Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

11

2016

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»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
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 — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

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

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

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2016

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Хряков К.С., Сорокин П.А., Хоммерс М., Мишин А.В. Способ обеспечения устойчивости гоночных автомобилей при прохождении поворотов 3

Ничков А.В. Оптимизация конструктивных элементов червячной модульной фрезы при заданных параметрах нарезаемого зубчатого колеса 7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Долотовский И.В., Ленькова А.В. Алгоритмы структурно-параметрической оптимизации энергетического комплекса предприятий подготовки и транспортирования углеводородов 10

Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Ермоленко В.В. Концепция построения компьютерных баз данных по физическим эффектам 16

Кучеренко П.А., Соколов С.В. Обобщённые вероятностные критерии в задаче идентификации структуры дискретных динамических объектов 20

Нгуен Динь Тхай. Разработка критерия оценивания эффективности комплексной обработки навигационной информации 28

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Пестерев Е.В., Клюшин Я.Г. Формирование и обработка многомерных данных в задачах принятия решения 32

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Лобусов Е.С., Хоанг Мань Тыонг. Измерение овальности труб большого диаметра инерциальными средствами . . . 38

Микаева С.А., Микаева А.С., Ашрятов А.А., Вишневский С.А. Разработка световых приборов с изменяемым спектром излучения 43

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Khryakov K.S., Sorokin P.A., Khommers M., Mishin A.V. The ensuring method of competition cars cornering stability 3

Nichkov A.V. The design elements optimization of the modular hob at the given parameters of the gear cutting 7

MODERN TECHNOLOGY

Dolotovskiy I.V., Len'kova A.V. The structural and parametric optimization algorithms of the energy complex enterprises for hydrocarbon preparation and transportation 10

Ckrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Ermolenko V.V. Concept of computer databases construction on the physical effects 16

Kucherenko P.A., Sokolov S.V. Generalized probabilistic criteria in the structure identification task of discrete dynamic objects 20

Nguen Din Tkhay. The evaluation criteria development of the navigation information complex treatment efficiency 28

INFORMATION TECHNOLOGY

Pesterev E.V., Klyushin Ya.G. Shaping and processing of multidimensional data in the tasks of decision making . . . 32

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Lobusov E.S., Khoang Man Tyong. Ovality measurement of large diameter pipes by using the inertial means . . . 38

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Ashryatov A.A., Vishnevskiy S.A. Development of lighting devices with variable emission spectrum 43

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по 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 01.09.2016.
Подписано в печать 20.10.2016.
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", 2016

УДК 629.371.21

К.С. Хряков, П.А. Сорокин, д-р техн. наук, проф., **М. Хоммерс, А.В. Мишин,** канд. техн. наук
(Московский государственный университет путей сообщения)

kirill-khryakov@mail.ru

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОНОЧНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПОВОРОТОВ

Рассмотрены проблемы сохранения высокой скорости гоночного автомобиля при прохождении поворотов, вызванные перераспределением веса гоночного автомобиля между его колёсами. Предложен способ активного управления закрылками антикрыльев, позволяющий компенсировать негативное влияние перераспределения веса гоночного автомобиля на его скорость.

Ключевые слова: гоночный автомобиль; способ обеспечения устойчивости; недостаточная поворачиваемость; избыточная поворачиваемость; закрылки антикрыльев.

The problems of the competition car high-speed preservation at turn passing resulting from the redistribution of the competition car weight between its wheels are considered. The method for wing flaps splashers active control, allows to compensate the negative impact of the competition car weight redistribution on its speed is proposed.

Keywords: racing car; stability ensuring methode; understeering; oversteering; flaps splasher.

Большинство автодромов, предназначенных для кольцевых гонок, представляют собой сложную комбинацию прямолинейных участков трассы, соединённых между собой кривыми различного радиуса.

При езде по таким трассам в гоночном режиме автомобиль ускоряется и тормозит, а установившееся движение почти отсутствует. При этом характеристики торможения определяются типом поворота, через который гоночному автомобилю предстоит пройти. Гонщики, пытаясь проехать круг за наименьшее время, стараются снижать скорость автомобиля до такой величины, при которой можно быстрее проехать поворот на грани срыва колёс в занос.

Вследствие изменения направления и величины продольного и поперечного ускорений масса гоночного автомобиля постоянно перераспределяется между его колёсами [1]. При ускорении часть массы гоночного автомобиля под действием сил инерции перемещается с передней на заднюю ось, увеличивая сцепление задних приводных колёс с дорожным полотном и улучшая разгонные характеристики гоночного автомобиля.

При торможении эффект от перераспределения массы играет неблагоприятную роль. Часть массы с задней оси перемещается на переднюю, разгружая задние колёса, что увеличивает риск их блокировки (скорость колёс близка к нулю) и снижает эффективность торможения.

При прохождении поворотов часть массы с внутренних (по отношению к центру радиуса поворота) колёс перемещается на внешние, ухудшая сцепление внутренних колёс с дорожным полотном. Дополнительная загрузка внешних колёс не компенсирует потерю сцепления внутренних. Это происходит из-за того, что при увеличении боковой нагрузки на шину, её сцепление с дорогой начинает снижаться [1, 2], поэтому при перемещении части массы гоночного автомобиля с внутренних колёс на внешние его суммарное сцепление с дорогой снижается.

При торможении и разгоне в поворотах возникают комбинации перечисленных явлений, приводящие к ассиметричному перераспределению массы между колёсами, что снижает максимально возможную скорость прохождения поворота.

Перераспределение массы между колёсами гоночного автомобиля во время езды по трассе негативно влияет на его устойчивость, вынуждая гонщика снижать максимальную потенциальную скорость автомобиля в поворотах [1].

На протяжении гонки характеристики гоночного автомобиля, а также внешние факторы постоянно изменяются, влияя на управляемость автомобиля.

В начале гонки баки автомобиля заполнены. Автомобиль имеет тенденцию к недостаточной поворачиваемости. Ближе к финишу баки пустеют, автомобиль становится лёгким

и приобретает тенденцию к недостаточной поворачиваемости.

Аналогичная ситуация возникает с износом шин. "Свежие" шины обеспечивают максимальный уровень сцепления и позволяют проходить повороты на больших скоростях. Изношенные шины значительно понижают скорость при прохождении поворотов вследствие недостатка сцепления. Изношенность задних шин на заднеприводных гоночных автомобилях приводит к возникновению избыточной поворачиваемости, что сильно снижает устойчивость гоночного автомобиля. После заезда на пит-стоп и замены изношенных шин на новые (не прогретые до оптимальной эксплуатационной температуры) гоночный автомобиль приобретает склонность к недостаточной поворачиваемости.

Такая резкая смена характеристики управляемости гоночного автомобиля требует определённое время на перестроение стиля вождения, в течение которого гонщик не в состоянии использовать весь потенциал автомобиля.

Влияние изменения погодных условий по ходу гонки оказывает негативный эффект на управляемость и устойчивость гоночного автомобиля.

Резкое изменение направления и/или скорости ветра приводит к изменению положения оптимальных точек начала торможения перед каждым поворотом. Если на длинной прямой стал дуть сильный встречный ветер, то перед поворотом в конце этой прямой можно отсрочить начало торможения до нескольких десятков метров, выиграв дополнительные десятые доли секунды. Однако во время гонки без связи с инженерами команды по радиоканалу гонщику сложно определить резкое изменение погодных условий, и он не всегда может к ним адаптироваться.

