквивалентных уравнений состоит в том, чтобы заменить исходные уравнения расширенными, обеспечив выполнение условий эквивалентности.

Принцип эквивалентности, лежащий в основе квазианалогового моделирования, более общий, чем принцип подобия, на котором основано аналоговое моделирование. Квазианалоговое моделирование можно применять при решении существенно более широкого класса задач, включая моделирование объектов, описываемых системами уравнений с начальными и краевыми условиями, решение задач оптимального планирования и т. д.

Классификация математических моделей. Все математические модели делятся на две группы: модели без управления и с управлением.

Моделями без управления можно описывать динамические процессы, не содержащие свободных параметров или функций. В общем случае модели такого рода могут быть стохастическими:

$$\dot{x} = f(x, t, \xi),$$

где $x(t)$ — вектор состояний объекта исследования; t — время; $\xi(t)$ — случайная вектор-функция — возмущающее воздействие.

При изучении стохастических систем исследуют не отдельные траектории их эволюционирования, а статистические свойства этих траекторий.

Модели без управления более всего характерны для систем неживой природы.

В группу моделей с управлением входят модели, используемые для оптимизации некоторых конкретных действий и для анализа конфликтных ситуаций (кибернетические системы).

К моделям с управлением, используемым для оптимизации некоторых конкретных действий, относятся модели, описываемые уравнениями вида

$$\dot{x} = (x, t, u, \xi),$$

где $u(t, x)$ — управляющая функция, выбор которой относится к компетенции субъекта управления.

В каждом конкретном случае управляющая функция выбирается из условия достижения цели, стоящей перед системой управления, которая в теории систем формулируется в виде задачи максимизации (минимизации) функционала:

$$J = \int_0^T F(x, t, u, \xi)dt \to \max(\min).$$

Любую кибернетическую систему можно описать с помощью следующей математической модели:

$$\dot{x} = f(x, t, u_1, \ldots, u_n, \xi),$$

где $u_i(t, x)$ — управляющие функции субъектов системы $(i = \overline{1, n})$.

Все субъекты кибернетической системы имеют свои собственные, вполне определённые цели:

$$J_i = \int_0^T F_i(x, t, u_1, \ldots, u_n, \xi)dt \to \max.$$

Из всего многообразия кибернетических систем в первую очередь можно выделить два наиболее известных класса: системы с иерархической структурой, представляющие собой модели конфликтных ситуаций, в которых проявляются отношения подчинённости (иерархические системы), и системы гермейеровского типа, все субъекты которых являются равноправными партнёрами.

Простейшие кибернетические системы, в которых используется небольшой объём информации, используемой для принятия управленческих решений, можно строить по централизованной схеме, которая для них является оптимальной.

Необходимость в децентрализации и создании иерархической организации возникает в тех случаях, когда централизованная обработка информации либо в принципе невозможна, либо связана с недопустимо большими затратами материальных, трудовых или временных ресурсов.

Главная задача иерархической организации заключается в рациональном распределении функций сбора, накопления, обработки и передачи информации, необходимой для принятия управленческих решений. Распараллеливание обработки данных позволяет, с одной стороны, принимать рациональные управленческие решения без учёта сложных взаимосвязей и взаимозависимостей в системе, сужая, однако, при этом множество допустимых стратегий функционирования системы, а с другой — более подробно обрабатывать отдельные массивы данных, снижая тем самым уровень неопределённости (сокращая число и уменьшая значение неопределённых факторов) и повышая качество информации, что в конечном счёте делает возможным получение более качественного решения.

Обозначим через $f(u, \xi)$ целевую функцию исследуемой системы $u = (u_1, \ldots, u_n)$ — вектор управления; ξ — переменная, характеризующая неопределённость). Будем считать, что в условиях жёсткой централизации $u \in G_u$, $\xi \in G_\xi$. Тогда гарантированная оценка f^0 значения целевой функции $f(u, \xi)$ будет определяться выражением $f^0 = \max\limits_{u \in G_u} \min\limits_{\xi \in G_\xi} f(u, \xi)$. Каково бы ни было значение параметра неопределённости $\xi \in G_\xi$, выбор $u^0 \in G_u$ по данной формуле гарантирует, что при любом значении $\xi \in G_\xi$ значение целевой функции будет не меньше, чем f^0.

Отказавшись от жёсткой централизации, можно создать в исследуемой системе иерархическую структуру. Главная особенность иерархических систем заключается в том, что здесь функции управления распределяются между их элементами, принимающими управленческие решения u при ограниченной информации, без использования всего объёма данных:

$$u \in G'_u \subset G_u.$$

Снижение уровня неопределённости в иерархической системе можно охарактеризовать следующим соотношением:

$$\xi \in G'_\xi \subset G_\xi.$$

Гарантированная оценка f' значения целевой функции системы $f(u, \xi)$ на множествах G'_u и G'_ξ выглядит следующим образом:

$$f' = \max_{u \in G'_u} \min_{\xi \in G'_\xi} f(u, \xi).$$

Понятно, что гарантированная оценка целевой функции конкретной иерархической системы во многом зависит от её архитектурной формы. Каждой архитектурной форме s из множества допустимых структур S соответствует своё множество стратегий $G^s_u \subset G'_u$ и своё множество неопределённостей $G^s_\xi \subset G'_\xi$.

Гарантированная оценка f^s значения целевой функции системы $f(u, \xi)$ на множествах $G_u^s \subset G'_u$ и $G_\xi^s \subset G'_\xi$ определяется выражением

$$f^s = \max_{u \in G_u^s} \min_{\xi \in G_\xi^s} f(u, \xi).$$

Отсюда вытекает задача максимизации гарантированной оценки f^s на множестве допустимых структур S:

$$f^* \to \max_{s \in S} f^s.$$

Имитационное моделирование систем управления. Одним из важнейших и эффективнейших средств системного анализа является имитационное моделирование. «Имитационное моделирование есть процесс конструирования модели реальной системы (существующей или способной принять одну из форм существования) и постановка экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы» [9]. В отличие от обычных оптимизационных задач, сводящихся к поиску путей достижения заранее заданной цели и решаемых методами теории исследования операций и теории управления, в задачах системного анализа, решаемых с помощью имитационного моделирования, объектом исследования является сама цель.

Ситуации, в которых применение имитационного моделирования наиболее целесообразно, характеризуются следующими признаками: не существует законченной математической постановки задачи исследования; нет аналитических методов решения задачи исследования; аналитические методы имеются, но используемые процедуры столь сложны и трудоёмки, что имитационное моделирование даёт более простой и дешёвый способ решения поставленной задачи; аналитические методы имеются, но их реализация невозможна из-за недостаточной математической подготовки исследователей (в этом случае имеет смысл сопоставить затраты на проектирование и отладку имитационной модели и проведение эксперимента на модели с затратами, связанными с приглашением сторонних специалистов-аналитиков); в дополнение к оценке параметров объекта исследования требуется в течение определённого периода времени вести наблюдение за ходом изучаемого процесса; невозможно или чрезвычайно трудно поставить полномасштабный натурный эксперимент и организовать наблюдение за объектом исследования в реальных условиях; есть необходимость в сжатии или растяжении временной шкалы — ускорении или замедлении изучаемых процессов.

В любой имитационной модели можно выделить следующие основные элементы: компоненты (составные части модели); параметры модели (величины, выбор которых входит в компетенцию исследователя и которые, после того как они установлены, остаются неизменными); переменные (экзогенные — входные и эндогенные — выходные переменные и переменные состояния); функциональные зависимости, описывающие поведение переменных и параметров в пределах одного компонента или выражающие соотношение между компонентами; искусственные и естественные ограничения, представляющие собой пределы изменения значений переменных или ограничивающие условия распределения и расходования ресурсов; целевые функции, в которых отображаются цели объекта исследования и критерии оценки их достижения.

В основе любой эффективной методики имитационного моделирования лежит тщательно отработанная модель, адекватная объекту исследования. Характеризуя процесс создания моделей систем управления, отметим, что он «может быть лучше всего определён как интуитивное искусство. Любой набор правил для разработки моделей в лучшем случае имеет ограниченную полезность и может служить лишь предположительно в качестве каркаса будущей модели или отправного пункта в её построении» [9].

Схематически процесс имитационного моделирования систем управления представлен на рис. 2.

В современных моделирующих комплексах для построения моделей систем управления часто используются эволюционные алгоритмы [4, 6], преимуществами которых являются возможность построения моделей с учётом субъективных особенностей конкретной системы и условий её функционирования, автоматический выбор структуры модели и высокая степень адекватности. Недостатками моделей являются отсутствие явно выраженного физического смысла, особенности методов проведения анализа и трудности

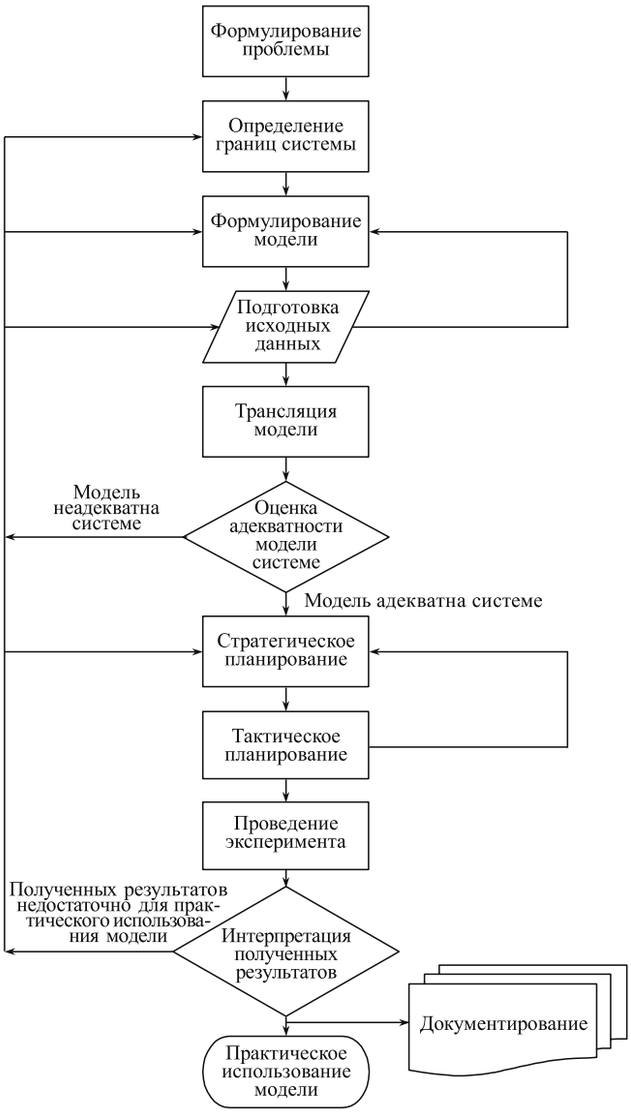

Рис. 2. Схема имитационного моделирования систем управления

в использовании таких моделей для управления из-за необходимости проведения анализа устойчивости в режиме реального времени. В качестве эволюционных алгоритмов используются генетические алгоритмы, нейронные сети и алгоритмы самоорганизации.

В каждом отдельном случае выбор вида моделей решается индивидуально. Например, при разработке моделирующего комплекса кабины-тренажёра инжинирингового центра «Авионика» [10] МГТУ им. Н.Э. Баумана использованы модели, которые базируются на анализе большого объёма статистического материала, модели, полученные с помощью алгоритмов разложения функционалов методами Винера и Вольтерра, а также метода группового учёта аргументов.

Выводы. Таким образом, рассмотрены фундаментальные подходы к решению задачи идентификации. Алгоритмы идентификации, выбираемые в соответствии с особенностями объекта исследования, позволяют определять отдельные параметры модели, структура которой задана априори. Исследованы способы представления моделей в процессе имитационного моделирования систем управления.

Библиографические ссылки

1. **Лукьянова Н.В., Мешков Н.А., Колупаев Р.В.** Исследование систем управления: идентификация, моделирование, прогнозирование: учеб. пособие / под общ. ред. К.А. Неусыпина. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 110 с.

2. **Мешков Н.А., Крупнов Ю.А.** Исследование систем управления: управление инновациями и инвестициями: учеб. пособие. М.: МИЭМ, 2011. 106 с.

3. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.

4. **Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Shen Kai, et al.** Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Journal of Nanjing University of Science and Technology. 2014. № 5. P. 602—607.

5. **Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л.** Модификация нейронной сети Вольтерра методом самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 30—34.

6. **Мешков Н.А.** Развитие и модернизация библиотечного дела в информационном обществе // Сб. Актуальные проблемы современного российского общества: тр. междунар. науч.-практ. конф. М.: ИИУ МГОУ, 2014. С. 49—55.

7. **Knyaginin V.N., Meshkov N.A., Utolin K.V.** Advanced Education in the Information Society // International Review of Management and Marketing. 2016. Vol. 6. No. S3. P. 89—99.

8. **Неусыпин К.А, Шэнь Кай.** Исследование критериев степеней наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 17. 2016. № 1. С. 723—731.

9. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.

10. **Александров А.А., Ван Сяофэн, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Комплексные инновационные разработки в инжиниринговом центре Авионика // Сб. Современные аспекты фундаментальных наук: тр. второго междунар. симпозиума. М.: МГОУ, 2015. С. 150—154.

УДК 67.05

М.В. Ведель, И.В. Домбровский, д-р техн. наук, доц.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

dombrovskii1960@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГЛУБОКОМ СВЕРЛЕНИИ

Предложена роботизированная установка управляемого глубокого сверления, позволяющая обеспечить синхронное перемещение резцовой головки, датчика контроля разностенности обрабатываемой детали и использование подаваемой к резцовой головке смазочно-охлаждающей жидкости в качестве акустической контактной жидкости для работы датчика контроля разностенности.

Ключевые слова: глубокое сверление; активный управляемый инструмент.

A robotized device for controlled deep drilling is proposed. This device provides synchronous movement of the cutting head, the sensor for controlling the work piece wall difference and the use of cutting lubricant supplied to the cutting head as an acoustic contact fluid for the operation of the wall difference sensor.

Keywords: deep drilling; active controlled tool.

Отверстие принято называть глубоким, если его длина в 10 и более раз превосходит его диаметр. Однако при соотношении длины к диаметру, равном 4, во многих случаях проявляются погрешности обработки, характерные для глубокого сверления — «увод» оси, «разбивка» отверстия и др. При обработке глубоких отверстий основной технологической задачей является достижение требуемой точности диаметрального размера, формы и качества поверхности по всей его длине, заданного отклонения от прямолинейности оси, обеспечение концентричности наружной и внутренней поверхностей (требования равностенности) [1, 2].

Ранее понятие «глубокое сверление» ассоциировалось с такими классами деталей машин, как трубы, валы, втулки и т. п., которые являются симметричными телами вращения. В соответствии с этим разрабатывались и схемы глубокого сверления, конструировались инструменты, станки и приспособления.

В настоящее время увеличивается удельный вес деталей, которые также имеют глубокие отверстия, но не являются телами вращения. К ним относятся ресиверы в ядерной технике, корпуса судовых дизельных двигателей, элементы гидрооборудования и многие другие. Такие детали имеют не одно, а несколько глубоких отверстий строго координированных между собой и расположенных с различных сторон и под разными углами.

При обработке заготовок таких деталей основные проблемы глубокого сверления ещё более усложнились. Как и прежде их решению мешают увод оси инструмента при большой длине обработки, сложности эвакуации стружки из зоны резания и интенсивное теплообразование. Но при этом появляются дополнительные проблемы, в частности необходимость точной установки инструмента для глубокого сверления относительно обрабатываемого отверстия. Даже небольшое несовпадение оси подлежащего обработке отверстия в заготовке с осью инструмента на большой длине может привести к значительной погрешности обработки. Это потребовало разработки новых схем обработки, станков, инструментов и приспособлений для их реализации, в результате чего увеличилось количество различных инструментов, типов и компоновок станков для глубокого сверления, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами.

Основная цель глубокого сверления — прямолинейное глубокое отверстие. Основная задача глубокого сверления — уменьшение уводов оси отверстия. Для повышения точности обработки глубоких отверстий разработан ряд методов, которые можно разделить на четыре группы [3]:

реализация различных методов подачи смазывающе-охлаждающих технологических сред (СОТС) и отвода стружки;

управление положением инструмента;

стабилизация положения инструмента или заготовки;

виброгашение колебаний (демпфирующие устройства на детали и станке).

Все предлагаемые методы лишь уменьшают увод, но не изменяют тенденцию его роста при увеличении глубины сверления.

Инновационный метод борьбы с уводом — применение активного управляемого инструмента.

Рассматриваемая ниже роботизированная установка глубокого управляемого сверления (РУГУС) предполагается к использованию в технологии металлообработки на операциях глубокого сверления стальных заготовок.

РУГУС обеспечивает получение (при осевом сверлении цилиндрической заготовки) следующих параметров:

разностенность трубы не более 1 мм для равностенного сверления при кривизне заготовки до 1,5 мм на 1 м длины (режим «равностенность»);

прямолинейность оси отверстия не более 0,5 мм от оси вращения заготовки (режим «прямолинейность);

сверление трубы до 16 или 24 м (одностороннего — «на проход» с одной стороны, либо двухстороннего — последовательное сверление заготовки с обоих торцов до середины);

принудительное отклонение оси отверстия в процессе сверления в требуемом радиальном направлении до 1,5 мм на 1 м длины заготовки.

Работа системы автоматического управления РУГУС обеспечивается в следующих режимах:

автоматический (по программе) в режимах «равностенность» и «прямолинейность»;

ручной — с заданием направления и величины радиального смещения.

РУГУС устанавливается на существующие специализированные станки глубокого сверления и не влияет на алгоритм работы оборудования и его производительность. При этом могут использоваться следующие схемы сверления:

с вращением и детали, и инструмента;

с вращением детали и не вращающимся инструментом;

с вращением инструмента и не вращающейся деталью.

РУГУС можно использовать как при процессе глубокого сверления, так и расточки глубоких отверстий с корректировкой оси отверстия (при обеспечении условий определённости базирования специального инструмента).

Глубина сверления при использовании РУГУС ограничивается габаритными размерами станка и длиной борштанги.

Описание и обоснование выбранной конструкции. За основу была выбрана наиболее распространённая схема сверления со встречным осевым вращением инструмента и детали на станке вертлюжного типа (рис. 1). При этом деталь вращается проходным шпинделем бабки изделия станка, а инструмент, состоящий из сверлильной головки и стебля, — стеблевой бабкой. Осевая подача инструмента осуществляется за счёт перемещения стеблевой бабки.

При этом к торцу детали поджимается маслоприёмник, выполняющий две важные функции: центрирует и направляет через кондукторную втулку сверлильную головку в торец детали, а также обеспечивает подачу СОЖ в кольцевой зазор между просверленным отверстием в детали и стеблем. В процессе сверления стружка под давлением СОЖ выводится из зоны резания через полый стебель (рис. 2).

Из данной схемы видно, что к стеблю предъявляются следующие требования:

высокие требования к наружной поверхности стебля (цилиндричность, шероховатость и т. п.) для обеспечения герметичности уплотнений маслоприёмника и прохождения через стеблевые люнеты;

максимально допустимый (из условия прочности стенки стебля) внутренний диаметр — для обеспечения беспрепятственного вывода большого объёма стружки из зоны резания.

Исходя из того, что длина стебля должна быть на 4—5 м больше глубины сверления (добавляется ширина маслоприёмника

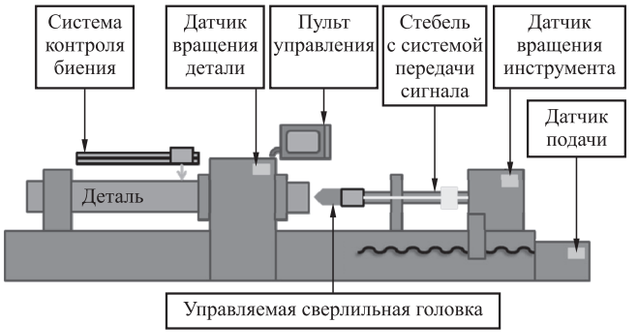

Рис. 1. Компоновочная схема станка глубокого сверления

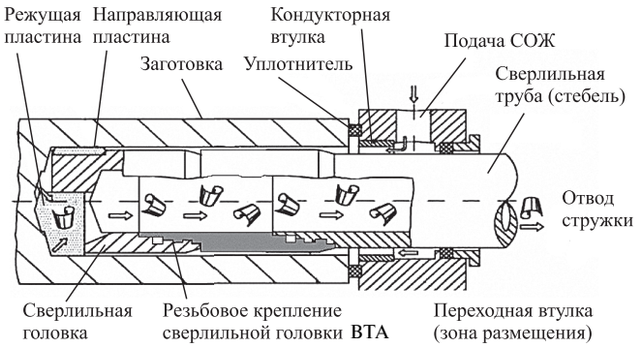

Рис. 2. Схема подачи СОЖ и отвода стружки

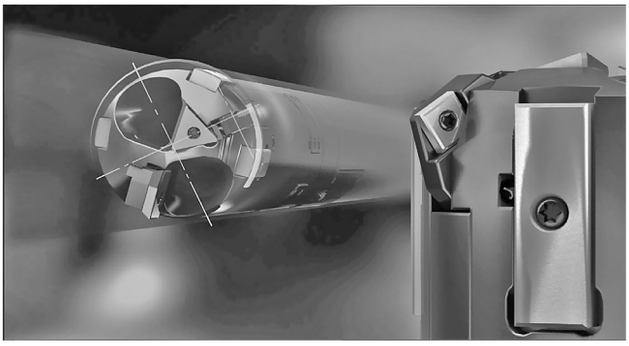

Рис. 3. Управляемая сверлильная головка

и стеблевых люнетов) и общая длина может превышать 15 м, то стебель делают сборным (обычно 2—4 секции). Секции соединяются резьбовыми соединениями, которые значительно ослабляют стебель и при проектировании требуют особого внимания.

Для реализации РУГУС использовалась управляемая сверлильная головка (УСГ), общий вид которой показан на рис. 3.

Рассмотрим структурную схему РУГУС (рис. 4). Для работы системы необходимо в режиме реального времени определить следующие параметры:

угловое положение детали — для определения радиального вектора смещения УСГ;

угловое положение УСГ — для определения точки начала и окончания цикла осевой коррекции;

линейное положение УСГ (глубина сверления) — для согласования сопровождения датчиков системы контроля толщины стенки и системы контроля биения наружной поверхности детали.

Данные параметры поступают в контроллер и служат исходными данными для подачи управляющего сигнала коррекции осевого положения УСГ в зависимости от поставленной задачи (режима работы). Контроллер определяет момент начала и завершения цикла коррекции, а также форму управляющего сигнала. Сформированный в контроллере сигнал поступает в преобразователь, выполняющий формирование электрического силового импульса, который поступает в УСГ по проложенной в стебле проводке. Для задания режимов работы РУГУС и слежения за параметрами процесса используется сенсорная ЖК панель оператора.

Оценивая структурную схему РУГУС, необходимо отметить сложность в реализации системы контроля радиального смещения сверла: для обеспечения режима «равностенность» (наиболее востребованная функция глубокого сверления) необходимо перемещать датчик контроля толщины стенки, сопровождая сверлильную головку. В качестве системы контроля толщины стенки выбран ультразвуковой толщиномер.

Прорабатывались два варианта размещения толщиномера, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Вариант № 1 — размещение ультразвукового толщиномера непосредственно в переходнике за инструментом (см. рис. 2).

Преимущества данного размещения в том, что упрощается система управления РУГУС за счёт исключения из неё подсистемы перемещения датчика по поверхности детали с функциями:

позиционирования относительно детали;

слежения за перемещением сверлильной головки (использования следящего привода);

подачи акустической контактной жидкости (использования дополнительного гидравлического насоса и т. п.).

Также отсутствует необходимость дополнительной обработки наружной поверхности заготовки для обеспечения акустического контакта (в отличие от варианта контроля толщины стенки снаружи).

Недостатком такого размещения является то, что на данный момент

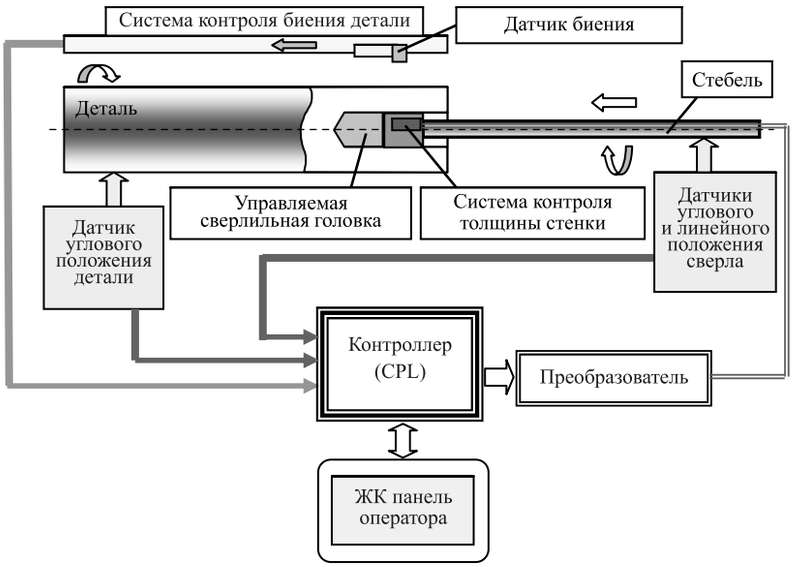

Рис. 4. Структурная схема РУГУС

отсутствуют ультразвуковые толщиномеры с габаритами, позволяющими вписаться в толщину стенки переходника, и работающие при требуемых эксплуатационных средах, давлениях и температурах.

Вариант № 2 — размещение ультразвукового толщиномера на линейной направляющей. Главное преимущество данного размещения в том, что имеется ультразвуковой толщиномер с требуемыми характеристиками. Недостатком размещения толщиномера является необходимость:

подготовки наружной поверхности заготовки для обеспечения акустического контакта толщиномера;

создания и изготовления системы линейного перемещения датчика толщиномера вдоль детали с функциями позиционирования, перемещения датчика толщиномера и системой слежения перемещения сверлильной головки.

Для обеспечения режима «прямолинейность» необходимо перемещать датчики контроля толщины стенки и биения наружной поверхности, сопровождая сверлильную головку. В данном режиме датчики замеряют значения соответствующих параметров в привязке к угловому положению заготовки при её вращении (рис. 5).

В качестве датчика контроля биения наружной поверхности выбран оптический датчик расстояния Leuze Electronic ODSL 9/D36-450-S12 (50...450 мм). Датчик устанавливается на каретке линейной направляющей, расположенной вдоль детали. Линейная направляющая имеет привод перемещения каретки, систему подвода электропитания датчика и съёма соответствующего сигнала датчика.

Дополнительно необходимо отметить, что РУГУС подразумевает использование специализированной управляемой сверлильной головки и специализированного стебля, необходимого для передачи электрических сигналов:

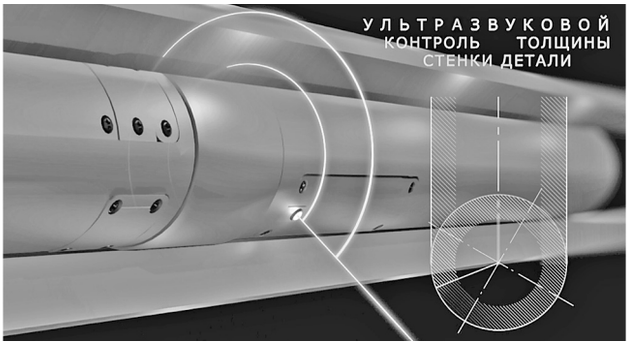

Рис. 5. Ультразвуковой контроль детали

управления отклонением сверлильной головки;

электропитания систем ультразвукового толщиномера (при использовании схемы размещения толщиномера по варианту № 1);

передачи результатов замеров толщины стенки в систему управления (при использовании схемы размещения толщиномера по варианту № 1).

Принимая во внимание то, что длина стебля должна быть больше глубины сверления на 4 м (добавляется зона размещения маслоприёмника и стеблевых люнетов) и, учитывая, что максимальная длина одной секции стебля равна 6 м, предлагается использовать стебель с общей длиной 12 м (2 секции). Это позволит сверлить отверстия глубиной 8 м с одной стороны и 16 м с двух сторон.

После скручивания секций стебля он становится неразборным. Данная длина неразъёмного стебля является оптимальной как для удобства обслуживания, так и для обеспечения надёжного размещения проводки при передаче электрических сигналов.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения работоспособности проведено опытное испытание функционирования УСГ с исходными данными:

схема сверления — вращение инструмента при неподвижной заготовке;

используемая заготовка — обточенный прокат, диаметр 136 мм, сталь 40ХГМА, длина 3 м;

используемый специальный инструмент — УСГ диаметром 80 мм;

скорость вращения УСГ n = 315 об/мин;

скорость подачи УСГ S = 0,05 мм/об;

выверка заготовки по биению заходного отверстия менее 0,1 мм;

используемая специальная оснастка — стебель с внутренним лейнером (с электропроводкой) и вращающимся электроконтактным устройством;

используемая аппаратура — блок микроконтроллера и преобразователь управления приводом УСГ в привязке к угловому положению инструмента.

Опробование, измерения и расчёты проводились по следующей методике. Проведено сверление заготовки:

на глубину 500 мм без режима отклонения УСГ;

с глубины 500 мм до 1500 мм режим максимального отклонения в горизонтальной плоскости в направлении т. 2 (рис. 6);

Ось	Точка измерения	Сечение, мм														
		+500			+1500			+2000			+2500			+3000		
		Биение	Толщина	Отклонение	Биение	Толщина	Отклонение	Биение	Толщина	Отклонение	Биение	Толщина	Отклонение	Биение	Толщина	Отклонение
Y	1	0,55	28,4	0,87	2,6	28	0,525	2	27,7	-0,5	1,5	28	0,06	0	27,1	−1,01
	3	0	27,2		1,95	27,6		2,6	28,1		1,57	27,8		0,11	29	
X	2	0,2	27,7	−0,43	4,8	31,1	5,6	4,9	31,9	6,35	3,18	31,2	4,74	0,11	30,4	2,45
	4	0,36	28,4		0	24,7		0	24,1		0	24,9		0	25,6	

с глубины 1500 до 3000 мм режим максимального отклонения в горизонтальной плоскости в направлении т. 4 (см. рис. 6).

Проведены измерения биения наружной поверхности детали и толщин стенки трубы в точках *1—4* (см. рис. 6) в сечениях +500, +1500, +2000, +2500, +3000 мм.

По измеренным значениям выполнены расчёты отклонений оси отверстия от оси вращения детали:

$$\Delta Y = ((Б_1 + T_1) - (Б_3 + T_3))/2;$$

$$\Delta X = ((Б_2 + T_2) - (Б_4 + T_4))/2,$$

где ΔY, ΔX — отклонения по соответствующим осям; $Б_i$ — биение наружной поверхности в соответствующей точке окружности; T_i — толщина стенки в соответствующей точке.

Результаты замеров биения и вычисления отклонений оси отверстий представлены в таблице.

На основании табличных данных построены зависимости отклонения оси просверленного отверстия от оси вращения по плоскостям (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что при включении коррекции УСГ в направлении т. 2 на глубинах сверления от +500 до +2000 мм происходит смещение оси отверстия от −0,43 до +6,35 мм. При включении коррекции в противоположную сторону происходит уменьшение отклонения с величины +6,35 до +2,45 мм.

Выводы. Таким образом, на основании проведённого эксперимента можно сделать вывод о том, что УСГ позволяет корректировать ось отверстия непосредственно в процессе сверления.

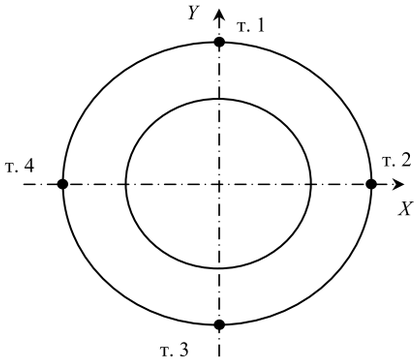

Рис. 6. Вид на торец детали со стороны стеблевой бабки

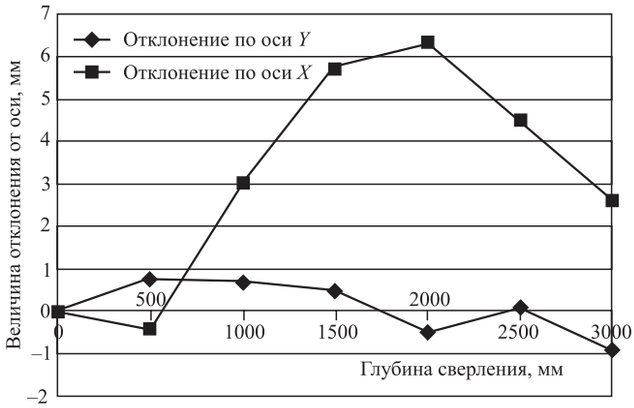

Рис. 7. Зависимости отклонения оси просверленного отверстия от оси вращения по плоскостям

Библиографические ссылки

1. **Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И., Плужников С.К. и др.** Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.

2. **Троицкий Н.Д.** Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 176 с.

3. **Горелова А.Ю., Плешаков А.А., Кристаль М.Т.** Методы повышения точности обработки глубоких отверстий. Изд-во ТулГУ. Вып. 7. Ч. 2. 2013. С. 363—370.

УДК 681.513

Кай Шэнь, М.С. Селезнева
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
shenkaichn@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО КРИТЕРИЯ СТЕПЕНИ НАБЛЮДАЕМОСТИ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Исследованы критерии степени наблюдаемости и управляемости нелинейных систем, выявлены их недостатки. Представлен численный критерий степени наблюдаемости конкретных переменных состояния нелинейных систем, базирующийся на SDC-представлении нелинейной модели. Применение разработанного критерия продемонстрировано на примере определения качества наблюдения погрешностей инерциальных навигационных систем.

Ключевые слова: нелинейная система; SDC-представление; критерий степени наблюдаемости; качество наблюдения; навигационная система.

The criteria for the observability degree and controllability of nonlinear systems are investigated, and their shortcomings are revealed. A numerical criterion for the observability degree of specific variables of the nonlinear systems state based on the nonlinear model SDC representation is presented. The application of the developed criterion is demonstrated by the example of determining the quality of observing errors in inertial navigation systems.

Keywords: nonlinear system; SDC representation; observability degree criterion; quality of observations; navigation system.

Введение. В теории систем управления существенное значение имеет задача определения наблюдаемости при исследовании свойств динамических объектов. Известны критерии наблюдаемости [1, 2], которые позволяют определить, какие из компонент одного вектора состояния наблюдаются лучше по сравнению с другими компонентами этого вектора состояния, что даёт только относительную оценку компонентов конкретного вектора состояния исследуемой системы. Поэтому они неудобны для использования при сравнении качества наблюдения в общем случае.

Обычно в практических приложениях необходимо знать возможность эффективного наблюдения каждой конкретной компонентой вектора состояния. Для этого введено понятие меры или степени наблюдаемости [3, 4] каждой конкретной переменной состояния. В работе [5] предложен критерий степени наблюдаемости с помощью анализа взаимосвязей значения ошибок оценивания переменных вектора состояния и ошибок наблюдения (измерения). В работе [6] доказано, что собственные числа и собственные векторы ковариационной матрицы ошибок оценивания могут предоставить полезную информацию о наблюдаемости системы. С точки зрения точности оценивания степень наблюдаемости может определяться соотношением дисперсии произвольной компоненты вектора состояния и дисперсии непосредственно измеряемого вектора состояния [7]. Известные критерии степени наблюдаемости переменных состояния рассмотрены в линейной постановке задачи. Для определения степени наблюдаемости конкретных переменных состояния нелинейных систем необходимо разработать новый численный критерий степени наблюдаемости.

Возможность применения критерия степени наблюдаемости продемонстрирована на примере определения качественных характеристик при оценивании погрешностей инерциальной навигационной системы (ИНС). Исследованы нелинейные уравнения погрешностей ИНС, определены степени наблюдаемости переменных состояния с использованием данных полунатурного эксперимента, которая используется для вычисления навигационных определений летательных аппаратов (ЛА).

Критерии наблюдаемости нелинейных систем. Пусть модель погрешностей ИНС опи-

сывается векторным дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned}&\frac{d}{dt}x(t) = f(t,x) + g(t,x)w(t), x(t_0) = x_0;\\&y(t) = h(t,x) + v(t);\\&f,\ g: T\times\Omega_x \to R^n,\ h: T\times\Omega_x \to R^m;\\&(t,x) \to f(t,x),\ g(t,x),\ h(t,x),\end{aligned} \tag{1}$$

где T — интервал $[t_0, t_1]$; $x(t) \in \Omega_x$; Ω_x — область (открытое связанное множество) R^n, содержащая начало; $x \in R^n$ — состояние системы; $x_0 \in \Omega_x$; $w \in R^n$ — входное возмущение; $y \in R^m$, $m \leqslant n$ — измерение системы; $v \in R^m$ — измерительный шум; матрицы $f(t, x)$, $g(t, x)$, $h(t, x)$ действительны и непрерывны.

Представим систему (1) в эквивалентном виде: модель имеет структуру линейных дифференциальных уравнений с параметрами, которые зависят от состояния. Такое представление называют «расширенной линеаризацией» или «параметризацией состоянием системы» (State Dependent Coefficient, SDC-представлением) [8]. Преобразованные с помощью метода SDC-представления уравнения (1) имеют вид

$$\begin{aligned}&\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t,\mathbf{x})\mathbf{w}(t),\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0;\\&\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t),\end{aligned} \tag{2}$$

где $\mathbf{A}(\cdot)$, $\mathbf{G}(\cdot)$, $\mathbf{H}(\cdot)$ — матрицы действительных переменных.

SDC-представление нелинейной системы (2) является наблюдаемым в области $T \times \Omega_x$, если пара $\langle \mathbf{A}(t, \mathbf{x})\ \mathbf{H}(t, \mathbf{x})\rangle$ наблюдаема в линейном смысле [9] для $(t, \mathbf{x}) \in T \times \Omega_x$, т. е.

$$\begin{aligned}\operatorname{rank}[\mathbf{O}(t,\mathbf{x})] = \operatorname{rank}[&\mathbf{H}^T(t,\mathbf{x}), \mathbf{H}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{A}^T(t,\mathbf{x}), \ldots,\\&\ldots, \mathbf{H}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{A}^T(t,\mathbf{x})^{n-1}] = n.\end{aligned} \tag{3}$$

Это означает, что существует положительно определённая матрица $\mathbf{\Gamma}(t, \mathbf{x})$ (грамиан наблюдаемости) для всех $(t, \mathbf{x}) \in T \times \Omega_x$, являющаяся решением уравнения Ляпунова:

$$\begin{aligned}&\mathbf{A}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{\Gamma}(t,\mathbf{x}) + \mathbf{\Gamma}(t,\mathbf{x})\mathbf{A}(t,\mathbf{x}) +\\&+ \mathbf{H}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{H}(t,\mathbf{x}) = 0.\end{aligned} \tag{4}$$

Приведённый критерий аналогичен критерию наблюдаемости Калмана [1] для линейных стационарных систем.

Следует отметить, что задачи исследования наблюдаемости систем вида (2), т. е. систем с параметрами, зависящими от состояния, общего конструктивного решения в настоящее время не имеют. При исследовании подобных систем можно ограничиться проверкой выполнения условий наблюдаемости «поточечно», т. е. для линеаризованной системы в окрестности исследуемого состояния.

На практике для удобства обработки информации часто используется дискретная форма системы, в которой SDC-представление нелинейной системы (2) имеет вид

$$\begin{aligned}&\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{G}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k;\\&\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_{k+1}.\end{aligned} \tag{5}$$

Предполагается, что $\mathbf{w}_k$ и $\mathbf{v}_{k+1}$ являются гауссовскими «белыми» некоррелированными шумами, причём для любых j и k, v_j и w_k некоррелированы между собой (т. е. $M\left[\mathbf{v}_j\mathbf{w}_k^T\right] = 0$).

Выражение измерения y_{k+1} для вектора состояния, используя n проведённых измерений, имеет вид

$$\begin{aligned}&\mathbf{y}_k = \mathbf{H}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k;\\&\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k +\\&+\mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1};\\&\ldots\quad\ldots\quad\ldots\\&\mathbf{y}_{k+n-1} = \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2},\mathbf{x}_{k+n-2})\cdots\\&\cdots\mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2},\mathbf{x}_{k+n-2})\cdots\\&\cdots\mathbf{\Phi}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \cdots\\&\cdots + \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1}.\end{aligned} \tag{6}$$

Или в матричной форме

$$\mathbf{y}_k^* = \mathbf{O}_k^*\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k^*, \tag{7}$$

где $\mathbf{y}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{y}_k\\ \mathbf{y}_{k+1}\\ \vdots\\ \mathbf{y}_{k+n-1}\end{bmatrix}$;

$$\mathbf{O}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{H}(t_k,\mathbf{x}_k)\\ \mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\\ \ldots\quad\ldots\quad\ldots\\ \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2},\mathbf{x}_{k+n-2})\cdots\mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{v}_k\\ \mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1}\\ \ldots\quad\ldots\quad\ldots\\ \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2},\mathbf{x}_{k+n-2})\cdots\\ \cdots\mathbf{\Phi}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \cdots\\ \cdots + \mathbf{H}(t_{k+n-1},\mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1}\end{bmatrix};$$

векторы $\mathbf{y}_k^*$, $\mathbf{v}_k^*$ и матрица $\mathbf{O}_k^*$ включают параметры, которые зависят от состояния.

Матрица $\mathbf{O}_k^*$ в формуле (7) для нелинейных объектов является матрицей наблюдаемости. В соответствии с критерием (3), система (5) является наблюдаемой, если $\operatorname{rank}\left[\mathbf{O}_k^*\right] = n$, т. е. все столбцы в матрице $\mathbf{O}_k^*$ являются линейно независимыми.

Численный критерии наблюдаемости нелинейных систем. Критерии степени наблюдаемости [7, 10] предполагают анализ объектов, описываемых линейными стационарными и нестационарными уравнениями. Однако часто встречаются случаи, когда анализу подлежат уравнения, имеющие явно выраженный нелинейный характер. В этом случае для определения степеней наблюдаемости компонент вектора состояния нелинейных систем можно модифицировать известные критерии.