Наиболее неблагоприятная ситуация складывается при смене ветра со встречного на попутный или при сильном попутном ветре. В этом случае точка оптимального начала торможения смещается назад, что требует более раннего начала торможения. Гонщик, не уведомлённый об изменении погоды, проезжает оптимальную точку торможения и нажимает на педаль тормоза позже, выполняя торможение, как и до изменения скорости и направления ветра. В результате дистанция, зарезервированная для тормозного пути, оказывается недостаточной и гоночный автомобиль съезжает с оптимальной траектории, что приводит к потере времени. В этом случае также возможен вылет гоночного автомобиля с трассы и возникновение аварийной ситуации.

Если по ходу гонки начинает идти сильный дождь, то все гонщики заезжают на пит-стоп для смены сликов на специальные дождевые шины, обеспечивающие хороший отвод воды из пятна контакта и увеличение сцепления с дорогой.

В этом случае суммарный уровень сцепления гоночного автомобиля с дорожным полотном становится существенно ниже, чем при благоприятных погодных условиях. Гоночному автомобилю требуется больший уровень прижимной силы, однако антикрылья, настроенные на гонку в сухих погодных условиях, не могут обеспечить необходимого сцепления с дорогой. Гонщикам приходится продолжать гонку на трудноуправляемых и неустойчивых гоночных автомобилях. Это также не позволяет использовать весь потенциал гоночного автомобиля в дождевых условиях.

Вибрации антикрыльев и других аэродинамических элементов гоночных автомобилей снижают уровень прижимной силы, который мог бы быть сгенерирован этими аэродинамическими элементами в стационарных условиях.

В связи с этим становится актуальным проектирование системы автоматического управления параметрами гоночных автомобилей, которая обеспечит их устойчивость при движении в поворотах и улучшит управляемость в условиях постоянного изменения воздействий внешней среды и параметров самих гоночных автомобилей.

Сущность способа обеспечения устойчивости гоночных автомобилей в поворотах заключается в установке дополнительной системы автоматического управления, которая при изменении показателей устойчивости и управляемости будет вырабатывать воздействия на закрылки антикрыльев, создавая стабильность его движения.

Структурная схема предложенного способа приведена на рис. 1.

Основным элементом спроектированной системы управления является программируемый логический контроллер (далее ПЛК), в который поступает информация о движении гоночного автомобиля с датчиков, измеряющих следующие параметры: скорость гоночного автомобиля по ГЛОНАСС/GPS-сигналу, скорость каждого колеса, продольное и поперечное ускорение гоночного автомобиля, угол поворота руля и давление в тормозной системе.

Обрабатывая полученные входные сигналы с датчиков по определённому алгоритму, ПЛК вырабатывает управляющие воздействия на приводы механизмов изменения угла атаки закрылков антикрыльев.

Исходя из наиболее распространённой компоновки современных гоночных автомобилей формульного типа, управление осуществляется двумя закрылками переднего антикрыла, расположенными с его левой и правой стороны соответственно, и одним закрылком заднего антикрыла, расположенным вдоль всей его поверхности. При этом из-за большой длины заднего закрылка рационально использовать два привода, расположенных по его торцам и работающих синхронно [1].

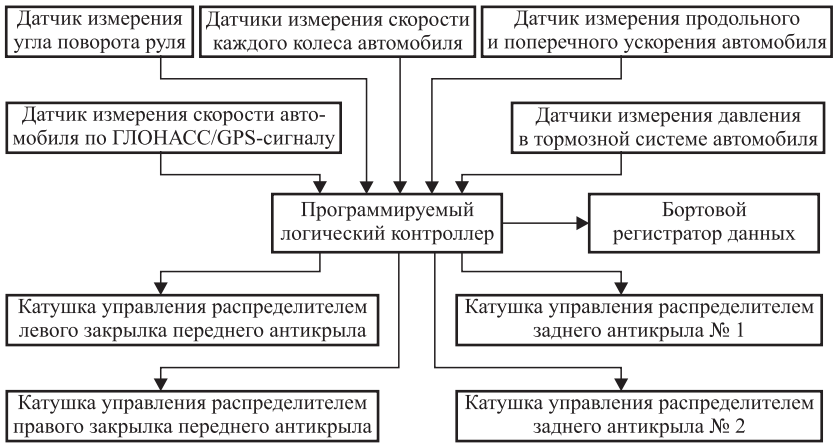


Рис. 1. Структурная схема способа обеспечения устойчивости гоночных автомобилей при прохождении поворотов на больших скоростях

Первая часть алгоритма ПЛК заключается в обеспечении устойчивого торможения перед поворотом. При торможении часть массы с задней оси автомобиля перемещается на переднюю ось. Задние колёса разгружаются, и эффективность их торможения снижается, при этом возникает риск их блокировки.

При нажатии гонщиком педали тормоза резко увеличивается давление в тормозной системе. Этот сигнал ПЛК рассматривает как начало торможения и увеличивает угол атаки заднего закрылка, в результате чего увеличивается прижимная сила на заднюю ось гоночного автомобиля. Это способствует увеличению сцепления колёс задней оси и повышению эффективности торможения. Увеличенный угол атаки заднего закрылка приводит к увеличению сопротивления движению, что также повышает эффективность торможения [3].

В процессе выполнения этой части алгоритма ПЛК постоянно отслеживается скорость задних колёс. В случае блокировки одного или двух задних колёс (скорость колёс близка к нулю) ПЛК дополнительно увеличивает угол атаки заднего закрылка для большего увеличения сцепления колёс задней оси с дорогой.

В момент, когда гоночный автомобиль начинает поворачивать, вступает в действие основная часть алгоритма ПЛК.

ПЛК отслеживает управляемость гоночного автомобиля в каждый момент времени и определяет, склонен ли автомобиль к нейтральной, недостаточной или избыточной поворачиваемости. На основе этого вырабатываются необходимые управляющие воздействия на приводы механизмов изменения угла атаки закрылков.

Для реализации этого алгоритма необходимо ввести понятие "теоретический угол поворота руля". Под этим понятием подразумевается угол поворота руля, необходимый для прохождения поворота определённой кривизны с определённой скоростью.

Для определения радиуса кривизны поворота в каждый момент времени используются сигналы с датчика измерения скорости по ГЛОНАСС/GPS-сигналу и с датчика измерения поперечного ускорения гоночного автомобиля.

Расчётная схема определения радиуса кривизны поворота R приведена на рис. 2.

Центростремительное ускорение a_n при движении по криволинейной траектории можно определить как

$$a_n = \frac{v_{\text{авт}}^2}{R}, \qquad (1)$$

где $v_{\text{авт}}$ — скорость гоночного автомобиля, измеренная по ГЛОНАСС/GPS-сигналу.

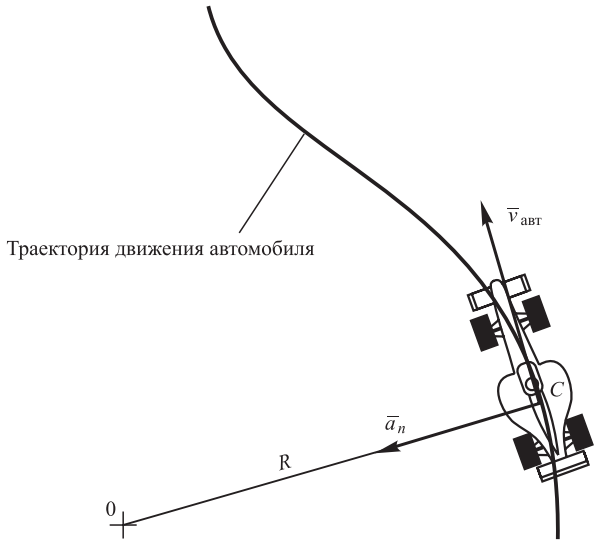


Рис. 2. Расчётная схема для определения радиуса кривизны поворота

Из выражения (1) радиус кривизны поворота R определяется как

$$R = \frac{v_{\text{авт}}^2}{a_n}. \qquad (2)$$

Радиус кривизны поворота, полученный по формуле (2), используется при определении теоретического угла поворота руля в каждый момент времени. При расчёте теоретического угла поворота руля используются также конструктивные параметры гоночного автомобиля.