С учётом уравнения (6), получим

$$\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{y}_k^* = \mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\mathbf{x}_k + \mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{v}_k^*, \qquad (8)$$

и тогда уравнение (8) будет иметь вид

$$\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\mathbf{x}_k = \mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{y}_k^* - \mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{v}_k^*. \qquad (9)$$

Когда SDC-представление нелинейной системы (2) является наблюдаемым, ранг матрицы наблюдаемости $\mathbf{O}_k^*$ равен порядку системы n, тогда ранг матрицы $\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*$ размерности $n \times n$ также равен порядку системы n, и, соответственно, матрица $\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*$ является обратимой. В этом случае получим

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_k = &\left[\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\right]^{-1}\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{y}_k^* - \\ &-\left[\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\right]^{-1}\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{v}_k^*.\end{aligned} \qquad (10)$$

Введём обозначение

$$\boldsymbol{\zeta}_k = \mathbf{O}_k^+\mathbf{y}_k^*, \qquad (11)$$

где $\mathbf{O}_k^+ = \left[\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\right]^{-1}\mathbf{O}_k^{*T}$ — псевдообратная матрица $\mathbf{O}_k^*$.

Следует отметить, что матрица $\mathbf{O}_k^+$ также является матрицей с параметрами, зависящими от состояния.

В практических приложениях часто необходимо определять степени наблюдаемости конкретных переменных состояния в процессе функционирования динамического объекта. Поэтому предполагаем, что вычислить степень наблюдаемости компонент вектора состояния системы можно учитывая только одно сформированное измерение (6), состоящее из измерений на n подтактах.

В скалярной форме уравнение (11) имеет вид

$$\zeta_k^i = \alpha_1^i y_k + \alpha_2^i y_{k+1} + \cdots + \alpha_n^i y_{k+n-1}, \qquad (12)$$

где ζ_k^i — i-й элемент вектора $\mathbf{y}_k^*$; $\alpha_j^i, j = 1, \ldots, n$ — i-я строка матрицы $\mathbf{O}_k^+$.

Для остальных компонент вектора состояния уравнения измерений формируются в соответствии с уравнением (12):

$$\upsilon_k^i = \alpha_1^i v_k + \alpha_2^i v_{k+1} + \cdots + \alpha_n^i v_{k+n-1}. \qquad (13)$$

Соответственно, дисперсия измерительного шума, приведённого к i-й компоненте υ_k^i, имеет вид

$$\begin{aligned}\Upsilon_k^i &= M\left[\left(\upsilon_k^i\right)^2\right] = \\ &= \left[\left(\alpha_1^i\right)^2 + \left(\alpha_2^i\right)^2 + \cdots + \left(\alpha_n^i\right)^2\right] r_k,\end{aligned} \qquad (14)$$

где $r_k = M\left[v_k^2\right]$ — дисперсия исходного измерительного шума v_k.

Для того чтобы разработать критерий степени наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем, воспользуемся структурой критерия [10] для линейных систем.

Численный критерий степени наблюдаемости [10] для нелинейных систем имеет вид

$$\Lambda_k^i = \frac{M\left[\left(x_k^i\right)^2\right] r_k}{M\left[\left(\zeta_k^i\right)^2\right]\Upsilon_k^i} = \frac{M\left[\left(x_k^i\right)^2\right]}{M\left[\left(\zeta_k^i\right)^2\right]\sum_{j=1}^{n}\left(\alpha_j^i\right)^2}, \qquad (15)$$

где $M\left[\left(x_k^i\right)^2\right]$ — дисперсия произвольной i-й компоненты вектора состояния; $M\left[\left(\zeta_k^i\right)^2\right]$ — дисперсия приведённой измеряемой i-й компоненты вектора измерений.

Отметим, что при исследовании подобных нелинейных систем нужно вычислять степени наблюдаемости «пошагово» [9], так как необходимо учитывать влияние параметров, которые зависят от состояния, на векторы $\mathbf{y}_k^*$, $\mathbf{v}_k^*$ и матрицу $\mathbf{O}_k^+$.

Модели погрешностей инерциальной навигационной системы. Уравнения погрешностей ИНС представляют собой уравнения ошибок

ориентации и уравнения погрешностей горизонтальных акселерометров. Рассмотрим модельный пример, который имеет вид [11]

$$\begin{aligned} \delta\dot{V} &= -g\psi + B; \\ \dot{\psi} &= \frac{\delta V}{R} - \frac{\delta V}{R}\psi + \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon} &= -\mu\varepsilon + \eta, \end{aligned} \qquad (16)$$

где δV — погрешность в определении скорости; ψ — угол отклонения гиростабилизированной платформы (ГСП); ε — скорость дрейфа ГСП; η — марковский случайный процесс; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести.

Уравнения (16) в матричной форме имеют вид

$$\dot{x}(t) = f\left(t, x(t)\right) + w(t), \qquad (17)$$

где $x(t) = \begin{bmatrix} \delta V \\ \psi \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$; $f(t,x) = \begin{bmatrix} -gx_2 \\ \dfrac{x_1}{R} + \dfrac{x_1 x_2}{R} + x_3 \\ -\mu x_3 \end{bmatrix}$;

$w(t) = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \eta \end{bmatrix}$.

В соответствии с уравнением (2) получим SDC-представление уравнения (17)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\left(t, \mathbf{x}\right)\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t), \qquad (18)$$

где $\mathbf{A}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -g & 0 \\ \dfrac{1}{R} & \dfrac{x_1}{R} & 1 \\ 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$.

В дискретной форме SDC-представление нелинейной системы (18) имеет вид

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi}_{k+1,\,k}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \qquad (19)$$

где $\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ x_{3,k} \end{bmatrix}$; $\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} B_k \\ 0 \\ \eta_k \end{bmatrix}$;

$\mathbf{\Phi}_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & -Tg_k & 0 \\ \dfrac{T}{R_k} & 1 + \dfrac{Tx_{1,k}}{R_k} & T \\ 0 & 0 & 1 - T\mu \end{bmatrix}$; T — период дискретизации.

Моделирование по данным лабораторного эксперимента. В процессе функционирования

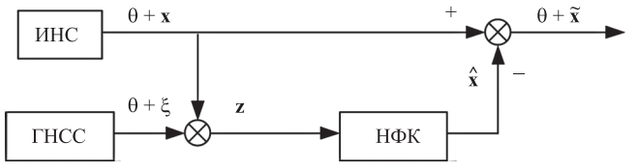

Рис. 1. Схема коррекции ИНС с внешним источником информации ГНСС:
θ — истинная навигационная информация; ξ — вектор погрешностей ГНСС; $\mathbf{x}$ — вектор погрешностей ИНС; $\mathbf{z}$ — вектор измерений; $\hat{\mathbf{x}}$ — оценка вектора погрешностей ИНС; $\tilde{\mathbf{x}}$ — ошибки оценивания погрешностей ИНС

ЛА погрешности ИНС могут достигать значительных величин. Компенсацию погрешностей ИНС осуществляют алгоритмическим путём [12, 13]. Рассматривается задача оценивания углов отклонения и дрейфов ГСП ИНС ЛА. Наиболее распространёнными являются ИНС, корректируемые от внешних источников информации — глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для компенсации погрешностей в выходной информации необходимо предварительно оценить ошибки ИНС. Имея информацию об ошибках в определении скорости ИНС и ГНСС, можно оценить углы отклонения и дрейфы ГСП с помощью алгоритмов оценивания. В качестве алгоритмов оценивания используется, например, нелинейный фильтр Калмана (НФК) или его модификации [14]. Схема коррекции ИНС от системы ГНСС представлена на рис. 1.

Тогда уравнение измерения имеет вид

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \qquad (20)$$

где $\mathbf{z}_{k+1} = V_{k+1}^{\text{ИНС}} - V_{k+1}^{\text{ГНСС}} = \delta V_{k+1} + v_{k+1}^{\text{ГНСС}}$; $\mathbf{v}_{k+1} = v_{k+1}^{\text{ГНСС}}$ — марковская случайная величина; $\mathbf{H}_{k+1} = [1\ 0\ 0]$.

В соответствии с уравнением (7) получим матрицу наблюдаемости:

$$\mathbf{O}_k^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -Tg_k & 0 \\ 1 - \dfrac{T^2 g_{k+1}}{R_k} & -Tg_k - Tg_{k+1} - \dfrac{T^2 g_{k+1} x_{1,k}}{R_k} & -T^2 g_{k+1} \end{bmatrix}. \qquad (21)$$

Для моделирования использованы данные полунатурного эксперимента с реальной ИНС Ц-060, установленной на неподвижном основании. Выходные сигналы ИНС являются

ошибками в определении скорости и использованы в качестве измерений для алгоритма оценивания. Моделирование по данным лабораторного эксперимента проводилось с использованием НФК. Результаты моделирования представлены на рис. 2—4.

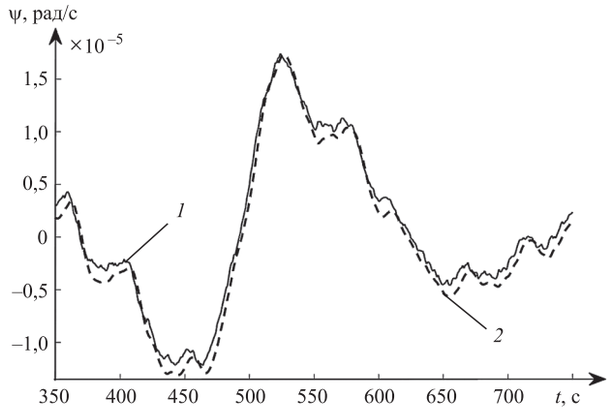

Рис. 2. Результат оценивания углов отклонения ГСП: *1* — углы отклонения ГСП реальной системы ИНС; *2* — оценки углов отклонения ГСП

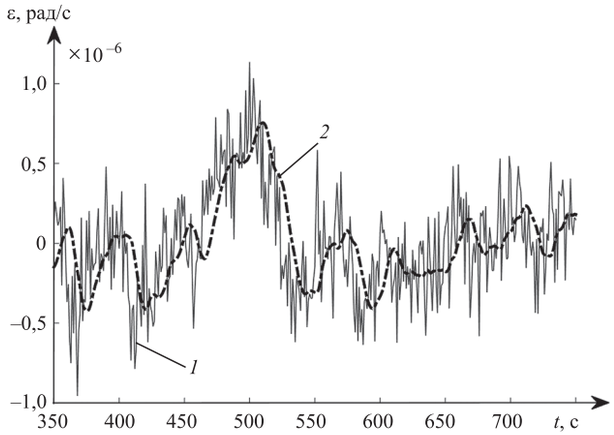

Рис. 3. Результат оценивания скорости дрейфа ГСП: *1* — скорость дрейфа реальной системы ИНС; *2* — оценки скорости дрейфа ГСП

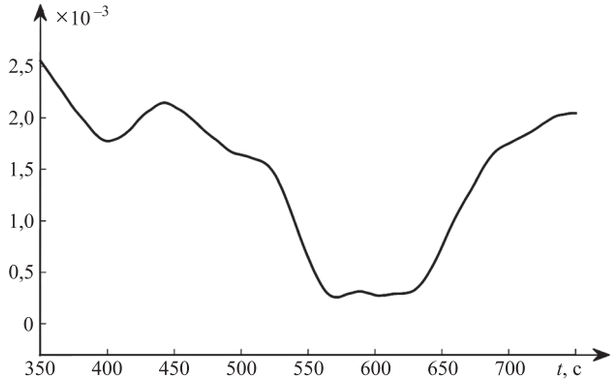

Рис. 4. Степени наблюдаемости углов отклонения ГСП

Численные значения степени наблюдаемости изменяются с течением времени, так как зависят от оцениваемого номинала исследуемой переменной состояния и параметров модели. Полученные численные значения согласуются с данными анализа степеней наблюдаемости переменных состояния линейных моделей погрешностей ИНС.

Выводы. Таким образом, для определения качественных характеристик наблюдаемости переменных состояния нелинейных систем предложен оригинальный численный критерий. В основу разработанного критерия положены SDC-представление нелинейной модели и структура известного критерия степени наблюдаемости переменных состояния линейных систем. Применение критерия продемонстрировано на примере анализа степени наблюдаемости погрешностей ИНС с использованием данных полунатурного моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-8-00522) и the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities in P.R. China («Программа 111», No. B 16025).

Библиографические ссылки

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

2. **Брандин В.Н., Разоренов Г.Н.** Об условиях наблюдаемости нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1973. № 9. С. 5—11.

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

4. **Shen Kai, Neusypin K.A., Proletarsky A.V.** On State Estimation of Dynamic Systems by Applying Scalar Estimation Algorithms // Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. August 8—10, 2014. Yantai, China. P. 124—129.

5. **Ablin H.L.** Criteria for degree of observability in a control system // Retrospective Theses and Dissertations. Paper 3188. Iowa State University, 1967. P. 74.

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

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

8. **James R.C., Christopher N.D., Curtis P.M.** Nonlinear Regulation and Nonlinear H∞ Control Via theState-Dependent Riccati Equation Technique: Part 1, Theory // Proceedings of The first International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace. 1996. Daytona Beach, FL USA. P. 117—141.

9. **Афанасьев В.Н.** Управление нелинейными неопределёнными динамическими объектами. М.: Либроком/URSS, 2015. 224 с.

10. **Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Критерий степени наблюдаемости переменных состояния нестационарных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 6. С. 10—16.

11. **Рогалев А.П., Бабиченко А.В.** Методы и алгоритмы интеграции данных инерциально-спутниковых навигационных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 4. С. 9—24.

12. **Селезнева М.С., Шэнь Кай, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 2—8.

13. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.

14. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пролетарский,** д-р техн. наук, проф., **Чжо Зин Хтут**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

РЕДУЦИРОВАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрен прицельно-навигационный комплекс современного маневренного летательного аппарата. Исследована задача контроля работоспособности и качества функционирования прицельно-навигационного комплекса. Разработана система контроля на базе динамической экспертной системы и теории функциональных систем П.К. Анохина. Предложена структура редуцированной динамической экспертной системы с интеллектуальной компонентой, в качестве которой использован акцептор действия, включающий алгоритмы оценивания, построения моделей, прогнозирования и сравнения результата.

Ключевые слова: прицельно-навигационный комплекс; контроль; динамическая экспертная система; ключевые параметры; интеллектуальная компонента; оценка; прогноз.

The sight-navigation complex of a modern maneuverable aircraft is considered. The task of monitoring the operability and functioning quality of the sight-navigation complex is investigated. A control system based on the dynamic expert system and the functional systems theory from P.K. Anokhin was developed. A structure of a reduced dynamic expert system with an intellectual component is proposed. As a component an action acceptor is used, that includes algorithms for estimating, constructing models, predicting and comparing the result.

Keywords: sight-navigation complex; control; dynamic expert system; key parameters; intellectual component; valuation; forecast.

Введение. Эффективность применения современных высокоманевренных летательных аппаратов (ЛА) определяется не только их лётно-техническими характеристиками и вооружением, но и возможностями бортового оборудования по информационному обеспечению боевых действий, управлению оружием и защите ЛА [1].

Интеграция бортового оборудования способствовала появлению на борту ЛА прицельно-навигационных комплексов (ПНК), являющихся основой бортового оборудования.

Измерительные системы ПНК имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Для компенсации погрешностей используются известные алгоритмические методы [2], а также возможности реконфигурирования структуры и адаптации к внешним условиям и внутреннему состоянию ПНК.

В состав ПНК ЛА входят базовые автономные навигационные системы, в частности инерциальные навигационные системы (ИНС), спутниковые навигационные системы,

радионавигационные, геофизические и оптические системы, БЦВМ, а также комплексная обработка информации (КОИ). Одной из важных задач при эксплуатации ПНК ЛА является сохранение его работоспособности и высокой эффективности. Для определения работоспособности и качества функционирования ПНК применяются различные системы контроля [3].

Системы контроля. Обычно контроль осуществляется по количественному или альтернативному признакам.

Контроль по количественному признаку заключается в определении с требуемой точностью фактических значений контролируемого параметра динамического объекта, которые необходимы для последующего вычисления статистических характеристик, позволяющих принимать решение о состоянии исследуемого объекта.

Контроль по альтернативному признаку заключается в определении соответствия контролируемого параметра установленным требованиям. При таком контроле не требуется знать фактическое значение контролируемого параметра, а достаточно установить лишь факт соответствия или несоответствия его установленным требованиям.

Условия функционирования современных ЛА отличаются высокими скоростями, большими высотами и дальностями полёта, действием разнообразных и многочисленных внешних факторов. Вместе с тем требования к точности и надёжности навигационного оборудования возрастают. Условия, в которых используется бортовое навигационное оборудование, накладывают жёсткие ограничения на физические, технические и эксплуатационные характеристики систем. Одной из важнейших задач при эксплуатации бортового оборудования ЛА является контроль состояния аппаратуры комплекса, диагностика её отказов и управление работой всей аппаратуры в соответствии как с её состоянием, так и с изменяющимися внешними условиями.

Для этого применяются разнообразные системы контроля на различных этапах эксплуатации ПНК. Автоматизированные бортовые системы контроля включают встроенные средства инструментального контроля и системы информационного контроля, общесамолётные системы контроля бортового оборудования и др. Также используются иерархические системы средств контроля, хорошо зарекомендовавшие себя на практике и позволяющие оценивать работоспособность и достоверность информации отдельных систем и комплекса бортового оборудования в целом. Однако при решении задачи контроля бортового оборудования целесообразно знать не только момент отказа бортовых систем, но и предвидеть момент возникновения аварийной ситуации, а также интервалы недостоверной работы оборудования. Решение этой задачи с помощью априорных прогнозирующих моделей требует проведения длительных дорогостоящих экспериментов, не позволяет учитывать особенности конкретных систем и осуществлять эффективный контроль высокоманевренных ЛА. Поэтому для контроля бортового оборудования перспективных маневренных ЛА целесообразно использовать комплексные системы контроля на базе динамических экспертных систем (ДЭС), которые позволяют учитывать режимы полёта ЛА, имеют большую базу данных и ансамбль оценочных критериев. Ниже предложена структура простой ДЭС с интеллектуальной компонентой, в качестве которой использован акцептор действия, сформированный в соответствии с теорией функциональных систем П.К. Анохина [4].

Состав ПНК для конкретного типа ЛА определяется функциональными требованиями и задачами, которые должен решать ЛА. В общем случае в состав ПНК входят: резервированные платформенные ИНС, бесплатформенные ИНС и курсовертикали; аэрометрические датчики и системы — система воздушных сигналов (СВС), датчики углов атаки и скольжения (ДУАС); радионавигационные системы — радиосистема ближней навигации (РСБН), допплеровский измеритель скорости и угла сноса (ДИСС), спутниковая навигационная система (СНС), радиовысотомеры (РВ); обзорно-прицельные средства — оптико-локационная система (ОЛС), радиолокационая система (РЛС), система управления оружием (СУО); информационно-управляющее поле кабины (ИУП) — совокупность устройств управления и ввода информации (УВИ) и систем отображения информации (СОИ); интегрированная вычислительная среда комплекса (ИВС), которая содержит одну или несколько БЦВМ; другие системы специального назначения.

В состав ИВС в общем случае входит бортовая графическая станция (БГС) и резервированные вычислители.

Решение навигационных и прицельных задач ЛА обеспечивается комплексной обработкой информации всех измерительных

систем комплекса. Базовой навигационной системой является ИНС, а в качестве дополнительных источников информации используются СНС, РЛС, РСБН, ДИСС и др. В свою очередь ДИСС и РСБН сами корректируются с помощью информации от СНС [5].

Датчики информации, входящие в ПНК, осуществляют измерение и первичную обработку исходных данных, а общие задачи интегральной обработки решаются в БЦВМ.

Система алгоритмов КОИ ПНК имеет пятиуровневую структуру. Фрагмент КОИ ПНК включает ИНС, ДИСС, СВС, РВ, РСБН, РСДН, ОЛС, РЛС, ОВК, СНС, каналы межбортового обмена данными, а также вычислительную среду.

Модификация моделей алгоритмов КОИ. В современных КОИ ПНК для обеспечения высокого качества формируемой информации используется априорная структурная адаптация, под которой понимается выбор наилучшей конфигурации оцениваемой части полного вектора состояния, а также матриц модели исследуемой системы для конкретных условий [6, 7]. Адаптация осуществляется с помощью ковариационного анализа на основе минимаксного критерия качества.

Для эффективного выделения динамических составляющих часто требуются дорогостоящие и трудоёмкие лётные эксперименты. Например, для достоверного выделения компонент динамического дрейфа необходимо большое количество лётных экспериментов.

Для использования в системе контроля целесообразно формировать редуцированный вектор состояния с использованием концепции системного синтеза [8, 9], в соответствии с которой необходимо рациональное сокращение количества параметров модели, характеризующих исследуемый объект. Такое сокращение возможно при использовании различных критериев, например, выделяя переменные с различными темпами изменения. Обычно выделяют «медленные», «нормальные» и «быстрые» переменные [4]. При изменении ситуации обрабатывается информация следующим образом: медленные переменные заменяются константами, быстрые переменные — их осреднёнными значениями. Если быстрые переменные существенно не влияют на описание процесса, то их исключают из вектора состояния модели.

Из вектора состояния моделей выделяются ключевые параметры с помощью общих и специальных критериев [10]. Общие критерии являются универсальными, а специальные, как правило, определяют качество исследуемого процесса на основе каких-либо физических характеристик, присущих анализируемому процессу.

Далее в зависимости от режима функционирования ЛА формируются различные виды моделей. Например, для режима интенсивного маневрирования отбираются параметры, имеющие максимальные степени наблюдаемости и управляемости [11], что позволяет отбирать для осуществления контроля ПНК только эффективно управляемые и достоверно оцениваемые параметры.

В процессе функционирования ПНК состав редуцированного вектора состояния модели может изменяться. Компоненты редуцированного вектора состояния, подлежащие контролю, выбираются на основе анализа качественных характеристик каждой компоненты, которые зависят от режима полёта ЛА, внешних возмущений, собственного состояния ПНК, а также возможностей непосредственного измерения с помощью имеющихся средств. Обычно в вектор состояния для осуществления контроля включают параметры, характеризующие работоспособность ПНК. Но в редуцированном векторе состояния используется только часть вектора состояния — ключевые параметры: непосредственно измеряемые и эффективно наблюдаемые компоненты.

Разработка редуцированной динамической экспертной системы для контроля бортового оборудования. Для осуществления всеобъемлющего контроля бортового оборудования целесообразно использовать концепции, заложенные в ДЭС и интеллектуальные технологии. В качестве интеллектуальной технологии используются алгоритмы акцептора действия. Реализация функции контроля в ДЭС предполагает её модификацию для уменьшения объёма памяти БЦВМ.

Известна структура системы управления с интеллектуальной компонентой, построенная на основе теории функциональных систем и предусматривающая построение прогнозирующих моделей состояния объекта управления и моделей внешней среды [4]. Построив модели внешней среды функционирования ПНК ЛА, возможно разработать сценарии управления на длительные интервалы времени его функционирования. Сценарии управления предполагают реконфигурирование оборудования ЛА. Функциональная схема системы контроля ПНК ЛА с учётом различных моде-

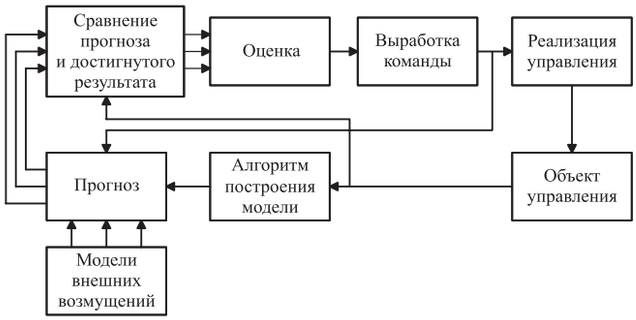

Рис. 1. Функциональная схема системы контроля с учётом моделей внешней среды

лей изменения внешней среды представлена на рис. 1.

В приведённой на рис. 1 системе контроля в блоке прогноза осуществляется прогнозирование ключевых переменных состояния ПНК ЛА с учётом различных моделей изменения внешней среды его функционирования. Далее прогноз состояния ПНК сравнивается с критическими значениями его состояния, которые определяются в зависимости от режима полёта ЛА.

Функциональная схема, приведённая на рис. 1, использована при синтезе редуцированной ДЭС ЛА.

Структура редуцированной ДЭС с интеллектуальной компонентой представлена на рис. 2.

ДЭС ЛА работает на основе информации БД и БЗ. Информация о результатах функционирования ПНК ЛА поступает в БД, где выполняется первоначальная обработка данных для эффективного построения моделей, выявление и отсеивание аномальных измерений, формирование измерений в выборках и т. д. В БД информация сохраняется в упорядоченной форме в двух частях памяти — долгосрочной и краткосрочной. В долгосрочной памяти сохраняются шаблоны, т. е. совокупность данных, соответствующих чётко обусловленному режиму функционирования ЛА, и прогнозирующие модели, используемые для конкретных условий полёта. В краткосрочной памяти сохраняются все динамические данные, которые оперативно обновляются при поступлении новых измерений.

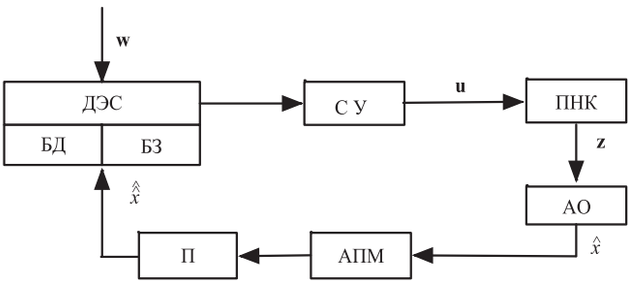

Рис. 2. Структура редуцированной ДЭС с интеллектуальной компонентой:

СУ — система управления; АО — алгоритм оценивания; АПМ — алгоритм построения моделей; П — алгоритм прогноза; БД — база данных; БЗ — база знаний; **w** — вектор внешних возмущений; **u** — вектор управления; **z** — вектор измерений; $\hat{x}$ — оценка редуцированного вектора состояния ПНК; $\hat{\hat{x}}$ — редуцированный вектор прогнозных значений состояния ПНК

Предварительно обработанные в ПНК выборки поступают в акцептор действия, где происходят оценивание ключевых параметров ПНК, построение прогнозирующих моделей и прогноз его состояния, а также сличение результатов прогноза с реальными результатами действия.

Ключевые параметры ПНК ЛА оцениваются с помощью алгоритма оценивания, например фильтра Калмана. Для получения нерасходящихся оценок в практических приложениях используют различные адаптивные модификации фильтра Калмана [4]. В качестве алгоритма построения прогнозирующих моделей используются нейронные сети, алгоритмы самоорганизации и генетические алгоритмы [12, 13].

Полученные прогнозирующие модели для данной конкретной ситуации применяются для получения прогнозных значений ключевых параметров ПНК. Результаты прогноза поступают в БС, где сравниваются со значениями, установленными для выполняемого режима функционирования ЛА. Также прогнозными значениями ключевых параметров ПНК пополняются БД ДЭС, информация с которых о будущих нарушениях функционирования ПНК передаётся в СУ для формирования управляющего воздействия на ПНК.

Выводы. Представлены ПНК современных маневренных ЛА и методы контроля работоспособности и диагностики его состояния. Разработана ДЭС с интеллектуальной компонентой, сформированной на основе теории функциональных систем П.К. Анохина. В качестве интеллектуальной компоненты применён акцептор действия. Предложена структура редуцированной ДЭС, в которой использованы прогнозирующие модели контролируемых ключевых параметров. Редуцированный вектор состояния сформирован на основе концепции системного синтеза и эволюционных алгоритмов построения моделей.

Библиографические ссылки

1. **Агеев В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.
2. **Бабиченко А.В., Орехов М.И., Рогалев А.П.** Основы построения системы комплексной обработки информации в интегрированных комплексах бортового оборудования перспективных многофункциональных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 2. С. 43—49.
3. **Неусыпин К.А.** Методы контроля технического состояния навигационного комплекса // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 7. С. 24—27.
4. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: МГОУ, 2009. 500 с.
5. **Рогалев А.П., Бабиченко А.В.** Методы и алгоритмы интеграции данных инерциально-спутниковых навигационных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 4. С. 9—24.
6. **Бабиченко А.В., Никулин М.И., Орехов М.И., Радченко И.В.** Измерение траекторных нестабильностей с помощью распределенной инерциально-спутниковой системы в составе бортового оборудования самолета Су-27СМ // Авиационные системы в XXI веке: Материалы юбилейной науч.-техн. конф. М., 2006. С. 5—10.
7. **Джанджгава Г.И., Рогалев А.П., Бабиченко А.В., Сухоруков С.Я.** Интегрированная динамически реконфигурируемая система комплексной обработки информации бортовых комплексов навигации, управления и наведения // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 6. С. 8—14.
8. **Пролетарский А.В.** Концепция системного синтеза динамических объектов // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 8. С. 28—33.
9. **Неусыпин К.А.** Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 3. С. 35—39.
10. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Разработка редуцированного алгоритма самоорганизации для коррекции навигационных систем // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 333—447.
11. **Неусыпин К.А.** Исследование критериев управляемости и наблюдаемости навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 9. С. 22—26.
12. **Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
13. **Неусыпин К.А.** Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 1. С. 37—39.

УДК 004.416.6

К.В. Володина
(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва)
ksenyavv98@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АСОНИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Работа посвящена моделированию влияния тепловых процессов на электромагнитное поле при изучении внутренней электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, которое рассматривается на примере двух взаимодействующих проводников (активного и пассивного). На основе анализа их схемы взаимодействия предложена эквивалентная электрическая схема. Для исследования влияния температуры на параметры электромагнитной связи использована электротепловая аналогия.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура; электрическая модель; проектирование; тепловые процессы.

The work is devoted to modeling the influence of thermal processes on the electromagnetic field when studying the internal electromagnetic compatibility of radio electronic equipment, which is considered on the example of two interacting conductors (active and passive). An equivalent circuit is proposed on the basis of their interaction scheme analysis. An electrothermal analogy is used for researching the temperature influence on the parameters of electromagnetic coupling.

Keywords: radio electronic equipment; electric model; designing; thermal processes.

Введение. В данной работе решается задача разработки метода совместного электрического и теплового моделирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для исследования электромагнитной совместимости близко взаиморасположенных печатных про-

водников. Как известно, в проектных организациях радиоэлектронного профиля компьютерные программы электрического моделирования широко распространены. Но далеко не все программы могут учесть электромагнитную взаимосвязь между соединительными проводниками. В работе ставится задача построения специальных моделей, которые должны быть встроены в программы схемотехнического моделирования.

Что касается теплового моделирования, то сегодня программы для него созданы в основном для машиностроительных конструкций. Эти программы практически не позволяют провести тепловое моделирование РЭА с очень малыми размерами радиоэлектронных компонентов и очень малыми расстояниями между печатными проводниками.

Автоматизированная система обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА [1, 2] фактически является единственной системой в России и за рубежом, ориентированной на проектирование РЭА. В ней имеется 13 подсистем с возможностью решения ряда проектных задач, в том числе задач теплового и механического моделирования. Ниже на относительно простом примере показана возможность использования подсистем теплового моделирования системы АСОНИКА с любыми программами электрического моделирования с применением предложенной модели электромагнитной взаимосвязи печатных проводников.

Построение электрической модели перекрёстной помехи. Рассмотрим взаимодействующие проводники на печатной плате [3]. На рис. 1 показаны четыре микросхемы (1...4). Верхние микросхемы 3 и 4 будем считать активными, т. е. по соединительному активному проводнику (АП) в рассматриваемый отрезок времени протекает электрический высокочастотный или импульсный сигнал. Для наглядности выделен участок АП, наиболее близко подходящий к участку пассивного проводника (ПП), который соединяет микросхемы 1 и 2. Условно считаем, что в рассматриваемый отрезок времени через ПП сигнал не протекает. Кроме того, на рис. 1 показано, что микросхемы 1 и 2 имеют входные собственные проводимости G_1 и G_2, а также собственные ёмкости C_1 и C_2.

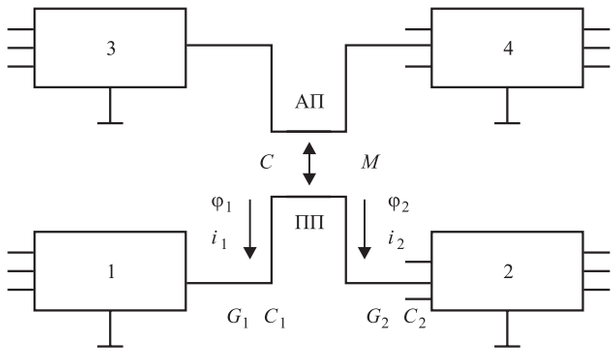

Рис. 1. Взаимодействующие проводники на печатной плате РЭА

Так как по АП передаётся переменный электрический сигнал, вокруг него имеется переменное электромагнитное поле, которое служит источником помехи для ПП. Электрические потенциалы $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$, а также токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$ на входах микросхем 1 и 2 вызываются наводимыми источниками помехи в виде ЭДС $E(t)$ и тока $J(t)$, обусловленных существованием паразитной ёмкости C и взаимной индукции M между АП и ПП.

На основании изложенного составляются уравнения

$$E(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t), \tag{1}$$

$$J(t) = i_1(t) + i_2(t). \tag{2}$$

Из рис. 1 следует, что ток $i_1(t)$ является входным током микросхемы 1 и распределяется между параллельно включёнными входной проводимостью G_1 и входной ёмкостью C_1. То есть для тока $i_1(t)$, протекающего через параллельные элементы G_1 и C_1, можно записать уравнение

$$C_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + G_1\varphi_1(t) = i_1(t). \tag{3}$$

Аналогично для микросхемы 2 ($i_2(t)$ — входной ток; G_2 — входная проводимость; C_2 — входная ёмкость) можно записать

$$C_2 \frac{d\varphi_2}{dt} + G_2\varphi_2(t) = i_2(t). \tag{4}$$

Используя уравнения (1)...(4), можно составить эквивалентную электрическую цепь, показанную на рис. 2. Она отображает появление электрической помехи в ПП, которая наведена электрическим током, протекающим в соседнем АП [1]. Действительно, электрическая цепь, показанная на рис. 2, имеет два узла (не считая общего нулевого узла, который обычно заземляется). Между этими узлами с потен-

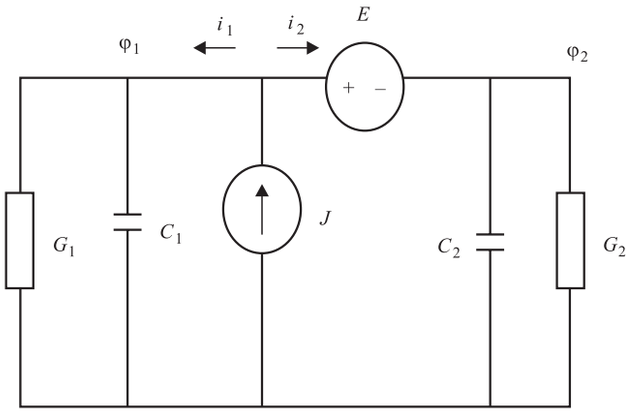

Рис. 2. Электрическая эквивалентная схема действия помехи между двумя проводниками

циалами $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ включена ЭДС $E(t)$, что соответствует уравнению (1). Источник тока $J(t)$ подключён к узлу эквивалентной схемы, из которого вытекают токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$. Это соответствует уравнению (2).

Уравнения (3) и (4) представлены левой и правой частями эквивалентной схемы, содержащими входные проводимости и ёмкости микросхем 1 и 2.

Представленная на рис. 2 электрическая модель эквивалентна процессу электромагнитного взаимодействия двух проводников. Эта модель может быть рассчитана с помощью любой программы электрического моделирования, например PSpice, OrCAD, Microsin и др.

Взаимосвязь электрических и тепловых моделей. Предположим, микросхемы, показанные на рис. 1, расположены в печатном узле, который входит в сложную РЭА, например космическое электронное оборудование. Из-за высокой плотности электронных компонентов тепловые процессы в РЭА являются очень интенсивными, а температуры корпусов и внутренних элементов микросхем могут быть высокими: 100 °С и выше. В этих условиях значения входных проводимостей и ёмкостей микросхем будут значительно отличаться от значений при нормальных условиях эксплуатации: 25 °С. При эксплуатации электронных блоков циклограмма их работы и переменность температурных условий внешней среды вносят нестационарность в протекание тепловых процессов в РЭА. Всё это приводит к динамике электромагнитных связей C и M и наводимых помех $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $i_1(t)$ и $i_2(t)$ на входах микросхем. Поэтому моделирование действия помехи между двумя проводниками по электрической эквивалентной схеме (см. рис. 2) должно сопровождаться тепловым моделированием печатного узла. Полученные при моделировании температуры учитываются изменением входных параметров микросхем с использованием температурных коэффициентов a_{G1}, a_{G2}, a_{C1}, a_{C2}. Значения электрических параметров с учётом температур T электронных компонентов $G_1^T, G_2^T, C_1^T, C_2^T$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} G_1^T &= G_1^{25}(1 + a_{G_1}(T - 25)); \\ G_2^T &= G_2^{25}(1 + a_{G_2}(T - 25)); \\ C_1^T &= C_1^{25}(1 + a_{C_1}(T - 25)); \\ C_2^T &= C_2^{25}(1 + a_{C_2}(T - 25)), \end{aligned} \quad (5)$$

где $G_1^{25}, G_2^{25}, C_1^{25}, C_2^{25}$ — значения параметров G_1, G_2, C_1, C_2 при $T = 25$ °С.

Аналогии переменных величин и параметров электрических и тепловых моделей

Унифицированные обозначения	Вид модели	
	Электрическая модель	Тепловая модель
Потенциальная переменная узла модели, φ	Электрический потенциал узла, φ	Температура в соответствующей части конструкции, T
Потоковая переменная ветви модели, ψ	Ток ветви, I	Тепловой поток, P
Диссипативный параметр ветви (α-параметр)	Проводимость, $Y_э$	Тепловая проводимость, $Y_т$
Консервативный параметр 1-го рода (β-параметр)	Ёмкость, $C_э$	Тепловая ёмкость, $C_т$
Консервативный параметр 2-го рода (γ-параметр)	Индуктивность, $L_э$	—
$\alpha(\varphi_1 - \varphi_2) = \psi$	$Y_э(\varphi_1 - \varphi_2) = I$	$Y_т(T_1 - T_2) = P$

Комплексное моделирование. Под влиянием тепловых процессов изменяются такие характеристики микросхем, как проводимость, ёмкость, коэффициент усиления транзистора, а значит, изменяются и токи, протекающие через проводники, влияющие на электромагнитное поле вокруг печатных и объёмных проводников РЭА. Поэтому электрическое моделирование эквивалентных схем действия помехи между проводниками в конструкциях РЭА необходимо проводить одновременно с тепловым моделированием тех же конструкций.

Поскольку тепловые модели печатных узлов строятся на основе электротепловой аналогии, они имеют вид тепловых цепей, аналогичных электрическим цепям. В электрических цепях текут токи, А, а в тепловых цепях — тепловые потоки, Вт. Размерность теплового потенциала — °С, тепловой проводимости — Вт/°С, тепловой ёмкости — Дж/°С. Аналогии, представленные в таблице, подтверждают [4, 5], что для теплового моделирования можно применять те же программы, что и для электрического моделирования, но использовать соответствующие размерности переменных величин и параметров ветвей.

Существует подсистема АСОНИКА-Т, позволяющая провести тепловое моделирование печатного узла РЭА и получить температуры каждого радиокомпонента, которые расположены на печатной плате [6, 7].

Заключение. В программах электрического моделирования имеется возможность передачи мощностей, рассеиваемых на электронных компонентах, через зависимый источник потоковой величины в тепловую модель. Для передачи температуры электронных компонентов из тепловой модели в электрическую модель используются зависимые сопротивления и ёмкости, которые изменяются в соответствии с формулами (5). Благодаря этому электрическая и тепловая модели могут быть объединены в единую модель. Для объединения моделей в таблице представлены унифицированные обозначения параметров, которые могут быть использованы как в электрической, так и в тепловой модели. Единая модель взаимосвязи двух проводников позволяет получать более точные значения электрических и тепловых величин и параметров электромагнитной связи. Для сложных РЭА рекомендуется использовать систему АСОНИКА совместно с любой программой электрического моделирования. Для теплового моделирования электронных шкафов предназначена подсистема АСОНИКА-Т, а для детальных тепловых расчётов отдельных печатных узлов наиболее приспособленной является подсистема АСОНИКА-ТМ [8].

Библиографические ссылки

1. **Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Шалумов М.А.** АСОНИКА — современный инструмент автоматизации моделирования электроники на внешние воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 3. С. 106—112.

2. **Моделирование** радиоэлектронных средств с учётом внешних тепловых, механических и других воздействий с помощью системы АСОНИКА / А.С. Шалумов, В.М. Ивашко, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, А.С. Шалумова. Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2014. 373 с.

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

4. **Информационные** технологии проектирования радиоэлектронных средств / Ю.Н. Кофанов, А.С. Шалумов, С.У. Увайсов, С.Ю. Сотникова; под. ред. Ю.Н. Кофанова. М., НИУ ВШЭ, 2013. 392 с.

5. **Гурбанов Э.Р., Белый А.В., Кофанов Ю.Н.** Тепловое моделирование усилительных устройств на основе электротепловой аналогии // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 218—221.

6. **Сотникова С.Ю., Кофанов Ю.Н., Увайсов С.У.** Разработка метода комплексирования физической модели с моделями протекающих электрических, тепловых и механических процессов // Инновационные информационные технологии. 2012. № 1. С. 434—436.

7. **Кофанов Ю.Н., Линецкий Б.Л., Сотникова С.Ю.** Диагностирование печатных узлов на основе автоматизированного метода бесконтактного контроля температурных полей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 10 (148). С. 24—29.

8. **Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В., Носков В.Н.** Создание интегрированной системы автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадёжной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий // EDA Express. 2005. № 11. С. 9.

УДК 621.38

К.А. Балахонов, Б.И. Шахтарин, д-р техн. наук, проф., **К.П. Лихоеденко,** д-р техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

balakhonoff@mail.ru

СХЕМА КОСТАСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕНТИЛЕЙ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» ВМЕСТО ДРУГИХ ВХОДНЫХ СХЕМ СМЕСИТЕЛЕЙ

Описаны схема Костаса с использованием двух вентилей «исключающее ИЛИ» вместо других схем, применяемых для реализации входных смесителей, а также принципы функционирования схемы, реализация, настройки и предположения. Результаты экспериментов показывают, что представленная схема может быть использована как для демодуляции сигнала 2-ФМ (двухпозиционная фазовая манипуляция), так и для восстановления несущей частоты.