Теоретический угол поворота руля $\alpha_{\text{теор}}$ можно определить по формуле:

$$\alpha_{\text{теор}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{L_{\text{авт}}}{R}\right)\frac{180}{\pi} i_{\text{рул.уп}}, \qquad (3)$$

где $L_{\text{авт}}$ — база гоночного автомобиля; $i_{\text{рул.уп}}$ — передаточное число механизма рулевого управления.

Теоретический угол поворота руля $\alpha_{\text{теор}}$ постоянно сравнивается с реальным углом поворота $\alpha_{\text{реал}}$, измеряемым датчиком поворота руля.

Гоночный автомобиль обладает нейтральной поворачиваемостью, если $\alpha_{\text{реал}} = \alpha_{\text{теор}}$. Угол поворота руля гонщиком $\alpha_{\text{реал}}$ соответствует углу $\alpha_{\text{теор}}$, необходимому и достаточному для выполнения поворота с заданной кривизной и при заданной скорости. В этом случае ПЛК не вырабатывает управляющих воздействий на приводы закрылков. Углы атаки остаются неизменными.

Гоночный автомобиль обладает недостаточной поворачиваемостью, если $\alpha_{\text{реал}} > \alpha_{\text{теор}}$. Гонщик поворачивает руль на больший угол, поскольку угол поворота, равный $\alpha_{\text{теор}}$, не позволяет сохранить автомобиль на оптимальной траектории. В этом случае необходимо активное управление.

Первоначально выполняется необходимое условие по величине общего ускорения гоночного автомобиля. Общее ускорение гоночного автомобиля a определяется как геометрическая сумма векторов продольного ускорения $\overline{a_\tau}$ и поперечного ускорения $\overline{a_n}$. Изменение углов атаки закрылков возможно только при условии, что $a > 1{,}5\ g$. При меньших значениях общего ускорения гоночного автомобиля не имеет смысла осуществлять активное управление.

При одновременном выполнении условий $\alpha_{\text{реал}} > \alpha_{\text{теор}}$ и $a > 1{,}5\ g$ ПЛК вырабатывает управляющие сигналы для компенсации недостаточной поворачиваемости.

Сначала начинает увеличиваться угол атаки внутреннего (по отношению к центру кривизны поворота) закрылка переднего антикрыла. Если при достижении максимального угла атаки закрылка заднего антикрыла $\alpha_{\text{реал}}$ всё ещё превышает $a_{\text{теор}}$, то тогда начинает увеличиваться угол атаки внешнего (по отношению к центру кривизны поворота) закрылка переднего антикрыла.

Если же и при достижении максимального угла атаки внешнего закрылка условие $\alpha_{\text{реал}} > a_{\text{теор}}$ продолжает выполняться, то можно сделать вывод, что меры по компенсации недостаточной поворачиваемости оказались неэффективными. Тогда возникает необходимость в сознательном изменении управляемости гоночного автомобиля в сторону избыточной поворачиваемости. В этом случае ПЛК вырабатывает управляющий сигнал на уменьшение угла атаки заднего закрылка, увеличенного при торможении перед поворотом.

Величина изменения угла атаки закрылков зависит от скорости гоночного автомобиля, измеряемой по ГЛОНАСС/GPS-сигналу. При прохождении высокоскоростных поворотов для компенсации недостаточной поворачиваемости достаточно лишь слегка увеличить угол внутреннего закрылка переднего антикрыла. В то время как в "медленных" поворотах с небольшим радиусом кривизны может возникнуть необходимость не только в увеличении углов атаки закрылков переднего антикрыла, но и в уменьшении угла атаки закрылка заднего антикрыла. Это объясняется уменьшением эффективности работы антикрыльев на низких скоростях [3, 4].

После выхода из поворота и приравнивания $a_{\text{реал}}$ с $a_{\text{теор}}$ ПЛК, управляя приводами, возвращает закрылки в исходную позицию, снижая лобовое сопротивление гоночного автомобиля.

Гоночный автомобиль обладает избыточной поворачиваемостью, если $\alpha_{\text{реал}} < \alpha_{\text{теор}}$. Гонщик поворачивает руль на меньший угол, поскольку угол поворота, равный $\alpha_{\text{теор}}$ может сорвать гоночный автомобиль в занос.

При выполнении условия $a > 1{,}5g$ ПЛК вырабатывает управляющие сигналы для компенсации избыточной поворачиваемости.

Сначала начинает увеличиваться угол атаки закрылка заднего антикрыла. Если при достижении максимального значения угла атаки закрылка заднего антикрыла $\alpha_{\text{реал}} < \alpha_{\text{теор}}$, то начинает уменьшаться угол атаки внешнего закрылка переднего антикрыла.

Если при достижении максимального угла атаки закрылка заднего антикрыла и минимального угла атаки внешнего закрылка перед-

него антикрыла условие $\alpha_{реал} < \alpha_{теор}$ продолжает выполняться, то начинается уменьшение угла атаки внутреннего закрылка переднего антикрыла.

После выхода из поворота закрылки возвращаются в исходную позицию.

При блокировке левого или правого переднего колеса на торможениях, по аналогии с блокировкой задних колёс, увеличивается угол атаки соответствующего закрылка переднего антикрыла. Это приводит к увеличению сцепления заблокированного колеса с дорогой и способствует его разблокировке. После этого, если выполняется условие $\alpha_{реал} = \alpha_{теор}$, закрылок возвращается в исходное положение.

Предложенный способ позволяет обеспечивать устойчивость и управляемость гоночных автомобилей в условиях изменения внешних воздействий и параметров самих гоночных автомобилей.

Одним из достоинств данного способа является существенное снижение риска возникновения избыточной поворачиваемости, которая может привести к срыву гоночного автомобиля в занос и созданию аварийной ситуации. Этот положительный эффект достигается за счёт увеличения сцепления колёс задней оси при увеличении угла атаки закрылка заднего антикрыла до начала поворота.

Библиографические ссылки

1. **Milliken W.F., Milliken D.L.** Race car vehicle dynamics. 3-rd printing. Warrendale: SAE International, 1995. 890 p.

2. **Pacejka H.B.** Tyre and vehicle dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 642 p.

3. **Katz J**. Race car dynamics: designing for speed. Cambridge: Bentley Publishers, 1995. 270 p.

4. **Benzing E.** Ali = Wings. Milano: Automobilia, 1991. 230 p.

УДК 621.9.02

А.В. Ничков, канд. техн. наук, доц.
(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

nav8080@rambler.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЧЕРВЯЧНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ЗАДАННЫХ ПАРАМЕТРАХ НАРЕЗАЕМОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Рассмотрена методика определения оптимальных параметров червячной модульной фрезы для достижения высокой производительности и минимальной себестоимости операции зубофрезерования конкретного зубчатого колеса.