Ключевые слова: схема Костаса; фазовая автоподстройка частоты (ФАП); восстановление несущей частоты.

The Kostas scheme using two «exclusive-OR» valves instead of other circuits used for input mixer implementation, as well as the principles of circuit operation, implementation, settings and assumptions are described. The results of the experiments show that the presented circuit can be used both for signal demodulation of 2-PhM (two-position phase manipulation) and for recovery of the carrier frequency.

Keywords: Kostas scheme; phase frequency auto-tuning (PhFAt); recovery of the carrier frequency.

Введение. Петля Костаса — одна из широко используемых на практике схем фазовой синхронизации и восстановления несущей частоты [1—7].

На рис. 1 изображена схема Костаса. Предполагается высокое отношение сигнал/шум (ОСШ) в принятом 2-ФМ-сигнале

$$r(t) = A_c m(t)\sin(2\omega_c t),$$

где A_c — амплитуда сигнала; $m(t)$ — бинарная информационная последовательность (состоящая из ±1); ω_c — круговая частота несущей.

Схема анализируется с учётом того, что выходная частота управляемого генератора (УГ) f_c фиксируется относительно входной с постоянной фазовой ошибкой θ_e. В случае если θ_e мала, амплитуда сигнала $v_2(t)$ относительно велика по сравнению с $v_1(t)$. Сигнал $v_1(t)$ пропорционален $m(t)$, поэтому он является демодулированным входным.

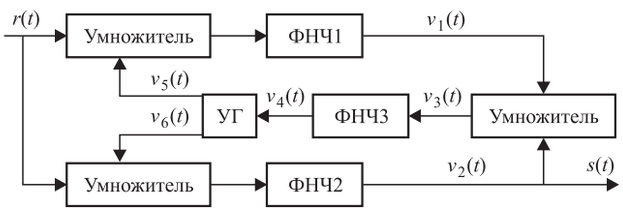

Рис. 1. Схема Костаса

Произведение напряжений

$$v_3(t) = (A_c A_0/2)^2 m^2(t)\sin(2\theta_e),$$

где A_0 — амплитуда выходного сигнала (УГ).

Напряжение $v_3(t)$ пропускается через узкополосный фильтр нижних частот (ФНЧ), частота среза которого близка к нулю, этот фильтр играет роль интегратора, так получается управляющее напряжение УГ

$$v_4(t) = K\sin(2\theta_e),$$

где $K = 1/8(A_c A_0/2)^2\langle m^2(t)\rangle$, $\langle m^2(t)\rangle$ — усреднённое значение $m^2(t)$.

Такого управляющего напряжения достаточно, чтобы удерживать частоту УГ близкой к f_c с небольшой фазовой ошибкой θ_e. Выходные сигналы УГ описываются формулами $v_5(t) = \sin(\omega_c t + \theta_e)$ и $v_6(t) = \cos(\omega_c t + \theta_e)$.

Входные смесители реализуются умножителями, число которых в цифровых сигнальных процессорах или программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) ограничено. В качестве УГ может использоваться генератор не только синуса, но и треугольных или прямоугольных импульсов.

Рассмотрим схему, в которой используются элементы «исключающее ИЛИ» в качестве входных смесителей схемы Костаса, являю-

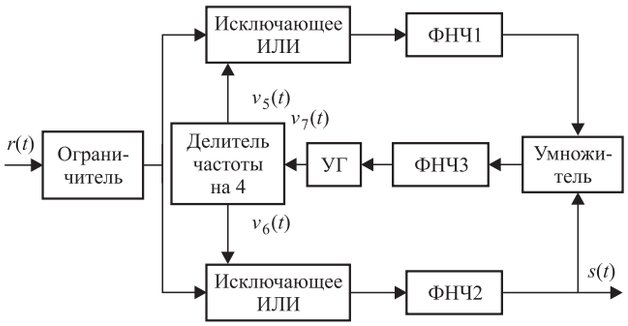

Рис. 2. Схема Костаса с использованием элементов «исключающее ИЛИ»

щиеся менее дорогими функциональными ячейками в пределах одной микросхемы, чем умножители.

Конфигурации системы. В данной схеме ОСШ входного сигнала $r(t)$ предполагается большим. Конфигурация системы для данной схемы представлена на рис. 2.

Использованы два элемента «исключающее ИЛИ» вместо двух входных смесителей, как изображено на рис. 2. Каждый вентиль реализует нелинейное смешивание входных сигналов, поэтому спектр выходного сигнала — это произведение входных спектров. Деление частоты на 4 с двумя квадратурными выходами используется для того, чтобы получить два сигнала с фазовым сдвигом на 90°. Ограничитель используется для амплитудного преобразования сигнала для последующей подачи его на элемент «исключающее ИЛИ». УГ используется как тактовый генератор с выходной частотой, в 4 раза превышающей несущую, которая после деления на 4 становится равной f_c. Так как после деления на 4 это по-прежнему прямоугольные импульсы, они имеют несколько частот f_c и нечётные частоты, кратные f_c ($3f_c$, $5f_c$ и т. д.). Следовательно, спектр выхода любого элемента «исключающее ИЛИ» будет иметь несколько частот: 0, $2f_c$, $4f_c$ и т. д., если выход ограничителя — чистая синусоида с частотой f_c. Необходимо отметить, что выход ограничителя имеет также высшие гармоники, большие чем f_c. Однако эти высшие гармоники могут быть отфильтрованы ФНЧ и $s(t)$ (см. рис. 2) — это демодулированный информационный сигнал, как и в обыкновенной петле Костаса, с амплитудой A_c, зависящей от питающего напряжения элемента «исключающее ИЛИ» и усиления ФНЧ.

Особенности системы. Необходимо ввести некоторые ограничения на составляющие схемы. Ширина полосы ФНЧ B_w должна составлять по крайней мере половину символьной скорости и быть меньше, чем $2f_c$ (например, $1/[2T_c] \leqslant B_w < 2f_c$, где T_c — период сигнала), чтобы избежать межсимвольной интерференции (МСИ) и высших гармоник на выходе элемента «исключающее ИЛИ». Кроме того, необходимы два ФНЧ, чтобы обеспечить требуемые свойства [3].

Важными параметрами для моделирования фазовой автоподстройки частоты (ФАП) второго порядка, на которые следует обратить внимание, являются коэффициент усиления K и ширина полосы петлевого фильтра B_L. Для быстрого захвата K должен быть велик [3]. Начальная частота УГ должна быть выставлена максимально близко к несущей частоте f_c (а для данной схемы $f_c/4$) для быстрого захвата.

Аппаратная реализация. Для реализации данной схемы использовалась микросхема ПЛИС Xilinx Virtex-6 (США), а также АЦП (Texas Instruments ADS62P42, США) и ЦАП (Analog Devices AD9781, США). После преобразования сигнала в цифровой вид выполняется знаковая обработка. Вентили «исключающее ИЛИ» реализуются на основе стандартных возможностей микросхемы ПЛИС. Цифровые фильтры проектируются в среде Matlab, после чего синтезируются для конкретной микросхемы. Для функций УГ используется программируемый генератор гармонического сигнала с управляемой частотой. Умножитель реализуется аппаратным блоком в ПЛИС.

Используемая схема деления частоты на 4 (рис. 3), позволяющая осуществить фазовый сдвиг на 90° с постоянной амплитудой во всем диапазоне выходных частот УГ, имеет в данном случае лучшие характеристики, чем у аналоговых методов. Сигналы $v_5(t)$ и $v_6(t)$ (см.

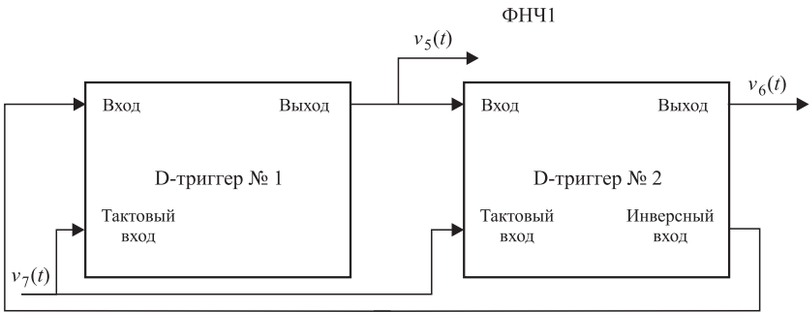

Рис. 3. Схема деления частоты на 4

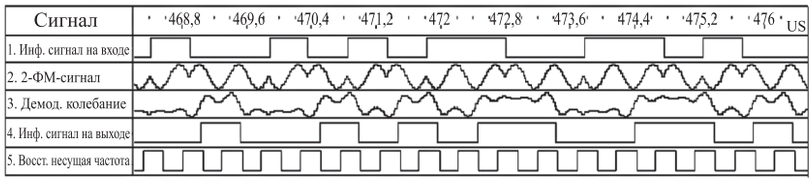

Рис. 4. Пример временных реализаций сигналов:
1 — информационный битовый исходный сигнал; *2* — модулированный сигнал 2-ФМ; *3* — демодулированный сигнал; *4* — полученная битовая последовательность; *5* — восстановленная несущая частота

рис. 2 и 3) — выходные сигналы делителя частоты, а $v_7(t)$ — входной сигнал.

Результаты экспериментов, проведённых на описанной выше аппаратуре, приведены на рис. 4. Верхний сигнал — это модулирующая последовательность, второй сигнал — это модулированный сигнал 2-ФМ, полученный из битовой последовательности, далее можно увидеть демодулированный выходной информационный сигнал, который необходимо перевести в бинарный вид, для получения исходной последовательности (следующий сигнал), последний же сигнал — это восстановленная несущая. Можно заметить, что четвёртый сигнал — это запаздывающая копия первого, т. е. система успешно демодулирует 2-ФМ-сигнал.

Заключение. В работе показано, что представленная модификация схемы Костаса при большом ОСШ может одновременно демодулировать 2-ФМ-сигнал и восстанавливать несущую частоту, что иллюстрируют результаты экспериментов. Схема имеет преимущества перед классической, в том числе меньшую эквивалентную цену элементов «исключающее ИЛИ» в сравнении с другими типами смесителей, например аппаратными умножителями.

Работа выполнена по гранту «Статистические методы локализации местоположения и протяжённости области определения сигналов и изображений в пространстве их существования» (проект № 15-11-10022) Российского научного фонда.

Библиографические ссылки

1. **Шахтарин Б.И.** Статистическая динамика систем синхронизации. М.: Радио и связь, 1998, 488 с.
2. **Couch L.W.** Digital Analog Communication Systems. Prentice-Hall. Upper Saddle River. NJ, 2001.
3. **Gardner F.M.** Phaselock Techniques. John Wiley & Sons. New York, 1979.
4. **Sklar B.** Digital communications. Prentice-Hall. Upper Saddle River. NJ, 2001.
5. **Tomasi W.** Electronic Communication Systems. Prentice-Hall. Upper Saddle River. NJ, 2001.
6. **Young P.H.** Electronic Communication Techniques. Prentice-Hall. Upper Saddle River. NJ, 1999.
7. **Xiong F.** Digital Modulation Techniques. Artech House. Norwood. MA, 2000.

Требования по оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений.

Согласно требованиям зарубежных баз данных список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N, том — V., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http://translit.ru/.

ao817.indd 366 25.07.2017 15:44:29

УДК 004.32.2+004.04

Ю.В. Доронина, д-р техн. наук, доц., **Т.С. Карпова, Е.Б. Доронина**
(Севастопольский государственный университет)

juvado@yandex.ru

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕЁ РЕСУРСОВ

Рассмотрен процесс и построены модели изменения во времени эффективности информационной системы (ИС) вследствие её устаревания. Определена целесообразность реинжиниринга ИС с точки зрения сохранения ресурсов, показана зависимость показателя полноты использования ресурсов от фактического периода существования ИС. Проведено имитационное моделирование оптимального времени начала реинжиниринга для реальной ИС в среде AnyLogic.

Ключевые слова: информационная система; модель устаревания системы; реинжиниринг; полнота использования материально-экономических ресурсов.

The process is considered and the changes models of the information system (IS) efficiency during the time due to its obsolescence are constructed. The expediency of IS reengineering from the point of view of resource conservation has been determined. The dependence of resource utilization completeness indicator from the actual period of the IP existence is shown. Simulated modelling of the optimal time for the reengineering beginning for real IP in the AnyLogic environment was carried out.

Keywords: information system; system obsolescence model; reengineering; completeness usage of material and economic resources.

Введение. Этап ввода ИС в эксплуатацию является наиболее значимым для заказчика. Но следует учитывать то обстоятельство, что ИС начинает устаревать сразу после появления на рынке. Факторами, продлевающими актуальность ИС, являются: выпуск обновлений и релизов программ, на основе которых будет осуществлена миграция версий ИС, при этом в техническом задании могут быть оговорены условия, при которых ИС может быть выведена из эксплуатации или модернизирована; исходя из анализа ресурсов для поддержания ИС в актуальном состоянии, может быть проведён её реинжиниринг, связанный с усовершенствованием и реконструкцией [1—3].

Для выявления целесообразности реконструкции ИС с точки зрения сохранения ресурсов необходимо построить адекватную модель устаревания. При этом следует учитывать скорость изменения процесса старения системы и готовность её к реинжинирингу [4]. Модели устаревания ИС могут быть представлены различными законами распределения: экспоненциальным, логарифмическим или степенным. На основании готовности ИС к совершенствованию, т. е. зная степень гибкости функционирования ИС и её функционального окружения, можно выбрать наиболее экономически эффективную модель устаревания из предложенных, а с помощью показателя полноты использования материально-экономических ресурсов принять или отклонить запрос на реинжиниринг ИС.

Метод определения целесообразности реинжиниринга ИС с точки зрения сохранения материально-экономических ресурсов. В общем случае изменение показателя эффективности системы во времени $E(t)$ можно представить в виде

$$E(t) = \begin{Bmatrix} E_0 & \text{при } t < t_m \\ E_0 f(x) & \text{при } t \geqslant t_m \end{Bmatrix}, \qquad (1)$$

где E_0 — значение наилучшего показателя эффективности системы на момент окончания её разработки; t_m — время начала морального устаревания системы; $f(x)$ — некоторая функция устаревания ИС.

В табл. 1 приведены основные функции, отражающие закон устаревания ИС.

Следует отметить, что закон устаревания ИС может быть выбран в зависимости от предполагаемой скорости изменения процесса устаревания и гибкости совершенствования ИС. При анализе жизненного цикла ИС следует учитывать качественную характеристику процесса устаревания: слабую или силь-

Таблица 1

Вид элементарной функции и соответствующий закон устаревания системы

Вид элементарной функции	Закон устаревания системы
$y = ae^{bx}$	$E_0 e^{-k(t-t_m)}$
$y = a\ln(x + b)$	$-E_0\ln[k(t - t_m)]$
$y = ax^2$	$-E_0[k(t - t_m)]^2$
$y = ax^3$	$-E_0[k(t - t_m)]^3$
$y = a\sqrt{x}$	$-E_0\sqrt{k(t-t_m)}$

ную интенсивность процесса устаревания. Опытным путём было установлено, что если система относится к слабоустаревающей, целесообразно использовать функции $y = ax^2$ и $y = ax^3$, а при интенсивном устаревании ИС закон её функционирования аппроксимируется функциями $y = ae^{bx}$, $y = a\ln(x + b)$ и $y = a\sqrt{x}$. На рис. 1 схематично показаны модели жизненного цикла интенсивно и слабоустаревающей системы. Эффективность системы без устаревания не отклоняется от первоначального значения, вплоть до скачка её эффективности в результате совершенствования. Для системы с устареванием характерны снижения эффективности: интенсивное (вогнутая кривая) и слабое (выпуклая кривая).

В процессе потребления материальных ресурсов при реинжиниринге происходит их трансформация в материальные затраты, которые определяются показателями, вычисленными исходя из суммы материальных затрат.

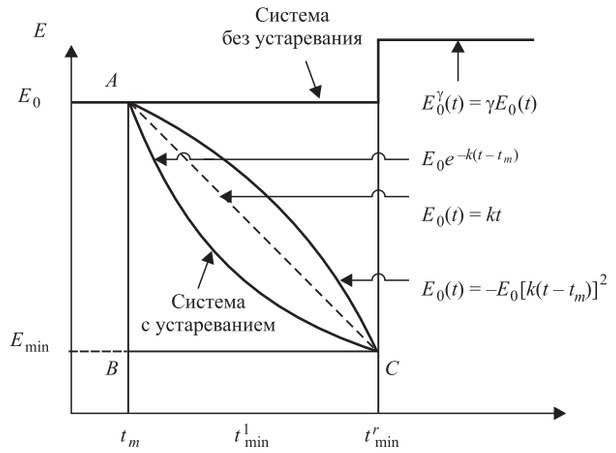

Рис. 1. Схематическое изображение жизненного цикла системы без устаревания и с устареванием различных интенсивностей

Показатель полноты использования ресурсов (ПИР) — важнейшая характеристика жизненного цикла системы [3]. Выражение для ПИР можно записать в виде

$$\psi = kt^r_{\min}/(\tau + t^r_{\min}), \qquad (2)$$

где $t^r_{\min}$ и τ — расчётные и фактические периоды существования системы до очередного цикла её совершенствования.

Коэффициент k отражает интенсивность вложения средств на замедление процесса устаревания. Для интенсивного устаревания получим

$$E(t) = E_0 e^{-k(t-t_m)}; \;\; k = \ln\left(E(t)/E_0\right)/(t_m - t). \qquad (3)$$

Если принять, что $t = t^r_{\min}$, тогда $E(t^r_{\min}) = E_{\min}$. С учётом формулы (3) показатель ψ при совершенствовании системы при её устаревании представляется выражением

$$\psi = \frac{t^r_{\min}}{\tau + t^r_{\min}}\left[\ln\left(E_{\min}/E_0\right)/(t_m - t^r_{\min})\right]. \qquad (4)$$

Экономически оптимальный срок эксплуатации ИС до реинжиниринга $t^r_{\min}$ в работе [5] определяется как $t^r_{\min} = \sqrt{2C_0/aC}$, где a — регулярный прирост эксплуатационных расходов; C_0 — приведённые к началу эксплуатации расходы на разработку, производство и установку системы; C — стоимость эксплуатации системы.

Учитывая $t^r_{\min}$ в формуле (4), получим

$$\psi = \frac{\sqrt{2C_0/aC}}{\tau + \sqrt{2C_0/aC}} \times \left[\ln\left(E_{\min}/E_0\right)/(t_m - \sqrt{2C_0/aC})\right]. \qquad (5)$$

Моделирование выражения (5) осуществлялось на основе различных законов при условиях: t_m = 2 мес.; E_0 = 0,8; $E_{\min}$ = 0,2. Кривые на рис. 2 и 3 описывают различные варианты регулярного прироста эксплуатационных расходов, где τ определяет время эксплуатации в месяцах.

Расчёты проведены в условных единицах приведённой стоимости. При расчётах принималось, что к началу эксплуатации суммарные затраты на разработку, производство и установку системы равны 100 ед., а стоимость эксплуатации системы составляет 10 ед.

В табл. 2 приведены выборочные расчётные значения показателя ПИР начала максимально

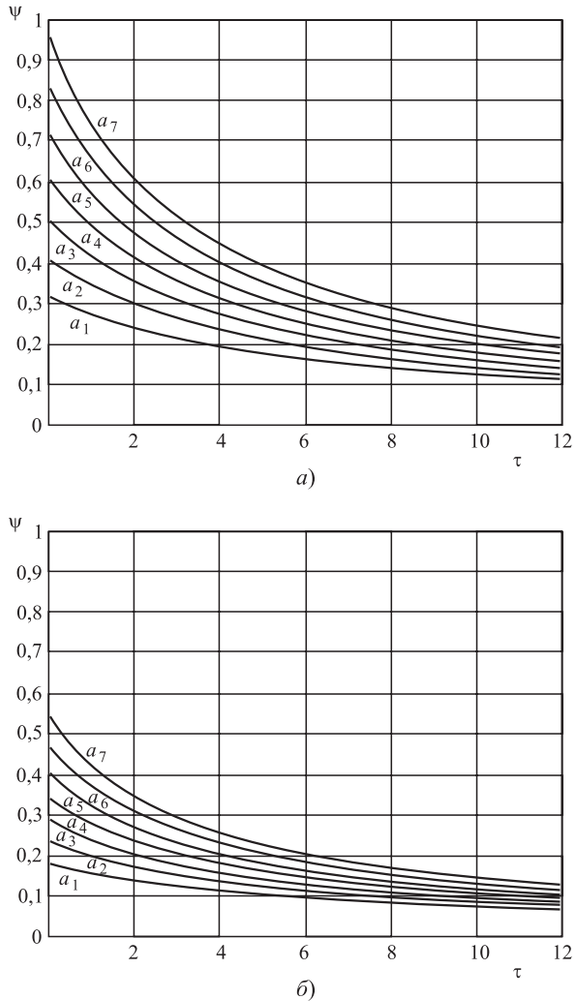

Рис. 2. Зависимость показателя ПИР от фактического периода существования ИС:
а — для закона устаревания вида $y = e^x$; *б* — для закона устаревания вида $y = \ln(x)$

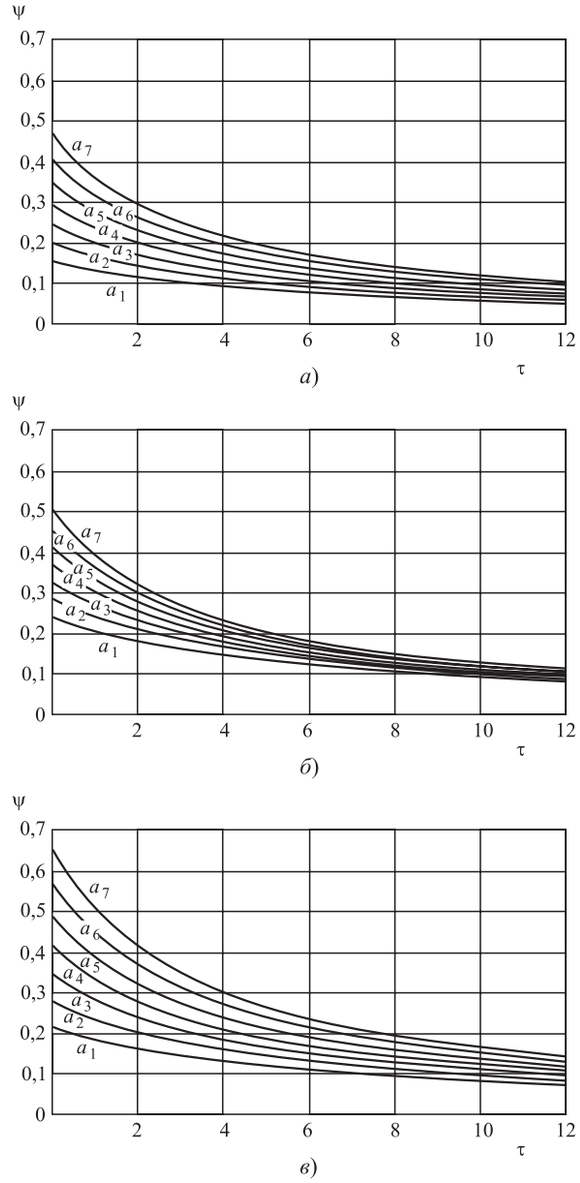

Рис. 3. Зависимость показателя ПИР от фактического периода существования ИС:
а — для закона устаревания вида $y = x^2$; *б* — $y = x^3$; *в* — $y = \sqrt{x}$

отсроченного реинжиниринга в зависимости от вида закона распределения функции устаревания системы: $\psi(4)$ — представляет собой показатель ПИР через 4 мес. эксплуатации.

Целесообразность реконструкции системы с точки зрения сохранения материальных и энергетических ресурсов определяется неравенством

$$\psi_{\max} - \psi(n) \geqslant \delta_\psi, \qquad (6)$$

где $\psi(n)$ — ПИР, соответствующий n-й модернизации; δ_ψ — заданное значение приращения ПИР, определяемое экономическими, социальными или другими соображениями.

Описанный выше метод позволит оценить зависимость оптимального срока эксплуатации системы от ежегодного прироста эксплуатационных расходов, связанных с постоянным совершенствованием ИС, исходя из соотношения затрат. Кривые на рис. 4 описывают различные варианты стоимостных затрат на эксплуатацию системы. Расчёты проведены в условных единицах приведённой стоимости. При расчётах принималось, что на начало эксплуатации суммарные затраты на разработку, производство и установку системы C_0 равны 10 ед. (условные единицы приняты для проведения аналитических расчётов и наглядности графика, при решении реальных задач возможно выбирать соответствующие значения).

ao817.indd 369 25.07.2017 15:44:29

Таблица 2

Изменение показателя ПИР в зависимости от регулярного прироста эксплуатационных расходов

a_1	$t^r_{\min}$	$\psi_{\max}$	$\psi(4)$	$\Delta\psi$
$y = e^x$				
0,5	6,3	0,32	0,19	0,13
0,7	5,3	0,41	0,23	0,18
0,9	4,7	0,51	0,27	0,24
$y = \ln(x)$				
0,5	6,3	0,15	0,11	0,04
0,7	5,3	0,23	0,133	0,097
0,9	4,7	0,28	0,155	0,163
$y = x^2$				
0,5	6,3	0,155	0,095	0,06
0,7	5,3	0,2	0,11	0,09
0,9	4,7	0,247	0,133	0,114
$y = x^3$				
0,5	6,3	0,24	0,149	0,09
0,7	5,3	0,28	0,165	0,115
0,9	4,7	0,33	0,179	0,163
$y = \sqrt{x}$				
0,5	6,3	0,22	0,13	0,09
0,7	5,3	0,28	0,16	0,12
0,9	4,7	0,34	0,18	0,16

Анализ полученных на рис. 4 зависимостей показывает, что при стоимости эксплуатационных расходов $C_1 = C_0$ и приросте этих расходов на величину a, t_r^* значительно ниже (нижняя кривая), чем при условии, когда $C_1 \ll C_0$ (верхняя кривая). Следовательно, рациональное вложение средств целесообразно в рамках постоянного совершенствования ИС, когда затраты на

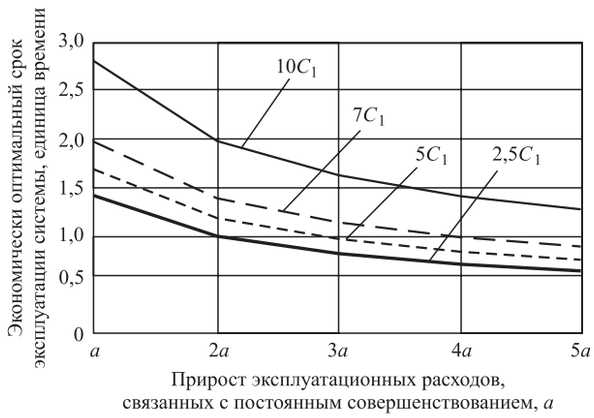

Рис. 4. Зависимость экономически оптимального срока эксплуатации системы от ежегодного прироста эксплуатационных расходов, связанных с постоянным совершенствованием ИС

этот вид деятельности сопоставимы или мало отличны от стоимости эксплуатации системы.

Предложенный метод апробирован при моделировании параметров жизненного цикла реальной ИС (автоматизированная гидрометеорологическая система сбора и анализа данных морских прибрежных наблюдений, Гидрометцентр, г. Севастополь) и получены результаты: для $t_m = 1{,}5$ г. (среднее время устаревания версий программного обеспечения), $Eh = 0{,}9$ — показатель эффективности подсистемы сбора данных на момент окончания её разработки (расчёты проводились относительно среднего времени цикла обработки данных гидрометеорологической системы).

Математическое ожидание было получено при расчёте функции распределения $F_\theta(t)$ случайной величины θ (времени цикла обслуживания данных вне зависимости от начального состояния) по формуле $M\theta = \int_0^\infty \overline{F_\theta}(t)dt$ и составило 0,725 ч (из результатов стохастического моделирования на основе полумарковской модели, полученной в работе [6]). При $C_0/C_1 = 10$ (соотношение затрат на эксплуатацию и проектирование) $a = 5$ (прирост эксплуатационных затрат) получено время максимально отсроченного реинжиниринга $t_r^* = 2$ г. для $k_0 = 0{,}2$ (показатель вложения средств на совершенствование каждой структурной единицы системы).

Практическая реализация метода. Настройка жизненного цикла ИС осуществляется на основе выбора закона устаревания ИС в зависимости от требуемой скорости изменения процесса устаревания и гибкости совершенствования ИС. Анализируя гибкость совершенствования ИС, можно определить число ресурсов для снижения темпа морального устаревания системы и выбрать наиболее экономически эффективную модель жизненного цикла ИС. Теоретический диапазон гибкости реинжиниринга иллюстрируется как площадь прямоугольного треугольника S_{ABC}, изображенного на рис. 1:

$$S_{ABC} = 0{,}5(E_0 - E_{\min})(t^r_{\min} - t_m), \qquad (7)$$

где $E_{\min}$— минимальный допустимый уровень показателя эффективности системы; $t^r_{\min} - t_m$ — разность между оптимальным запланированным временем функционирования системы и временем начала морального устаревания системы.

Верхняя часть треугольника может ограничиваться в общем случае экспонентой и опре-

делять фактический диапазон гибкости. При этом площадь прямоугольного треугольника S_{ABC} представляет собой количественно определённую возможность варьирования характеристик эффективности системы. Функция $E(t)$ непрерывна на отрезке $[t_m; t^r_{\min}]$. Треугольник ABC ограничен линиями $y = f(x)$, $y = E_{\min}$, $x = t_m$ и $y = t^r_{\min}$. Определим его площадь:

$$S_{ABC} = \int_{t_m}^{t^r_{\min}} [f(x) - E_{\min}]dx. \qquad (8)$$

Следует учесть, что время принятия решения о начале реинжиниринга определяется условием $E_0(t) \leqslant E_{\min}$.

Найдём гибкость совершенствования ИС с экспоненциальным законом устаревания в общем виде, используя формулу (8):

$$S_{ABC} = \int_{t_m}^{t^r_{\min}} [E_0 e^{[-k*(t-t_m)]} - E_{\min}]dx = \\ = -\frac{E_0[e^{k(t_m - t^r_{\min})} - 1]e^k}{k} + t_m E_{\min} - t^r_{\min} E_{\min}. \qquad (9)$$

Настроим жизненный цикл системы, используя полученные ранее модели. Входные данные: k, T_m, E_0, $E_{\min}$, закон устаревания системы. Ожидаемые результаты: $t^*_{\min}$, S_{ABC}. Проанализируем гибкость совершенствования ИС при условиях: $k = 0{,}4$ и $T_m = 2$ мес., $E_0 = 0{,}8$, $E_{\min} = 0{,}2$, для чего подставим в выражение (9) различные виды законов устаревания. Вычислить интеграл в явном виде не представляет трудности. В табл. 3 приведены расчётные значения фактического диапазона гибкости ИС в зависимости от вида закона распределения функции устаревания системы.

Из приведённых расчётов следует, что закон распределения существенно влияет на результаты моделирования процесса устаревания системы. Значения фактического диапазона гибкости ИС варьируются в зависимости от выбранного закона.

Таблица 3

Изменение значения фактического диапазона гибкости в зависимости от выбранной функции закона устаревания ИС

Вид элементарной функции	Расчётное время начала реинжиниринга, t_r	Фактический диапазон гибкости системы, S_{ABC}
$y = e^x$	5,50	0,80
$y = \ln x$	3,00	0,24
$y = x^2$	4,25	0,86
$y = x^3$	4,35	1,00
$y = x^{1/2}$	3,50	0,28

Идеи предложенного подхода были реализованы в виде системы поддержки принятия решений по управлению жизненным циклом ИС с использованием системы моделирования AnyLogic.

Возвращаясь к расчётам для реальной ИС, можно получить уточнение показателей: $t^*_r = 2$ г., $k = 0{,}31$ (вложения средств на совершенствование каждой структурной единицы системы — подсистемы сбора данных гидрометеорологической системы). Ожидание заказчика связано с тем, что эффективность системы не должна падать ниже 80 %. В данном случае время начала реинжиниринга $t^*_r = 1{,}81$ г. В этот момент времени целесообразно проводить реинжиниринг, поскольку показатель ПИР равен 94 %. Таким образом, уточнение показателя оптимального времени начала реинжиниринга составило 2,28 (≈2,3) мес.

Выводы. Таким образом, решена одна из важнейших задач системной инженерии — моделирование параметров совершенствования ИС. При исследовании получено выражение для выявления целесообразности реинжиниринга ИС с точки зрения сохранения материальных ресурсов, приведены примеры, иллюстрирующие изменение значения ПИР в зависимости от фактического периода существования ИС. На основании аналитических исследований получены модели устаревания ИС, основанные на различных законах распределения случайных величин, что по сути является выражением гибкости совершенствования ИС. Приведено выражение для расчёта ПИР. Показана возможность определения зависимости экономически оптимального срока эксплуатации системы от ежегодного прироста эксплуатационных расходов, связанных с постоянным совершенствованием ИС. Расчёты проведены на основе результатов стохастического моделирования. При исследовании была получена формула для определения фактического диапазона гибкости ИС. Приведён пример, иллюстрирующий изменение значения фактического диапазона гибкости в зависимости от выбранной функции закона устаревания ИС. Получены реальные результаты уточнённого времени начала реинжиниринга — 1,81 г., что составило 2,28 (≈2,3) мес. относительно изначально определённого времени 2 г.

В дальнейших исследованиях планируется создать систему поддержки принятия решения для управления процессом функционирования как всей ИС, так и отдельных подсистем в рамках анализа её жизненного цикла.

Библиографические ссылки

1. **Баринов В.А.** Реинжиниринг: сущность и методология [Электронный ресурс] / Элитариум. Режим доступа: http://www.ippnou.ru/article.php?idarticle=002369 (дата обращения: 12.07.2016).

2. **Беркун С.** Искусство управления IT-проектами. Проблемы организации бизнеса, лидерства, разработки и предоставления результатов The Art of Project Management: науч. изд. / пер. с англ. С. Беркун. М.; СПб.; Н. Новгород: Питер, 2007. 400 с.

3. **Николаев В.И., Брук В.М.** Системотехника: методы и приложения. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1985. 199 с.

4. **Доронина Ю.В.** Модель управления совершенствованием автоматизированной информационной системы на основе гибкого реинжиниринга // Вестник СевГТУ «Автоматизация процессов и управление»: сб. науч. тр. Севастополь: изд-во СевНТУ, 2012. Вып. 125. С. 107—110.

5. **Монгуш С.Ч., Ховалыг Н-Д.К.** Сравнительный анализ методов определения оптимальных сроков службы машин // Вестник. Технические и физико-математические науки. Тува: изд-во ТГУ, 2014. Вып. 3. С. 84—91.

6. **Доронина Ю.В.** Анализ модели функционирования системы сбора и обработки гидрометеорологических данных / Ю.В. Доронина, В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. Севастополь: изд-во СевНТУ, 2011. Вып. 13. С. 30—35.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии»
успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России
для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:
05.00.00 — технические науки
и четырём группам специальностей:
05.02.00 — машиностроение и машиноведение;
05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;
05.11.00 — приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы;
05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.
Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!
С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

Уважаемые читатели!

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

УДК 004.896

А.Е. Сулавко, канд. техн. наук, **С.С. Жумажанова**
(Омский государственный технический университет),
З.В. Семёнова, д-р пед. наук, проф., **А.С. Ковальчук, Р.В. Борисов**
(Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия)

sulavich@mail.ru

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИХ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ БИОМЕТРИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Описана структура системы идентификации водителей и их психофизиологического состояния (ПФС) до и во время управления транспортным средством по динамическим биометрическим признакам. Проведены экспериментальная оценка надёжности верификации образов водителей по физиологическим и температурным параметрам лица, а также идентификация трёх психофизиологических состояний (нормальное, сонное, алкогольное опьянение) по параметрам подписи, голоса, вариабельности сердечного ритма и температуры лица субъекта.

Ключевые слова: идентификация психофизиологического состояния; верификация личности; параметры голоса и подписи; тепловой и видимый диапазоны излучений; особенности лица; вариабельность сердечного ритма.

The structure of the driver identification and their psychophysiological state (PFS) system before and during the driving of the vehicle by dynamic biometric characteristics is described. An experimental estimation of the driver image verification reliability on the physiological and temperature parameters of the face, as well as the identification of three psychophysiological states (normal, sleepy, alcoholic intoxication) on the parameters of signature, voice, heart rate variability, and subject face temperature were carried out.

Keywords: identification of the psychophysiological state; personality verification; parameters of voice and signature; thermal and visible ranges of radiation; facial features; heart rate variability.

Введение. В настоящее время при высоком уровне автоматизации процессов управления наблюдается увеличение количества ошибок, совершаемых человеком. Проблема «человеческого фактора» особенно ярко проявляется в области управления транспортом. По данным Госавтоинспекции МВД России в нашей стране с января по ноябрь 2016 г. произошло 157 108 дорожно-транспортных происшествий (ДТП), в которых погибло 18 490 и ранено 199 544 чел., при этом более 80 % таких происшествий происходит по вине водителей.

Работы по повышению надёжности системы взаимодействия «водитель—автомобиль» с точки зрения человеческого фактора находятся в зачаточном состоянии, несмотря на значительные людские и экономические потери, которые несёт страна. Некоторый оптимизм появился после утверждения постановлением Правительства Российской Федерации от 3 октября 2013 г. № 864 федеральной целевой программы «Повышение безопасности дорожного движения в 2013—2020 годах». Установлены три ступени контроля или отбора водителей. На первой из них определяют лиц, непригодных для вождения транспортных средств. По имеющимся оценкам они составляют 10 % желающих управлять автомобилем. Вторая ступень — предрейсовый контроль. Общую оценку эффективности второй ступени даёт статистика: доля нетрезвых водителей среди вовлечённых в ДТП составила около 30 % при слабом контроле (сельская местность), 8—10 % при более строгом (областные центры) и около 5 % при весьма строгом (г. Москва). При внезапной проверке группы водителей автобусного предприятия состояние опьянения было обнаружено у 10,8 % [1]. Третья ступень — контроль состояния водителя в процессе управления транспортным средством с помощью автоматических средств.

Настоящая статья посвящена разработке системы предрейсового контроля, а также распознавания водителя и его состояния в процессе управления транспортным средством по динамическим биометрическим признакам.

Недостатки существующих систем контроля состояния водителя. Имеющиеся разработки и даже промышленные образцы в той или иной степени решают указанную задачу. Однако их особенностями являются отсутствие данных о достоверности приводимых результатов [2], недостаточность публикаций об алгоритмах их работы в открытой печати [3] и сложность использования на практике [4]. К наиболее известным решениям следует отнести систему Attention Assist, устанавливаемую на автомобилях Mercedes-Benz с 2011 г. По сигналам датчиков вращения рулевого колеса, управления двигателем, взаимодействия с тормозной системой, курсовой устойчивости и других формируется индивидуальная водительская модель управления транспортом (эталон). Если компьютер определяет значительные отклонения параметров модели при очередной поездке водителя на данном транспортном средстве, принимается решение о необходимости прервать дальнейшее движение. В работе [4] указаны недостатки описанной системы: сложность, исключающая её применение в большинстве выпускаемых автомобилей, а также возможность принятия ложных решений. Отличия в поведении водителя от эталонного поведения в большинстве случаев определить невозможно (усталый водитель может быть адекватен условиям движения). В отличие от системы Attention Assist системы Ford Driver Alert и Volvo Driver Alert Control фиксируют только характер движения автомобиля на дороге. Направленная вперёд видеокамера фиксирует положение транспортного средства на полосе движения, а отклонение от заданных параметров движения оценивается как наступление усталости человека за рулём. Данный подход к решению задачи требует наличия дорожной разметки высокого качества. В условиях нашей страны качество разметки на дорогах часто не обеспечивается на требуемом уровне [2]. Использование для анализа в качестве основного параметра изменения угла поворота рулевого колеса не всегда отражает реальное перемещение автомобиля. По правилам допуска легковых автомобилей к эксплуатации на дорогах Российской Федерации суммарный разрешённый люфт в рулевой системе составляет 10°. В этом диапазоне находятся показатели, отражающие отклонение автомобиля от идеальной траектории движения.

Структура системы идентификации водителя и его ПФС в процессе профессиональной деятельности. Перед началом работы (перед выездом) любой профессиональный водитель должен проходить плановый медицинский осмотр (предрейсовый осмотр). Для персонала, который проводит этот осмотр, открываются возможности использования более надёжных контактных способов регистрации показателей, отражающих психофизиологическое состояние субъекта. После предрейсового осмотра, в процессе профессиональной деятельности водителя предлагается использовать бесконтактные способы регистрации показателей, отражающих ПФС. На каждом из этапов применяется свой набор регистрирующей и принимающей решения техники, которые имеют интерфейсы взаимодействия (обмена информацией) и работают в комплексе, дополняя друг друга.

Основой для настоящей работы является гипотеза: динамические биометрические признаки (параметры подписи, голоса, теплового изображения лица), характеризующие субъекта, также характеризуют его ПФС. Данная гипотеза подтверждается в работах [5] и [6].

Вопрос идентификации водителя снимается полностью, так как его либо знают в лицо, либо просят предъявить документ, удостоверяющий личность. Для идентификации ПФС используется специализированный стационарный программно-аппаратный комплекс (ПАК). Стационарный ПАК включает в себя компьютер с возможностью регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) контактным способом, графический планшет для ввода рукописной подписи, видеокамеру (веб-камеру), тепловизор и микрофон. Водитель при помощи и под контролем медицинского персонала последовательно проходит процедуру регистрации ЭКГ, вводит рукописную подпись, производит запись голоса (например, отвечает на вопрос) и запись теплового видеоизображения лица. Затем по каждому из используемых каналов вычисляют биометрические признаки — величины, характеризующие одновременно субъекта и его ПФС. По общей совокупности признаков проверяют гипотезу о нахождении водителя в состоянии, условно называемом нормальным, которое не несёт опасности в профессиональной деятельности водителя. В случае подтверждения указанной гипотезы водитель допускается к работе. Дополнительно в процессе предрейсового осмотра регистрируют видеоизображение лица и также заносят в память стационарного ПАК (создаются эталонные описания лица субъекта в тепловом и видимом диапазонах излучений). Данный процесс показан на рис. 1.