Ключевые слова: зубофрезерование; червячная фреза; зубчатое колесо.

The optimal parameters determining methodology of the modular hob for achievement high performance and minimum cost at the specific gear hobbing is considered.

Keywords: gear hobbing; hob; gear.

В серийном и массовом производстве зубчатых колёс при заданных параметрах нарезаемого зубчатого колеса и зубофрезерного станка для достижения высокой производительности и минимальной себестоимости операции зубонарезания необходимо оптимизировать конструктивные элементы червячной фрезы (R_{ao} — радиус фрезы, мм; z_0 — количество стружечных канавок; $L_{фр}$ — длина фрезы, мм) и режимы резания (S_o — осевая подача, мм/об; v — скорость резания, м/мин).

В качестве независимых параметров при решении оптимизационной задачи выберем R_{ao} и z_0, так как режимные параметры S_o и v напрямую зависят от них. Последовательно и многократно варьируя параметрами R_{ao} и z_0 и используя некоторые функциональные характеристики процесса зубофрезерования [1] и стоимостные данные червячных фрез ОАО "СИЗ" (г. Екатеринбург), определим значения названных параметров, обеспечивающих минимальную себестоимость операции зубонарезания.

Для решения поставленной задачи разработана программа, в которой использованы функциональные зависимости, характеризующие процесс зубофрезерования, и факторы, его ограничивающие, а именно, $a_{доп}$ — допускаемая прочностью зуба фрезы толщина среза, мм;

$S_{\text{о max}}$ — наибольшая подача на станке, мм/об; $a_{\max}$ — максимальная толщина среза, мм; $\text{С}_{\text{и}}$ — стоимость червячной фрезы, руб.; $\text{С}_{\text{п}}$ — стоимость одной переточки фрезы, руб.; $\text{С}_{\text{о}}$ — стоимость отходов фрезы, руб.; i — количество переточек фрезы; $\text{Э}_{\text{и}}$ — затраты на эксплуатацию фрезы за период её стойкости, руб.; $T_{\text{э}}$ — стойкость экономическая, мин; $v_{T_{\text{э}}}$ — скорость резания при заданной стойкости, м/мин; n — частота вращения фрезы, об/мин; $N_{\text{р}}$ — мощность резания, кВт; $M_{\text{р}}$ — момент резания, кг·м; B — перемещение фрезы вдоль оси колеса; $t_{\text{о}}$ — основное время, мин; С — себестоимость операции зубофрезерования, руб./оп.

Вид этих функциональных зависимостей, характеризующих процесс зубонарезания, и последовательность их использования для определения $t_{\text{о}}$ и С представлены ниже для случая нарезания колеса из стали 18ХНМА по одной из технологических схем, а именно, направление витков фрезы и зубьев колеса одноимённое, осевая подача встречная:

$$a_{\text{доп}} = 0{,}16\sqrt{m}\,K_{\text{м}};$$

$$a_{\max} = a_{\text{доп}};$$

$$S_{\text{о}} = \left(\frac{a_{\max}}{5{,}83m^{0{,}8}z_1^{-0{,}42}R_{ao}^{-0{,}33}\left(\frac{\pi}{2}+\beta_1\right)^{0{,}6}z_0^{-1}z_{10}^{0{,}82}}\right)^2;$$

$$\text{С}_{\text{и}} = 1{,}5m^{0{,}24}R_{ao}^{1{,}0}L_{\text{фр}}^{0{,}92}z_0^{0{,}2}z_{10}^{0{,}16};$$

$$\text{С}_{\text{п}} = 1{,}18m^{0{,}56}L_{\text{фр}}^{0{,}8}z_0^{0{,}8}h_{\text{п}}^{0{,}8};$$

$$\text{С}_{\text{о}} = (0{,}03\text{—}0{,}05)\,\text{С}_{\text{и}};$$

$$i = \left(\frac{2\pi R_{ao}}{z_0} - \Delta\text{р}\right)\frac{1}{h_{\text{п}}};$$

$$\text{Э}_{\text{и}} = \frac{\text{С}_{\text{и}} + \text{С}_{\text{п}}i - \text{С}_{\text{о}}}{i+1};$$

$$T_{\text{э}} = \frac{1-m_1}{m_1}\left(t_{\text{см}} + \frac{\text{Э}_{\text{и}}}{\text{С}_{\text{р}}}\right);$$

$$v_{T_{\text{э}}} = 5{,}85\left(\frac{h_{\text{доп}} - h_{\text{нач}}}{T_{\text{э}}}\right)^{0{,}403} m^{-0{,}194}z_1^{0{,}214}R_{ao}^{0{,}492}\times$$

$$\times\left(\frac{\pi}{2}+\beta_1\right)^{1{,}774} S_{\text{о}}^{-0{,}314}z_0^{0{,}371}z_{10}^{-0{,}331}r^{0{,}1};$$

$$n = \frac{1000v}{2\pi R_{ao}};$$

$$N_{\text{р}} = 0{,}011m^{1{,}88}z_1^{0{,}1}R_{ao}^{-0{,}98}\left(\frac{\pi}{2}+\beta\right)S_{\text{о}}^{0{,}78}z_0^{0{,}23}z_{10}^{0{,}77}v_{T_{\text{э}}};$$

$$M_{\text{р}} = 6{,}12\frac{N_{\text{р}}R_{ao}}{v};$$

$$l_{\text{вр}} = 3{,}35m^{0{,}69}z_1^{0{,}14}R_{ao}^{0{,}26}\frac{\left(\frac{\pi}{2}-\beta_1\right)^{-0{,}88}}{\cos\beta_1}z_{10}^{0{,}08};$$

$$B = B_1 + l_{\text{вр}} + l_{\text{п.б}};$$

$$t_{\text{о}} = \frac{B}{S_{\text{о}}n}\left(\frac{z_1}{z_{10}} + \frac{S_{\text{о}}\sin\beta_1}{\pi m z_{10}}\right);$$

$$\text{С} = t_{\text{о}}\left(\text{С}_{\text{р}} + \text{С}_{\text{р}}\frac{t_{\text{см}}}{T_{\text{э}}} + \frac{\text{Э}_{\text{и}}}{T_{\text{э}}}\right),$$

где $K_{\text{м}}$ — поправочный коэффициент на обрабатываемый материал заготовки; Δp — часть окружного шага, при котором обеспечивается размещение стружки и прочность зубьев фрезы после всех переточек, мм; B_1 — ширина обода колеса, мм; $l_{\text{вр}}$ — путь врезания фрезы в заготовку, мм; $l_{\text{пб}}$ — путь перебега, мм [2]; β_1 — угол наклона зубьев колеса, рад; $\beta = \beta_1$ при $\beta_1 > 0{,}349$ и $\beta = 0{,}349$ при $\beta_1 \leqslant 0{,}349$; $r = 0{,}3\ m$ при $r \leqslant 2$, иначе $r = 2$; $t_{\text{см}}$ — время на смену инструмента, мин; $h_{\text{доп}}$ — допустимый износ зубьев фрезы, мм; $h_{\text{нач}}$ — начальный износ зубьев фрезы, мм.

В качестве примера практического применения представленной методики оптимизации параметров червячной фрезы и режимов резания для достижения минимальной себестоимости операции зубофрезерования в таблице приведены результаты промежуточных и окончательных (основное время и себестоимость операции) расчётов для случая нарезания зубчатого колеса с параметрами — модуль $m = 6$ мм, число нарезаемых зубьев $z_1 = 60$, угол наклона зубьев $\beta_1 = 20°$, ширина обода $B_1 = 60$ мм, материал — сталь 18ХНМА.