После успешного прохождения предрейсового контроля водитель приступает к профессиональной деятельности. При этом персонал, проводящий осмотр, заносит в стационарный ПАК государственный номер машины, на которой конкретно будет работать этот водитель. Автомобиль предлагается оснастить мобильным ПАК, который подключается к сети Интернет и устанавливает соединение со стационарным ПАК. Таким образом происходит двусторонний обмен информацией о личности водителя и значениях эталонных описаний биометрических признаков.

Мобильный ПАК оснащён следующим набором аппаратуры: микрофон для регистрации голоса, встраиваемая малогабаритная видеокамера (веб-камера) для регистрации видеоизображения лица, встраиваемый малогабаритный тепловизор для регистрации теплового видеоизображения лица. В начале работы и на всём её протяжении с определённой периодичностью мобильный ПАК решает две задачи:

1. *Верификация личности водителя.* Ведётся непрерывное наблюдение (мониторинг) и регистрация параметров лица водителя в видимом и тепловом диапазонах оптических излучений (посредством видеокамеры и тепловизора). Формируются векторы значений биометрических признаков, которые поступают на вход алгоритма принятия решений об аутентичности образа водителя. Время формирования одной порции данных занимает от 1 до 10 с в зависимости от количества кадров, на которых удалось локализовать лицо. При наличии маскирующих воздействий в поле зрения лица (например, если водитель надел солнцезащитные очки) вектор биометрических признаков формируется не полностью и классификатор принимает решение при ограниченном количестве информации.

2. *Идентификация ПФС водителя.* Используется следующая совокупность каналов для получения биометрических параметров (признаков): тепловое изображение и видеозапись лица, по которой происходит вычисление среднего в промежутке времени 30 с количества ударов сердца (пульс). При существенном изменении пульса может быть сделан запрос дополнительной информации в виде голоса водителя — требуется произнести определённый текст (например, ответить на поставленный вопрос). После произнесения водителем текста добавляются признаки, вычисленные по записи голоса. Запрос голоса водителя используется только при необходимости, так как данная процедура отвлекает водителя от работы. При принятии решения о нахождении водителя в ПФС, опасном для продол-

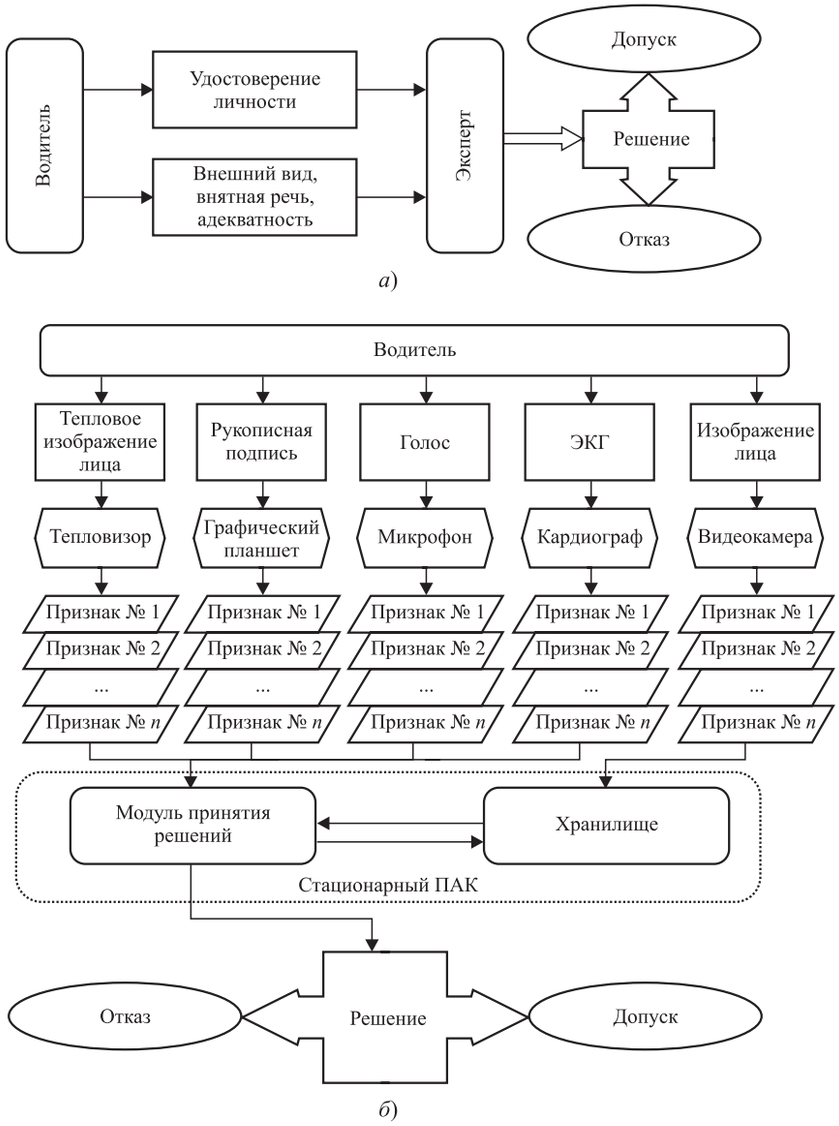

Рис. 1. Идентификация водителя и его ПФС перед началом работы:
а — идентификация и грубая оценка ПФС экспертом; *б* — оценка ПФС программно-аппаратным комплексом, формирование эталонных описаний биометрических признаков

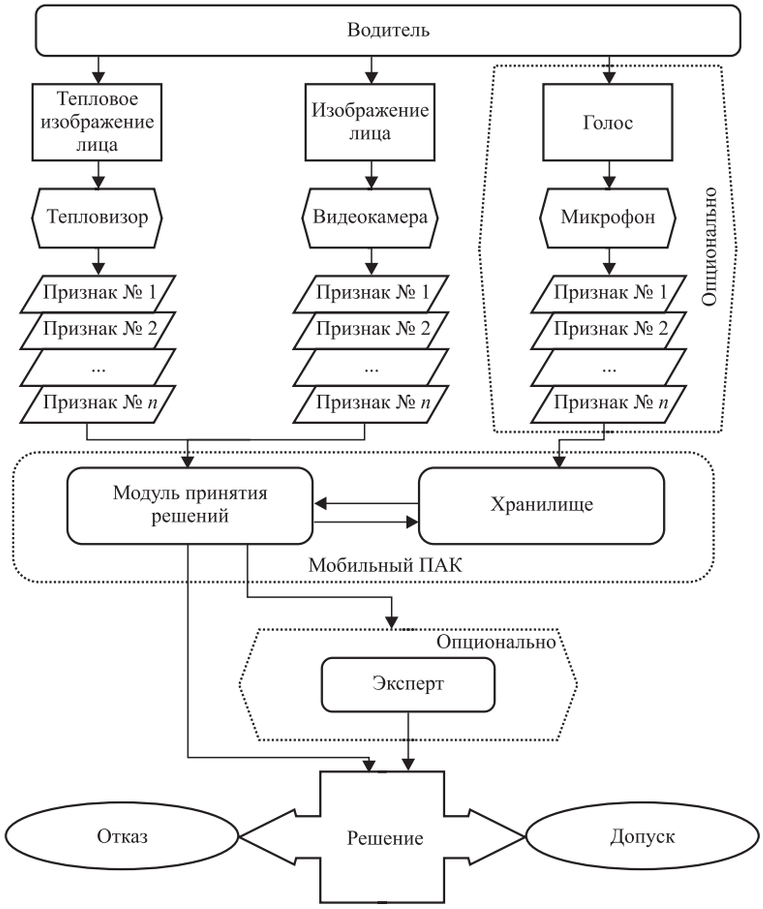

Рис. 2. Верификация водителя и идентификация его ПФС в процессе работы

жения профессиональной деятельности, выполняется одна из аварийных процедур (блокирование двигателя, включение звуковой и световой сигнализации для привлечения внимания, передача на стационарный ПАК текущих координат GPS и т. д.). Описанный процесс иллюстрируется на рис. 2.

Биометрические признаки. Подпись состоит из функций положения пера на планшете $x(t)$, $y(t)$ и давления пера на планшет $p(t)$, где t — время в дискретной форме. В качестве биометрических признаков подписи в настоящем исследовании апробированы следующие величины, характеризующие подписантов и предложенные в работе [7]:

расстояния между некоторыми точками подписи, нормированные по длине подписи, в трёхмерном пространстве (третье измерение — давление $p(t)$). Точки выбирают равномерно с определённым шагом;

некоторые характеристики статического изображения подписи: отношение длины подписи к её ширине, центр подписи, угол наклона подписи, угол наклона между центрами половин подписи;

нормированные по энергии амплитуды первых 16 (наиболее низкочастотных) гармоник функции скорости перемещения пера на планшете $v_{xy}(t)$ и функции давления пера на планшет $p(t)$. Первые 16 гармоник содержат более 95 % энергии сигналов $v_{xy}(t)$ и $p(t)$, что характерно для всех испытуемых;

коэффициенты корреляции между всеми парами функций подписи $x(t)$, $y(t)$, $p(t)$ и их производными $x'(t)$, $y'(t)$, $p'(t)$;

некоторые значения функций $x(t)$, $y(t)$ и $p(t)$, а также функции скорости перемещения пера на планшете $v_{xy}(t)$. Точки выбирают равномерно с некоторым шагом.

Процесс выделения признаков голоса основан на подходе, описанном в работе [8]. В качестве параметров голоса используются:

характеристики интегральной частоты фрагментов речевого сигнала (нулевой формант);

характеристики интегральной частоты переходов речевого сигнала через огибающую энергии;

частотные характеристики уровня положительного и отрицательного давления;

коэффициенты корреляции характеристик интегральной частоты сигнала и переходов речевого сигнала через огибающую энергии;

коэффициенты корреляции частотных характеристик уровней положительного и отрицательного давления.

В качестве параметров лиц использовались признаки, предложенные в работе [9]: площадь, длина и ширина лба, глаз, носа, губ, ушей, расстояния между ними, параметры тремора головы и др.

Сердечно-сосудистая система является одним из основных маркеров для оценки текущего ПФС или изменения данного состояния. Для изучения изменения колебательных процессов, происходящих в сердечно-сосудистой системе, используются различные методы: электрокардиография (ЭКГ), реовазография (РВГ), лазерная допплеровская флоуметрия (ЛДФ). К перспективному подходу, с точки зрения его неинвазивной природы, возможности скрытого и дистанционного мониторинга состояния субъекта, многие исследова-

тели относят анализ тепловых изображений (термограмм) лица, рук, области шеи и т. д.

Натурные эксперименты с участием людей проводились в комнате, среднесуточная температура в которой не превышала 22 °С. Испытуемый размещался на специальном кресле, расположенном перед тепловизионной камерой на расстоянии 0,7 м, на фоне стены. Съёмка лица на тепловизор длилась несколько минут. Полученная в результате запись разбивалась на кадры. Прежде всего выделялась область лица на тепловом изображении. Для определения областей, которые относятся к участкам кожи лица и шеи испытуемого, был выбран температурный диапазон, соответствующий средним показателям температуры поверхности кожи человека. При выполнении этой операции цветное изображение переводилось в бинарное. В качестве признаков использовались характеристики теплового изображения лица, предложенные в работе [5]: коэффициенты корреляции между отдельными его частями, расположенными с левой и правой стороны (лицо разбивается на 6 участков), а также цветовые составляющие пикселей этих областей в соответствии с моделью RGB.

Последняя группа признаков, характеризующих ПФС, основана на анализе ЭКГ. В настоящее время большинство исследователей пользуется стандартами измерений физиологической интерпретации вариабельности сердечного ритма (ВСР), предложенными Европейским обществом кардиологии и Северо-Американским электрофизиологическим обществом [5]. В качестве таких признаков были выбраны:

показатели мощности спектра кардиоритма в низкочастотном и высокочастотном диапазонах (VLF, LF, HF);

полная мощность спектра (TP), мощность спектра кардиоритма в низкочастотном и высокочастотном диапазонах в процентном отношении к полной мощности (LFo, HFo);

отношение LF/HF, индекс централизации (IC), «индекс стресса» (ISp);

средняя частота сердечных сокращений (ChSS);

среднее значение RR-интервалов (RRsr), среднеквадратичное отклонение RR-интервалов;

количество пар последовательных интервалов NN, различающихся более чем на 50 мс (NN50);

коэффициент вариации (CV), индекс напряжения регуляторных систем (SI), коэффициент автокорреляции RR-интервалов после первого сдвига (C1).

В течение нескольких дней проводился эксперимент по формированию базы указанных признаков с привлечением 60 испытуемых, вводимых поочерёдно в следующие состояния (подтверждение «перехода» в соответствующее ПФС осуществлюсь на холтеровском мониторе «Кардиотехника-04»):

адекватное (или нормальное) состояние. В данном состоянии субъект не подвергался каким-либо воздействиям. Эксперимент проводился в начале рабочего дня;

сонное состояние. Для имитации данного состояния участники принимали успокаивающие естественные растительные средства седативного действия, к которым относятся пустырник, мята, валериана, и прослушивали успокаивающую музыку;

опьянение. Испытуемый принимал алкоголь, дозировку которого рассчитывали по формуле Видмарка. Масса выпитого соответствовала количеству алкоголя в крови с концентрацией более 0,5 ‰, что превышает допустимый уровень концентрации алкоголя для водителей транспортных средств в России и приводит к статистически значимым изменениям ВСР.

Оценка эффективности верификации образа водителя с использованием сетей Пирсона—Хемминга и функционалов Хи-модуль. В соответствии с ГОСТ Р 52633.0—2011 для целей аутентификации рекомендуется использовать преобразователь «биометрия—код» на основе персептронов, обучаемых по детерминированному (не итерационному) абсолютно устойчивому алгоритму, предложенному в данном стандарте. Однако помимо персептронов возможно построение сетей нейронов на основе других функционалов, которые дают меньший процент ошибочных решений. Целесообразность использования тех или иных функционалов определяется особенностью пространства признаков (в частности, их взаимной корреляционной зависимостью [10]). На практике находят применение сети Пирсона—Хемминга [10], Евклида—Хемминга [7], Хи-модуль-сети [10], Байеса—Пирсона—Хемминга [7, 10] и др. В настоящей работе решено апробировать сеть нейронов на основе метрики Пирсона (1) [10] и Хи-модуль (2) [10], которые показали хорошие результаты, так как используемые признаки лица имеют низкую взаимную корреляционную зависимость (более 90 % признаков имеют коэффициент парной корреляции менее 0,3 по модулю).

Значение метрик (1) и (2) на выходе нейрона сравнивается с пороговым. Для каждого нейрона имеется своё оптимальное пороговое значение θ, которое подбирается исходя из произведения $\theta = \chi a$, где χ — максимальное значение функционала при поступлении на вход обучающих аутентичных примеров образа водителя; a — стабилизирующий коэффициент, экспериментально подбираемый для каждого пространства признаков в процессе вычислительного эксперимента (по аналогии с работой [7]):

$$\chi = \sum_{i=1}^{m} \sqrt{\frac{(E(v_i) - v_i)^2}{\sigma(v_i)}}; \quad (1)$$

$$\chi = \sum_{i=1}^{m} \frac{|E(v_i) - v_i|}{\sigma(v_i)}, \quad (2)$$

где v_i — i-й вход нейрона; $E(v_i)$ — математическое ожидание i-го входа нейрона; $\sigma(v_i)$ — среднеквадратичное отклонение i-го входа нейрона.

При превышении порога нейрон выдаёт единицу («1»), иначе нуль («0»).

Проведён вычислительный эксперимент, в ходе которого биометрические данные лица 60 субъектов подавались на вход сетей Пирсона—Хемминга и Хи-модуль—Хемминга. Параметры лица регистрировались в тепловом и видимом диапазонах излучений, когда испытуемые выполняли задания на специальном тренажёре водителя, находясь в нормальном (адекватном) психофизиологическом состоянии. Тестовое задание для каждого субъекта длилось 20 мин. Верификация испытуемого осуществлялась по вектору значений признаков, получаемому из одного кадра записи, на которой удавалось локализовать лицо. Для обучения сети использовалось по 21 кадру (вектору значений признаков) в соответствии с требованием ГОСТ Р 52633.5—2011 по обучению персептронов [7]. В процессе вычислительного эксперимента изменялись параметры сетей: количество нейронов и входов нейронов. Далее для каждого случая подсчитывалось количество ошибок 1-го и 2-го рода. Вероятности данных ошибок (FRR и FAR) вычисляли как отношение числа ошибок определённого рода к числу соответствующих опытов. Результаты представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, результаты верификации субъекта по лицу в видимом диапазоне излучений значительно превосходят аналогичные результаты с использованием параметров лица, регистрируемых в тепловом диапазоне. Объединение двух каналов не даёт ощутимого повышения надёжности принимаемых решений, поэтому на практике целесообразно интерпретировать решения по визуальному и тепловому каналам независимо, используя первый как основной, а последний как дополнительный в спорных случаях, например, если лицо водителя не удаётся локализовать по каким-либо причинам (из-за наличия маскирующих воздействий). Также следует отметить, что повышение размерности сети (увеличение количества нейронов) положительно сказывается на надёжности принимаемых сетью решений. Полученные результаты удовлетворяют требованиям практики.

Оценка эффективности идентификации ПФС водителя на основе формулы гипотез Байеса. При распознавании ПФС удобнее использовать стратегию Байеса, так как при этом не приходится выставлять ряд параметров, характерных для нейросетевого подхода: количество входов нейронов, расстояние Хемминга между генерируемым кодом и верным.

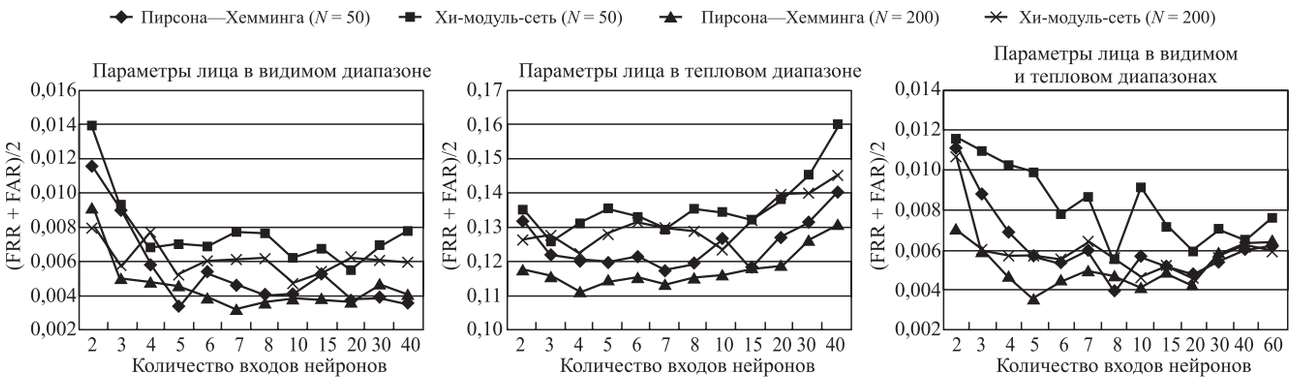

Рис. 3. Вероятности ошибок верификации водителей в реальном времени по параметрам лица на основе различных сетей из разного количества искусственных нейронов на базе различных функционалов

Оптимальные значения этих параметров нужно определять отдельно для каждого субъекта, исходя из вычислительного эксперимента, что на практике реализовать весьма проблематично. В режиме верификации водителя эти параметры допустимо задать интегрально для всех пользователей системы, так как вероятности ошибок и их разброс для различных субъектов в данном случае значительно ниже, чем в случае распознавания состояний. Интегральные оценки близости предъявляемого на этапе идентификации образца к эталонам ПФС водителя можно получить путём многократного применения правила Байеса [9] за некоторое число шагов, равное количеству признаков. Изначально создаются эталоны всех распознаваемых состояний для каждого конкретного водителя. Всякому эталону ПФС водителя, находящегося в процессе управления автомобилем, ставится в соответствие гипотеза. На каждом шаге по формуле (1) рассчитывают апостериорные вероятности гипотез с учётом значения одного из признаков, при этом за априорную вероятность гипотезы принимается её апостериорная вероятность, вычисленная на предыдущем шаге. На первом шаге все гипотезы равновероятны: $P(H_i|A_0) = n^{-1}$, где n — количество гипотез (в данном случае всегда $n = 3$). На последнем шаге предпочтение отдаётся гипотезе с максимальной апостериорной вероятностью:

$$P(H_i|A_j) = \frac{P(H_i|A_{j-1})P(A_j|H_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(H_i|A_{j-1})P(A_j|H_i)}, \qquad (3)$$

где $P(H_i|A_j)$ — апостериорная вероятность i-й гипотезы, вычисляемая на j-м шаге при поступлении j-го признака; $P(A_j|H_i)$ — условная вероятность i-й гипотезы на j-м шаге (равна плотности вероятности признака A_j, полученной из параметров i-го эталона).