Диапазон варьирования параметрами фрезы после предварительных расчётов выбран следующим: $R_{ao} = 56$—90 мм, $z_{\text{о}} = 8$—12, $L_{\text{фр}} = 100$ мм. Величины остальных параметров, необходимых для решения поставленной задачи, выбраны следующими: $S_{\text{о max}} = 5$ мм/об, $h_{\text{доп}} = 1$ мм, $h_{\text{нач}} = 0{,}1$ мм, $m_1 = 0{,}403$ — показатель относительной стойкости, $K_{\text{м}} = 1$, $C_{\text{р}} = 10$ руб./мин — стоимость одной минуты работы станочника и станка, $N_{\text{ст}} = 7{,}5$ кВт — мощность главного привода станка.

Результаты вычислений приведены в таблице для всех значений z_0 и трёх значений

Результаты расчётов при определении оптимальных конструктивных элементов R_{ao} и z_0 червячной фрезы

R_{ao}, мм	56	75	90	56	75	90	56	75	90	56	75	90	56	75	90
z_0	8			9			10			11			12		
S_o, мм/об	3,3	4,0	4,6	4,2	5										
$C_и$, руб.	13540	18140	21760	13860	18570	22280	14160	18960	22760	14430	19330	23190	14680	19670	23600
$C_п$, руб.	676			743			808			872			935		
C_o, руб.	541	725	870	554	742	891	566	578	910	577	773	928	587	786	944
i	19	34	46	14	27	38	10	22	31	7	18	26	5	14	22
$Э_и$, руб.	1292	1154	1106	1581	1353	1272	1971	1565	1466	2495	1803	1665	3129	2132	1880
$T_э$, мин	236	215	208	278	245	233	336	276	261	414	311	291	507	360	323
v, м/мин	38,0	42,9	45,8	34,6	39,9	44,5	31,6	39,5	44,1	30,1	39,0	43,8	28,6	38,0	43,4
n, мин$^{-1}$	108	91	81	98	85	78	90	84	78	86	83	77	81	80	77
$N_р$, кВт	2,8	2,77	2,7	3,2	3,1	2,9	3,4	3,2	3,0	3,3	3,2	3,0	3,2	3,16	3,0
$M_р$, кг·м	25,3	29,6	32,6	31,2	35,8	36,0	36,5	36,7	36,8	37,3	37,5	37,6	38,0	38,3	38,4
$l_{вр}$, мм	52	56	59	52	56	59	52	56	59	52	56	59	52	56	59
B, мм	118	122	125	118	122	125	118	122	125	118	122	125	118	122	125
t_o, мин	19,6	19,8	20,2	17,0	17,3	19,0	15,7	17,5	19,2	16,5	17,7	19,3	18,2	18,2	19,5
С, руб./оп	328	332	339	285	290	319	264	293	321	277	297	324	305	305	327

R_{ao} = 56, 75 и 90 мм. Из таблицы видно, что в данном примере нет ограничений по мощности, числу оборотов шпинделя, а есть только ограничения по подаче для z = 8 и 9 из-за $a_{доп}$ = 0,392 мм.

Анализ табличных данных позволяет сделать следующие выводы. В таблице для каждого сочетания R_{ao} и z_0 приведены результаты расчёта всех параметров, представленных выше формулами и, наконец, основного времени t_o и себестоимости С операции зубофрезерования. Из таблицы видно, что при любом значении z_0 с ростом R_{ao} себестоимость С растёт, но её абсолютные значения изменяются немонотонно — сначала убывают при изменении z_0 от 8 до 9...10, а затем до z_0 = 12 растут. Наименьшим значение себестоимости операции зубофрезерования в данном примере оказалось при R_{ao} = 56 мм и z_0 = 10, а именно, С = 264 руб./оп. Аналогично изменению себестоимости изменяется и основное время, достигая минимума 15,7 мин при тех же параметрах фрезы, что и себестоимость. В исследованном диапазоне изменения конструктивных элементов фрезы себестоимость операции изменялась от 264 до 339 руб./оп (в 1,3 раза), а основное время — от 15,7 до 20,2 мин (в 1,3 раза).

При решении подобных задач иногда представляет интерес определение не только t_o и С, но и, например, количество Q нарезанных зубчатых колёс за период полного использования режущих способностей фрезы, которое определяется по формуле $Q = T_э(i + 1)/t_o$. В данном случае оказалось, что наибольшее значение Q достигается при R_{ao} = 90 мм и z_0 = 8...9, и отличается от наименьшего при R_{ao} = 56 мм и z_0 = 12 в 3 раза.

Представленная методика исследования процесса зубофрезерования позволяет определить оптимальные конструктивные элементы червячной фрезы и режимы резания для достижения минимальной себестоимости и высокой производительности при любом сочетании параметров зубофрезерования.

Библиографические ссылки

1. **Ничков А.Г.** Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колёс червячными фрезами: дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 1991. 566 с.

2. **Овумян Г.Г., Адам Я.И**. Справочник зубореза. М.: Машиностроение, 1983. 223 с.

УДК 620.92:662.6.001.57

И.В. Долотовский, канд. техн. наук, **А.В. Ленькова,** канд. техн. наук, доц.
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.)

dolotowsky@mail.ru

АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЙ ПОДГОТОВКИ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Предложены алгоритмы структурно-параметрической оптимизации энергетического комплекса предприятий подготовки и транспортирования углеводородов для декомпозиционно-поискового выбора технологических и конструктивных решений, реализующих принципы максимальной утилизации собственных ресурсов, и методика оценки их эффективности на основе комплексных и кумулятивного критериев, включающих энергетические и технико-экономические показатели, факторы надёжности и экологической безопасности.

Ключевые слова: энергетический комплекс; структура; режимы эксплуатации; оптимизация; алгоритмы; подготовка и транспортирование углеводородов; критерии эффективности.

The structural and parametric optimization algorithms of the energy complex enterprises for hydrocarbon preparation and transportation for decomposition-search choice of the technological and design solutions, implementing the principles of the own resources maximum utilization are proposed. The valuation methodology of the algorithms effectiveness from a integrated and cumulative criteria including energy, technical and economic indicators, reliability and environmental safety factors is proposed too.

Keywords: energy complex; structure; modes of operation; optimization; algorithms; preparation and transportation of hydrocarbons; efficiency criteria.

Введение. Предприятия подготовки и транспортирования углеводородов (УВ) — газа, газового конденсата, нефти (ППТУВ), — включают установки технологической системы (ТС) и систем обеспечения топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР), которые взаимосвязаны в производственном процессе по материальным и энергетическим потокам на протяжении всего периода жизненного цикла, начиная от строительства объектов и заканчивая выводом их из эксплуатации. При этом состав оборудования ТС и обеспечивающего энергетического комплекса (ЭК) ППТУВ, а также режимы эксплуатации меняются в зависимости от влияющих факторов, основными из которых являются производительность по исходному УВ-потоку (которая, в свою очередь, определяется производительностью базового месторождения УВ) и климатические условия. В связи с этим поиск оптимальной структуры и параметров ЭК во взаимосвязи с процессами ТС, внешними источниками УВ и ТЭР представляет сложную задачу, решение которой в рамках полного перебора многочисленных альтернатив аппаратурного оформления ЭК, т. е. типов, числа, конструктивных характеристик и режимов функционирования основных и вспомогательных аппаратов, возможно только с использованием системного подхода и методов математического моделирования, в частности имитационного моделирования, позволяющих ограничить область возможных эффективных решений.

Ниже предлагаются методические положения структурно-параметрического синтеза оптимальных ЭК ППТУВ, развивающие методологию системных исследований в энергетике и химико-технологических производствах [1—6], и алгоритмы выбора технологических решений по генерации ТЭР в системах ЭК и их аппаратному оформлению [7, 8].

Для создания оптимальных ресурсоэффективных ЭК ППТУВ была разработана методика, основанная на декомпозиционно-поисковом принципе синтеза сложных энерготехнологических систем [8], предусматривающая решение задач двух уровней иерархии: на первом формируется технологическая структура ЭК, на втором — его аппаратурное оформление.

Алгоритм выбора технологических решений на этапе концепции генерации ТЭР в ЭК из множества возможных принципов П ($\pi \in$ П)

синтеза реализует три основных, отвечающих глобальной цели оптимизации: π_1 — максимальная замкнутость ЭК с использованием собственных вторичных энергоресурсов (ВЭР), горючих отходов и стоков; π_2 — экологическая безопасность; π_3 — надёжность энергообеспечения на протяжении всего периода жизненного цикла.

Решение задачи синтеза технологических решений иллюстрирует обобщённая блочная схема ЭК (рис. 1), в которой предусмотрена реализация перечисленных принципов, а также многофункциональность систем ЭК и их интеграция с процессами ТС, системами водоснабжения и водоотведения за счёт максимального использования ВЭР в собственном источнике энергообеспечения. Электрическая энергия генерируется на основе комбинирования циклов в парогазовых блоках, сочетающих газотурбинные и паротурбинные установки (ГТУ и ПТУ).

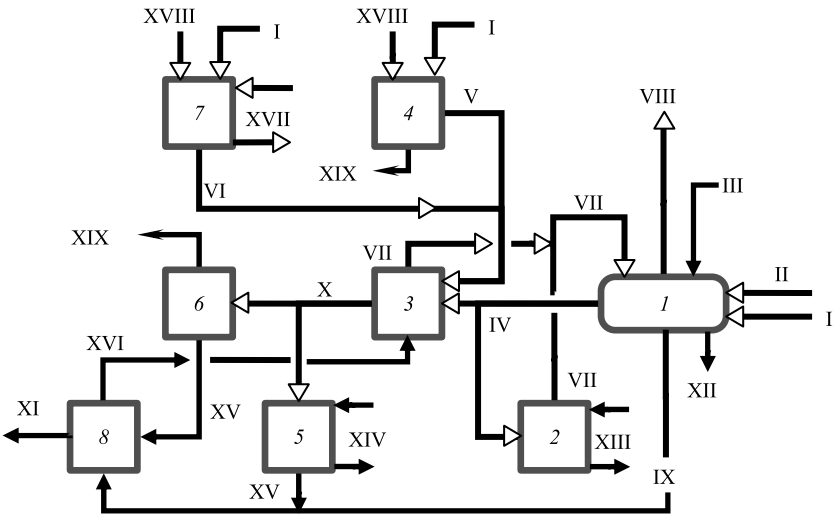


Рис. 1. Схема ЭК с собственным источником электро-, тепло- и водоснабжения:

установки: *1* — утилизации горючих отходов и стоков; *2, 5* — технологического теплопотребителя; *3* — генерации пара; *4* — ГТУ; *6* — ПТУ; *7* — компримирования газов; *8* — подготовки воды;

технологические и энергетические потоки: I, II — газ топливный и утилизируемый; III — промышленные стоки; IV, V, VI — высокотемпературные дымовые газы; VII, VIII — газы на осушку и газ осушенный; IX — вода в систему подготовки; X — пар; XI — вода в систему хозяйственно-бытового потребления; XII — сухие отходы; XIII, XIV — технологический поток; XV — водяной конденсат; XVI — химочищенная вода; XVII — компримируемый газ; XVIII — воздух; XIX — электроэнергия

Каждый элемент ЭК и ТС на рис. 1 представлен соответствующим технологическим комплексом, в зависимости от профиля ППТУВ. Так, например, технологический потребитель *2* может включать испарители абсорбентов блоков осушки и очистки газов, кипятильники высокотемпературных ректификационных колонн, подогреватели технологических потоков и другое высокотемпературное теплопотребляющее оборудование. Для вспомогательных установок ТС, например, для хранилищ углеводородов, дымовые газы огневых нейтрализаторов отходов и газов установки *1* могут быть использованы теплопотребителем *2* в котлах для нагрева высокотемпературного промежуточного теплоносителя, используемого для подогрева резервуаров в зимнее время. Технологический потребитель *5* также в зависимости от технологической топологии ППТУВ может быть сформирован из оборудования ТС и ЭК: кипятильников колонн, холодильных машин абсорбционного или компрессионного типов (с приводом от паровых турбин или роторных паровых машин), оборудования систем отопления и горячего водоснабжения, других потребителей тепловой энергии.

Алгоритм синтеза структурно-аппаратного оформления систем ЭК приведён в виде сетевой модели на рис. 2 [8].

Для установления функциональных взаимосвязей ЭК и ТС ППТУВ элементы этих систем (компоненты) в блоке *10* на рис. 2 представлены в виде операторов математической модели, в каждом из которых выполняются дискретные вычисления переменных по соответствующей функциональной зависимости или моделирующему алгоритму (блоки *6—8*), отображающих (имитирующих) непрерывное действие в реальном объекте.

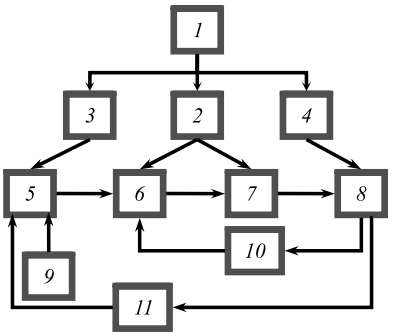


Рис. 2. Схема синтеза оптимального ЭК:

1 — техническое задание; *2* — входные независимые данные; *3* — требование на функционирование; *4* — критерии эффективности; *5* — формирование структуры; *6* — формирование модели; *7* — описание модели; *8* — анализ на соответствие критериям; *9* — база данных; *10* — оптимизация параметров; *11* — изменение структуры

Аппроксимация каждого действия в реальных ЭК и ТС на соответствующем иерархическом уровне (производств, установок или аппаратов) осуществляется с помощью разработанного алгоритма по принципу передачи информации по каскаду операторов в режиме "идеального вытеснения", т.е. учитывается очерёдность передачи информации по уровням иерархии, а каждый элемент оператора с точки зрения преобразования информации и вычислений является оператором "идеального смешения": входная информация преобразуется в выходную как в статическом объекте без учёта фактора времени.

Расчёты выходных переменных в выделенных блоках осуществляются по автономным программным единицам — модулям, из которых формируется в дальнейшем библиотека программ информационно-аналитической системы (ИАС) для расчёта и анализа текущего и перспективного энергопотребления на предприятии [9] и последующей структурно-параметрической оптимизации ЭК. Информация единичных блоков ИАС структурирована по элементам ЭК и ТС ППТУВ, которые, в свою очередь, коммутируют между собой с помощью сигналов входа-выхода. Каждый выходной сигнал от одного компонента Y_{sj}^{n} является или входным сигналом для другого компонента системы X_{sj}^{k}, или входит в общий выходной сигнал системы (нижние индексы относятся к подсистемам, верхние — к комплексу сигналов). В общем случае $k \neq n$; k, n различны для каждой системы.