Проведён вычислительный эксперимент, в ходе которого биометрические данные 60 испытуемых, полученные в нормальном (адекватном) состоянии, а также состоянии сна (после употребления снотворного) и лёгкого алкогольного опьянения (концентрация алкоголя в крови от 0,5 до 1 ‰), подавались на вход метода последовательного применения формулы гипотез Байеса. Имитировался процесс распознавания указанных ПФС субъектов до (предрейсовый осмотр) и после вождения. В первом случае для идентификации ПФС используются следующие группы признаков (параметры):

вариабельности сердечного ритма субъектов;
голоса субъектов;
подписи субъектов;
теплового изображения лица субъектов.

Во втором случае могут быть использованы только две группы признаков (параметры):

теплового изображения лица субъектов;
голоса субъектов.

Биометрические признаки регистрировались, когда испытуемые выполняли задания, находясь в соответствующем психофизиологическом состоянии. Идентификация ПФС осуществлялась отдельно для каждого испытуемого по вектору значений признаков, получаемому из одного образца биометрических данных, под которыми подразумеваются: одна подпись, 8—12 с непрерывной речи произвольного содержания, тепловое изображение лица или 5 мин записи ЭКГ. Для создания эталона ПФС субъекта использовалось по 21 образцу (вектору значений признаков) аналогично предыдущему эксперименту. Для каждого испытуемого определяли количество ошибок. За ошибку принимали ситуацию, когда неверная гипотеза имела максимальную апостериорную вероятность на последнем шаге принятия решений стратегии Байеса. Вероятность ошибки для каждого субъекта вычисляли как отношение числа ошибок на последнем шаге стратегии Байеса к общему количеству опытов. Далее определяли среднее значение *Mx* вероятностей ошибок для всех испытуемых, а также среднеквадратичное отклонение *Sx* данных вероятностей. Результаты представлены на рис. 4.

Как можно видеть на рис. 4, объединение независимых групп признаков не всегда даёт

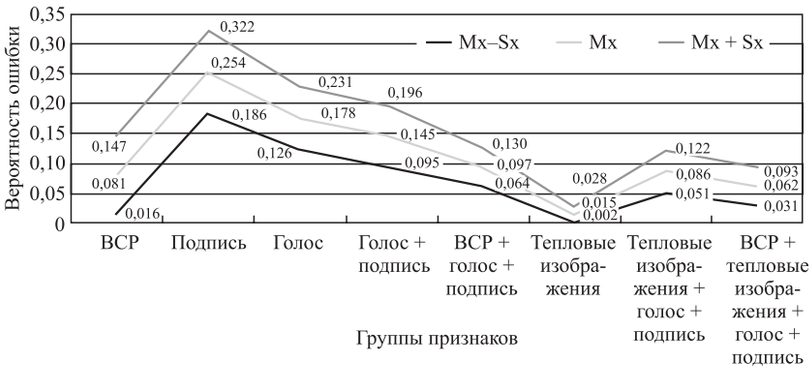

Рис. 4. Средние вероятности ошибок идентификации ПФС водителей по различным биометрическим признакам и разброс их значений

преимущества по снижению ошибочных решений. При соблюдении всех условий для мониторинга температуры в помещении достаточно воспользоваться тепловизором для оценки ПФС субъекта, так как вероятность ошибок в этом случае наименьшая.

Заключение. В процессе работы сформирована оптимальная структура системы идентификации водителей транспортных средств и их психофизиологического состояния. Наилучшие результаты по верификации водителей в пространстве признаков лица получены:

в видимом диапазоне излучений (FRR = = 0,004 и FAR = 0,002) в сети Пирсона—Хемминга с 200 нейронами и 7 входами нейронов;

в тепловом диапазоне излучений (FRR = = 0,114 и FAR = 0,107) в сети Пирсона—Хемминга с 200 нейронами и 4 входами нейронов;

в видимом и тепловом диапазонах излучений (FRR = 0,002 и FAR = 0,004) в сети Пирсона—Хемминга с 200 нейронами и 5 входами нейронов.

Тенденция к уменьшению размеров тепловизионных систем и снижение их стоимости, наблюдаемые в последние годы, позволяют применять их для решения задачи определения ПФС субъектов. Исследованы параметры тепловых изображений лиц, характеризующие субъектов и их ПФС. Дополнительно проведено исследование параметров подписи и голоса субъектов. Получены результаты по идентификации трёх психофизиологических состояний (нормальное, сонное, опьянение) водителей транспортных средств на основе реальных биометрических данных 60 испытуемых с достоверностью 0,99. Количество ошибок идентификации ПФС в зависимости от используемых признаков для различных субъектов составило:

по вариабельности сердечного ритма от 1,6 до 14,7 %;

параметрам голоса и подписи от 9,5 до 19,6 %;

тепловым изображениям лица от 0,2 до 2,8 %.

Работа выполнена по заданию и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 541 на 2016 г.

Библиографические ссылки

1. **Ротенберг Р.В.** Основы надёжности системы водитель—автомобиль—дорога—среда. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

2. **Герус С.В.** Система мониторинга состояния водителя и безопасность на автомобильном транспорте / С.В. Герус, В.В. Дементиенко, В.М. Шахнарович // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2003. № 8. С. 46—52.

3. **Козловский А.И.** Обзор автомобильных систем оперативного контроля состояния водителя. Результаты собственных исследований // Электрон. науч. изд. «Науковедение». 2013. Вып. 6 (19). С. 1—12. Режим доступа: http://naukovedenie.ru, свободный (дата обращения: 10.12.2016).

4. **Пилкин В.Е., Пилкин В.Е.** Устройство для предотвращения сна водителя за рулём // Патент России № 2413633. 2011. Бюл. № 7.

5. **Епифанцев Б.Н.** Скрытая идентификация психофизиологического состояния человека-оператора в процессе профессиональной деятельности: моногр. / Б.Н. Епифанцев. Омск: Изд-во СибАДИ, 2013. 198 с.

6. **Епифанцев Б.Н., Ложников П.С., Сулавко А.Е., Жумажанова С.С.** Идентификационный потенциал рукописных паролей в процессе их воспроизведения // Автометрия. 2016. № 3. С. 28—36.

7. **Ложников П.С., Сулавко А.Е., Ерёменко А.В., Волков Д.А.** Экспериментальная оценка надёжности верификации подписи сетями квадратичных форм, нечёткими экстракторами и персептронами // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 73—85.

8. **Сулавко А.Е., Ерёменко А.В., Борисов Р.В.** Генерация криптографических ключей на основе голосовых сообщений // Прикладная информатика. 2016. № 5. С. 76—89.

9. **Васильев В.И., Ложников П.С., Сулавко А.Е., Жумажанова С.С.** Оценка идентификационных возможностей биометрических признаков от стандартного периферийного оборудования // Вопросы защиты информации. 2016. № 1. С. 12—20.

10. **Иванов А.И., Ложников П.С., Качайкин Е.И., Сулавко А.Е.** Биометрическая идентификация рукописных образов с использованием корреляционного аналога правила Байеса // Вопросы защиты информации. 2015. № 3. С. 48—54.

Уважаемые читатели!

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

УДК 675.03.031.81:577.15

А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф., **Е.В. Чернышова, Е.В. Быстрянцев, В.С. Логойда**
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)

elenabok@mail

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Существует множество различных показателей, характеризующих систему информационного обеспечения, что свидетельствует о разносторонней деятельности этой системы. Для возможности сопоставления статистических данных о функционировании системы автомобильного транспорта и его информационного обеспечения в данной статье рассмотрены соответствующие параметры информационного обеспечения, оказывающего оптимальное воздействие на автомобильный транспорт, определены некоторые вновь введённые коэффициенты и понятия, рассмотрена их физическая сущность. На основании предварительного исследования выведена закономерность взаимодействия параметров рассматриваемых контуров автомобильного транспорта, системы управления информационным обеспечением, составлена методика определения оптимальных параметров информационного обеспечения.

Ключевые слова: дорожное проектирование; информационное обеспечение; транспорт; автоматизированные системы управления.

There are many different indicators that characterize the information support system, which indicates the versatile activity of this system. The relevant parameters of information ensuring, which has the optimal impact on road transport, are considered for the possibility of comparing statistical data over the functioning of the motor transport system and its information ensuring. Some newly introduced coefficients and concepts are indicated and their physical essence is considered. The parameters interaction regularity of the considered motor transport contours and control systems of the information support is concluded based on the preliminary study. The methodology for determining the optimal parameters of information support is made.

Keywords: road design; information support; transport; automated control systems.

Определение параметров информационного обеспечения сопряжено с большими трудностями, так как не существует общей теории определения и выбора его характеристик. В практической деятельности специалист вынужден выбирать эти характеристики интуитивно, иногда используя некоторые рекомендации (как правило, также составленные на основе интуиции). Задача определения параметров информационного обеспечения может быть решена в результате использования системного подхода к классификации параметров и исследованию взаимосвязей между ними.

Количество средств информационного обеспечения автомобильного транспорта определяется количеством работающих в системе автомобильного транспорта, объёмами транспортной работы, достижениями научно-технического прогресса. Степень воздействия информационного обеспечения на систему автомобильного транспорта может быть определена с помощью коэффициента полезного действия (КПД). КПД информационного обеспечения характеризуется многофакторностью. Определим его как произведение нескольких факторов (коэффициентов):

$$\eta = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6,$$

где η — коэффициент полезного действия; K_1 — коэффициент качества информационного обеспечения; K_2 — коэффициент удовлетворения спроса; K_3 — коэффициент реализации; K_4 — коэффициент читаемости; K_5 — коэффициент читательской ориентации; K_6 — коэффициент специализации средств информационного обеспечения.

Физическая сущность η заключается в том, что его уменьшение связано с усложнением процессов управления автомобильным транспортом, ухудшением качества подготовки кадров, качества эффективности автомобильного транспорта. Эта связь существует между изменением численности работающих по направлениям автомобилизации, количеством учебных часов программ, количеством специальностей, объёмом информационного обеспечения [1]. Рассмотрим каждый элемент отдельно.

Коэффициент качества K_1 определяет степень соответствия системы информационно-

го обеспечения уровню развития научно-технического прогресса в исследуемый момент времени. Его можно вычислить с помощью оценочно-определительной таблицы, разделив полученную сумму оценок по всем видам информационного обеспечения на максимально возможную сумму:

$$K_1 = \frac{\sum O_{\text{факт}}}{\sum O_{\text{макс}}},$$

где $\Sigma O_{\text{факт}}$— полученная по оценочно-определительным таблицам сумма оценок; $\Sigma O_{\text{макс}}$ — максимально возможная сумма оценок.

Коэффициенты удовлетворения спроса K_2 и реализации K_3 подробно рассмотрены в работе [2].

Коэффициент читаемости K_4 показывает долю работников автомобильного транспорта, ознакомившихся с передовыми методами, излагаемыми в средствах информационного обеспечения. Приближённо его можно рассчитать, проанализировав заказы и производство средств информационного обеспечения. Поясним сказанное на примере. Учебник водителя 3-го класса вышел тиражом 300 тыс. экз., из них целевым назначением для библиотек — 100 тыс. экз. Кроме того, на учебник поступило 1,6 млн заявок. Так как курс обучения водителя составляет 6 мес., то за год по одному учебнику, взятому в библиотеке, будут заниматься два ученика, т. е. 200 тыс. чел., столько же учебников купят ученики. Таким образом,

$$K_4 = \frac{1\,600\,000}{400\,000} = 4.$$

По данным государственной публичной библиотеки, каждую техническую книгу читает 5...15 чел. в год (в среднем 10 чел.). Обычно 15 % тиража технических книг поступает в библиотеки страны, тогда

$$K_4 = \frac{N}{0,85\text{Т} + 0,15\text{Т} \cdot 10} = \frac{N}{2,35\text{Т}},$$

где Т — тираж; N — количество заявок.

В расчётах исходили из предпосылки, что если человек подал заявку на книгу, то она ему действительно нужна.

Коэффициент читательской ориентации K_5 введён в формулу, так как он учитывает различный уровень подготовки специалистов и их квалификации, а следовательно, различную степень воздействия на производительность труда и другие важнейшие показатели функционирования автомобильного транспорта.

Коэффициент специализации K_6 представляет собой отношение количества средств информационного обеспечения, находящихся под контролем автомобилистов, ко всем производимым источникам в стране.

Важнейшей характеристикой системы информационного обеспечения является время задержки поступления средств информации потребителю. Это время можно определить по формуле

$$\text{Т} = \text{Т}_1 + \text{Т}_2 + \text{Т}_3 + \text{Т}_4 + \text{Т}_5 + \text{Т}_6,$$

где Т_1 — время неосведомлённости; Т_2 — время серийного внедрения новшества (для учебников время составления программ); Т_3 — время написания рукописи; Т_4 — время издательского процесса; Т_5 — время типографического процесса; Т_6 — время реализации.

Время неосведомлённости Т_1 зависит от качества основных связей автомобильного транспорта с организациями, производящими средства информационного обеспечения. Для уменьшения времени неосведомлённости работа по производству средств информационного обеспечения должна по возможности опережать серийный выпуск технических средств, так как до начала их эксплуатации необходима соответствующая квалифицированная подготовка специалистов. В специализированных издательствах время неосведомлённости, как правило, минимальное.

Увеличение этого времени выше верхней границы вызывает потери экономического, технического и социального характера, например, когда выпуск средств информационного обеспечения производится после их морального или материального старения [3]. Уменьшение времени ниже минимального значения также ведёт к потерям, которые вызываются увеличением расходов на ускоренное производство. Более того, возможно снижение качества средств информационного обеспечения, которое может отразиться на транспортном процессе.

Как показывают авторские исследования, при планировании следует провести условное, но чёткое разделение между материалами информационного обеспечения, предназначенными для специалистов автомобильного транспорта и автолюбителей. Такое разделение учитывается в настоящее время при производстве средств информационного обеспечения. Однако оно практически не учитывается при планировании и выделении материальных фондов, а это, как показало проведённое исследование, существенно отражается на информационном обеспечении специалистов.

Обычно автолюбителю нужны производственно-техническая информация с изложением устройства, технического обслуживания и текущего ремонта определённой модели легкового автомобиля, каталог запасных частей, книги с описанием мастерства вождения автомобиля, комментарии к правилам дорожного движения и научно-популярная литература.

При выводе формул для расчёта параметров информационного обеспечения автолюбителей следует исходить из количества автолюбителей в стране, количества эксплуатирующихся и базовых моделей автомобилей, срока службы одного автомобиля, срока морального и физического старения как транспортных средств, так и средств информационного обеспечения.

У специалистов автомобильного транспорта круг проблем информационного обеспечения значительно шире. Для облегчения разработки рекомендаций по планированию его условно можно разделить на учебники, производственно-техническую литературу, справочники, научно-исследовательскую литературу, плакаты и нормативную документацию. Исследования показали, что кроме рекомендаций по определению общего количества тем, объёма и тиража следует определить основные показатели информационного обеспечения по указанным разделам. Только в этом случае можно будет заранее предусмотреть оптимальные пропорции, отвечающие задачам функционирования автомобильного транспорта.

Рассмотрим сначала характеристики информационного обеспечения специалистов автомобильного транспорта. Наиболее трудным является определение оптимальных количественных показателей информации. В принципе, количество названий книг, брошюр, плакатов должно быть соизмеримо для всех видов транспорта, так как количество специальностей на всех видах транспорта не сильно отличается, а именно, количество специальностей и номенклатура транспортных средств и оборудования должны определять тематическую направленность.

Несколько проще обстоит дело с определением количества названий учебников и учебных пособий. Это количество должно, прежде всего, соответствовать количеству специальностей и среднему количеству дисциплин (предметов) в специальности. Определять количество учебников как для высших, так и для средних специальных учебных заведений предлагается по формуле

$$Н_{уч} = ΣСД,$$

где С — количество специальностей в автомобильных вузах и техникумах; Д — среднее количество дисциплин (предметов) в специальности.

Количество учебников для кадров массовых профессий должно соответствовать количеству специальностей с учётом тарифно-квалификационной характеристики.

Сложнее обстоит дело с определением количества производственно-технических книг, справочников, плакатов и нормативной документации. Эти виды информационного обеспечения следует рассматривать совместно, так как они соизмеримы, тесно связаны между собой и дополняют друг друга. Чтобы точно определить их количество, следует проанализировать приоритетные направления развития автомобильного транспорта, предусмотреть распределение кадров специалистов всех категорий, исследовать выпуск книг за предыдущие несколько лет и учесть спрос на информационные материалы.

Количество производственно-технической информации для специалистов автомобильного транспорта следует определять при составлении перспективного плана после того, как получены заключения от всех заинтересованных организаций. При этом все темы обработаны, исключены дублирующие друг друга, объединены близкие по содержанию, т. е. определены главные направления развития автомобильного транспорта (экономика, учёт, отчётность, планирование, новые базовые конструкции автомобилей и т. д.). Окончательное количество предполагаемых тем в году можно определить по формуле

$$Н = \frac{nK_{п}K_{н}K_{т}}{n_{п}},$$

где n — количество тем (направлений) развития автомобилизации; $K_{п} = 1{,}05$ — коэффициент перекрытия с учётом надёжности функционирования системы обучения; $K_{н} = 1{,}05$ — коэффициент неосведомлённости, учитывающий выборочность рассылки проекта тематического плана, неосведомлённость отдельных организаций в работе смежных подразделений; $K_{т} = 1{,}2$ — коэффициент, учитывающий появление новых тем в ближайшем будущем с учётом развития научно-технического прогресса; $n_{п}$ — планируемый период в годах.

Количество тем справочников, научно-исследовательской литературы, плакатов, нормативной документации определяется по этой же формуле.

Однако не всегда определённые с помощью данных изучения спроса или справочно-определительных таблиц темы следует на-

чинать разрабатывать вновь. Иногда по этой теме уже издавались книги, и тогда бывает целесообразно книгу переиздать. При этом следует оценить, каким успехом пользовалась книга, проверить опубликованность тематических материалов в периодической печати.

Количество изданий можно определить по формуле

$$П = \frac{С_8}{С_к},$$

где $С_8$ — срок (продолжительность) актуальности темы в годах; $С_к$ — срок службы книги в годах.

Если тираж предыдущего издания книги определён верно, срок службы книги устанавливают либо по физическому сроку службы, либо по моральному. В данном случае вступает в силу экономическая и техническая политика автотранспортных организаций и издательств [4]. Например, внедрение новой технологии производства, изменение учебной программы и другие причины требуют переиздания книги, так как продолжение эксплуатации старой может привести к значительному моральному или материальному ущербу.

Если же тираж предыдущего издания был установлен неверно, периодичность переиздания не будет подчиняться закону, определяемому указанной формулой. Так, при заниженном тираже книги реализуются чрезвычайно быстро и потребность в них не будет удовлетворена, поэтому компенсировать ущерб от недостатка информации можно лишь при условии быстрейшего переиздания книги; при завышенном тираже книга не будет реализована. В данном случае издательство понесёт прямые убытки, и может возникнуть неправильное представление о компетентности автора и актуальности темы.

Срок актуальности темы $С_а$ определяется в каждом отдельном случае в зависимости от конкретных условий. Например, при расчёте количества изданий книг по конструкции автомобиля в числителе следует указать срок службы автомобиля, при расчёте изданий учебников — срок службы программы, по которой написан учебник и т. д.

Количество названий книг для автолюбителей $Н_{ка}$ по конструкции, техническому обслуживанию и текущему ремонту автомобилей целесообразно определять по следующей формуле:

$$Н_{ка} = \sum Н_{ба} \frac{С_{са}}{С_к} K_м K_в = \sum НП,$$

где $Н_{ба}$ — количество базовых моделей легковых автомобилей; $С_{са}$ — срок службы автомобиля в годах; $С_к$ — срок службы книги в годах; $K_м$ = = 1,2...1,3 — коэффициент модернизации автомобилей; $K_в$ = 1,2...1,3 — коэффициент, учитывающий смену владельца автомобиля.

К каталогам запасных частей автолюбители обращаются довольно редко, поэтому износ их незначителен и срок службы можно условно приравнять к сроку службы автомобиля.

Заключение. При определении производительности рабочих, машин и оборудования важнейшую роль играет понятие коэффициента полезного действия. Очевидно, КПД применительно к системе информационного обеспечения означает отношение количества информации, которое должен нести её источник, к тому количеству, которое доводится до работника автомобильного транспорта. Справочники несут большой объём удельной информации, несколько меньше — научно-исследовательская литература и меньше всего — учебники. Объясняется это, прежде всего, читательской ориентацией. Так, справочники и монографии предназначены для специалистов высокой квалификации, поэтому и материал в них даётся в сжатом, сконцентрированном виде, учебники — для людей, лишь поверхностно знакомых со спецификой отрасли. Материал в них излагается в доходчивой форме, порой с многочисленными примерами и «лирическими» отступлениями. Естественно, при такой качественной оценке допускается некоторое уменьшение информации.

Библиографические ссылки

1. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Прокофьев О.Е.** Построение дискретной макромодели для безмасштабной сети. Матер. II междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные подходы и современная наука». Киев: Центр научных публикаций, 2016. С. 128—132.

2. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Ширинкин Н.В., Стукалов Р.В.** Исследование задач проектирования комплексного технического обеспечения и обобщенная модель их решения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Воронеж: ВГУИТ, 2015. № 4 (66). С. 93—98.

3. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Рябцева С.А.** Автоматизация поиска принципов действия технических систем // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 12—15.

4. **Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Zemlyanukhin M.Yu.** Firewall as a tool of implementation of security policy. Science and education: materials of the viii international research and practice. Conference, Munich, march 19—20 th, 2015 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg —Munich — Germany, 2015. С. 345—350.