Математическая схема, с помощью которой описываются реальные процессы в компонентах блока моделирующих программ (программы для ЭВМ № 2010615353, 2011616340, 2011616684, 2012612727, 2012613267, 2012613266, 2012613269, 2014613737, 2014619488, 2014660962, 2014660407, 2016610685), в ИАС представлена агрегатом. В любой момент времени агрегат может находиться в одном из возможных состояний. Переход агрегата из одного состояния в другое описывается оператором перехода, который позволяет по предыдущему определить очередное состояние агрегата. Агрегат имеет входы, куда поступают входные сигналы от других агрегатов, и выходы, на которых формируются выходные сигналы. Кроме того, имеются дополнительные входы, на которые поступают управляющие сигналы. Выходные сигналы формируются из входных и управляющих сигналов оператором выхода в результате его взаимодействия с оператором перехода. Значения операторов перехода и выхода задаются при аппроксимации выполнения агрегатами функционального действия реальной системы.

Методика и алгоритм расчёта показателей эффективности структурно-параметрических решений базируются на максимальном приближении характеристик ЭК к характеристикам идеальной модели энергообеспечения ППТУВ, представляющей замкнутый технологический цикл генерации и потребления ТЭР в ТС и ЭК с минимальными потенциалами сторонних источников энергии и минимальными необратимыми потерями энергоносителей.

Для укрупнённой оценки решений на первом этапе синтеза оптимального ЭК ППТУВ предлагается использовать модуль расчёта показателей эффективности (МРПЭ), структуру и содержание которого для общего случая можно пояснить следующими положениями:

любой из элементов ТС представлен в виде математического оператора — "чёрного ящика" со скрытыми внутренними связями и с соответствующими входными и выходными параметрами по исходному сырью, получаемой продукции и ТЭР, качественные и количественные показатели которых выражаются в одинаковых единицах с определёнными внешними уравнениями связи;

на начальном этапе разработки оптимального ЭК эффективность вариантов оценивается на основе энергетического и эксергетического балансов при различной структуре ЭК с учётом регенерации энергии и встроенных циклов;

при потреблении элементами ТС различных ТЭР (топлива, электроэнергии, тепловой энергии, холода) базовой единицей сравниваемых вариантов является количество условного топлива на уровне добычи. При этом каждый ТЭР будет отличаться дифференциальным показателем эффективности, что позволяет в дальнейшем рассмотреть различные варианты ЭК и сравнить их на основании единых экономических критериев;

МРПЭ имеет блочную структуру (рис. 3) и содержит встроенные блоки расчёта по отдельным видам ТЭР — БР-*i*, с помощью которых определяются технико-экономические характеристики *i*-х блоков с учётом системных связей и различных влияющих факторов.

В качестве исходных данных ТС, в зависимости от уровня информационности поставленных задач и степени детализации последующих блоков, принимаются в общем

случае следующие характеристики: параметры физических потоков УВ (сырьё, продукты и отходы), потребность в соответствующих ТЭР или мощности энергопотребителей и характерные параметры (температура, давление, концентрация и т.п.), качественные показатели ТС по экологической безопасности и требованиям к надёжности энергообеспечения.

Блок расчёта базовых параметров первичных ТЭР (БР-*O*) содержит встроенные модули для определения потребления натурального топлива, электроэнергии, искусственного холода и расчёта систем водяного или воздушного охлаждения, в математических описаниях которых использованы как известные зависимости и уравнения связи, так и авторские методики [8, 10, 11]. БР-*O* может не использоваться в расчётах, если параметры первичных ТЭР входят в первый блок исходных данных.

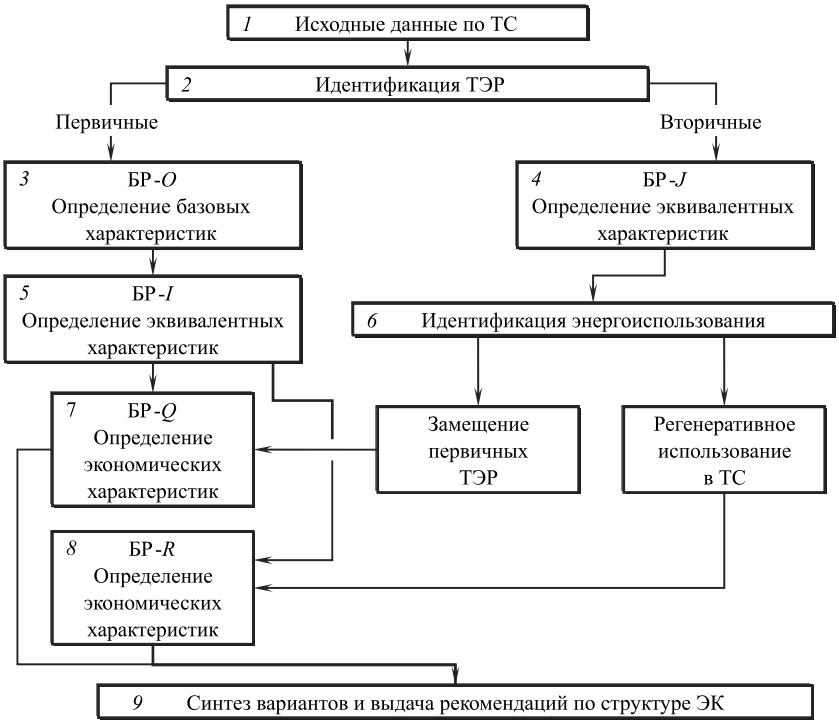


Рис. 3. Схема МРПЭ ЭК

Блоки БР-*I* и БР-*J* позволяют учесть качество различных форм энергии от первичных источников и собственных энергогенерирующих установок ЭК ППТУВ. В основу их математических моделей [11] положены фундаментальные уравнения энергетического и эксергетического балансов. Как отмечалось, сопоставление отдельных составляющих энергетического баланса выполняется по единому показателю — удельному расходу условного топлива на получение того или иного вида энергии (топливного эквивалента). Тогда балансовое уравнение потребления и генерации ТЭР в пересчёте на топливный эквивалент записывается в виде

$$BQ_{\text{н}}^{\text{р}} + \sum_{i=1}^{I} b_i E_{\text{подв}i} = \\ = \sum_{i=1}^{I} b_i \left(E_{\text{отв}i} + E_{\text{пол}i} + E_{\text{пот}i} \right) + \sum_{j=1}^{J} b_j E_{\text{ВЭР}j}, \quad (1)$$

где B и $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — расход и теплота сгорания потребляемого натурального топлива; b_i — топливный эквивалент соответствующего первичного i-го ТЭР; $E_{\text{подв}i}$, $E_{\text{отв}i}$, $E_{\text{пол}i}$, $E_{\text{пот}i}$ — расход i-го ТЭР, подведённого к ТС, отведённого, полезно используемого и затраченного на необратимые потери в ТС; b_j, $E_{\text{ВЭР}j}$ — топливный эквивалент и расход вторичных j-х энергоресурсов (ВЭР), вырабатываемых в ТС.

Оценка эффективности различных вариантов ЭК ТС выполняется также по эксергетическому КПД:

$$\eta_{ex} = 1 - \left(\sum_{i=1}^{I} Ex_{\text{пот}i} \Big/ \sum_{i=1}^{I} Ex_{\text{подв}i} \right), \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^{I} Ex_{\text{подв}i}$, $\sum_{i=1}^{I} Ex_{\text{пот}i}$ — соответственно подведённые к системе потоки эксергии и её потери.

Анализ экономической эффективности ЭК выполняется в БР-*Q* и БР-*R* в зависимости от направления использования получаемых в ТС ВЭР. Базовой методикой расчёта являются классические методики определения выхода и экономической эффективности использования ВЭР [12], а также комплексные критерии [8, 10] и кумулятивный показатель эффективности (КПЭ), формирование которого для ППТУВ показано на рис. 4.

Нормализация элементов множеств $r_p(t)$ и $\lambda_l(t)$ выполнена в сопоставлении их значений по отношению к "базовому" варианту объекта, в качестве которого принимается проектный вариант (для действующих ППТУВ) или объект с аналогичным фактором структурной сложности и технологической топологией со средневзвешенными значениями рассматриваемых показателей.

Результативность $r_p(t)$		Эффективность $\lambda_l(t)$
Реализованная продукция $R(t)$		Использование УВ-сырья и эффективность выработки продукции: $U_1 = 0{,}417\overline{G}_R + 0{,}263\gamma_c + 0{,}160\beta_x + 0{,}097\overline{\Delta}_{RC} + 0{,}062\eta_{EC}$
УВ-сырье и вспомогательные материалы $C_1(t)$		
Эксплуатационные затраты на ТЭР и воду $C_2(t)$		Потенциал повышения эффективности использования ТЭР, воды и утилизации отходов $U_2 = 0{,}381\overline{E} + 0{,}252\eta_0 + 0{,}16\eta_{ЭТБ} + 0{,}101\eta_W + 0{,}064\eta_L + 0{,}043\overline{P}_E$ Показатель использования ТЭР и системной экономии топлива $U_3 = 0{,}417\eta_\Sigma + 0{,}263\eta_{BQ} + 0{,}16\eta_u^{ВЭР} + 0{,}097\eta_{ex} + 0{,}062\overline{\Delta B}$
Техническое обслуживание и ремонт $C_3(t, K)$	+	
Амортизация оборудования $C_4(t, K)$		Производительность $V_{УВ}(t)$ Затраты на обеспечение надёжности снабжения ТЭР и водными ресурсами и резервирование оборудования $U_4 = 0{,}5\overline{C}_{HS} + 0{,}5\overline{K}_1(\Omega, Z)$
Плата за утилизацию отходов, промышленные выбросы и стоки $C_5(t, \Sigma M_i)$		Затраты на возмещение экологического ущерба $U_5 = 0{,}540\eta_W + 0{,}297\eta_L + 0{,}163\overline{K}_2(\Omega, Z)$
Итого 6 показателей (p = 1, ..., 6)		Итого 6 показателей (l = 1, ..., 6)
= КПЭ		

Рис. 4. Структура кумулятивного показателя эффективности

$\overline{G}_R$ — изменение объёма реализованной продукции (по отношению к базовому варианту); γ_c, β_x — коэффициенты использования сырья и выработки реализованной побочной продукции; $\overline{\Delta}_{RC}$ — разность стоимости реализации продукции и затрат на сырьё; η_{EC} — коэффициент рационализации затрат на ЭР; $\overline{E}$ — полезно использованная энергия подведённых ТЭР; η_0, $\eta_{ЭТБ}$, η_W, η_L — коэффициенты относительной экономии ТЭР и рационализации балансов — энерготехнологического, водопотребления и водоотведения; $\overline{P}_E$ — технически реализуемый потенциал использования всех видов ресурсов; η_Σ, η_{ex}, η_{BQ}, $\eta_u^{ВЭР}$ — полный энергетический и эксергетический КПД ППТУВ, коэффициенты использования теплоты топлива для выработки тепловой энергии и ВЭР; $\overline{\Delta B}$ — системная экономия топлива; $\overline{C}_{HS}$ — затраты на обеспечение резерва тепловой, электрической мощности и резервное водоснабжение; $\overline{K}_1(\Omega, Z)$ — капитальные затраты на резервное технологическое оборудование; Ω, Z — технологические и конструктивные факторы ППТУВ; $\overline{K}_2(\Omega, Z)$ — капитальные затраты на резервное оборудование систем утилизации отходов и стоков

Коэффициенты рангов векторных критериев $U_1(t)$, ..., $U_5(t)$ множества $\lambda_l(t)$ определены по методу анализа иерархий [8, 13].

При решении вопроса о приоритетности множеств $r_p(t)$ и $\lambda_l(t)$ принята концепция их равнозначности, поскольку при структурно-параметрической оптимизации ЭК и реализации отмеченных выше трёх принципов повышения эффективности должна сохраняться (или возрастать) прибыльность ППТУВ.

Формула КПЭ объединяет сформированные значения долевого отклонения каждого показателя множеств $r_p(t)$ и $\lambda_l(t)$ с учётом коэффициентов потенциала:

$$\begin{aligned}
\text{КПЭ} = {} & = 4{,}117\frac{R(t)/R^0(t)}{\sum\limits_{p=1}^{6} r_p(t)/r_p^0(t)} + (-34{,}72)\sum_{i=1}^{5}\frac{C_i(t)/C_i^0(t)}{\sum\limits_{p=1}^{6} r_p(t)/r_p^0(t)} + \\
& + 25{,}0\frac{U_1(t)/U_1^0(t) + U_2(t)/U_2^0(t) + U_3(t)/U_3^0(t)}{\sum\limits_{l=1}^{6}\lambda_l(t)/\lambda_l^0(t)} + \\
& + (-16{,}67)\frac{U_4(t)/U_4^0(t) + U_5(t)/U_5^0(t)}{\sum\limits_{l=1}^{6}\lambda_l(t)/\lambda_l^0(t)} + \\
& + 8{,}33\frac{V_{УВ}(t)/V_{УВ}^0(t)}{\sum\limits_{l=1}^{6}\lambda_l(t)/\lambda_l^0(t)}.
\end{aligned} \tag{3}$$

В (3) индексом "0" обозначены показатели базового варианта, а значения коэффициентов потенциалов сформированы из трёх сомножителей, позволяющих установить направление потенциала (+1 или −1), обеспечить баланс между результативностью $r_p(t)$ и эффективностью $\lambda_l(t)$, определить значимость (вес) каждого показателя.

Балансовый сомножитель коэффициентов потенциалов составляет 1/6, если показатель является единственным в множестве $r_p(t)$ или $\lambda_l(t)$, и умножается на соответствующее число при многократном его расчёте в каждом множестве. Например, коэффициент потенциала первого показателя в (3) определён следующим образом:

$$4,117 = [+1] \times \left[\frac{1}{6} \times 0,5\right] \times \left[\frac{\sum_{p=1}^{6} R_p(t)}{\sum_{p=1}^{6}\sum_{l=1}^{6} R_{pl}(t)}\right] \times 100. \quad (4)$$

Аналогично (4) получены значения других коэффициентов для КПЭ. Чем выше КПЭ, тем эффективнее вариант ЭК ППТУВ.

Реализация разработанных алгоритмов и методик осуществлена в виде моделирующих программ, объединённых в программный комплекс [14] и ИАС [9].

Разработанные алгоритмы синтеза оптимальных систем ЭК ППТУВ реализованы для обоснования модернизации систем электро-, тепло-, водоснабжения установок регенерации метанола и абсорбента [15, 16], а также для ППТУВ различной технологической топологии [17], состав оборудования которых позволяет решить задачи повышения энергетической эффективности и экологической безопасности предприятия.

Заключение. Для энергетического комплекса предприятий подготовки и транспортирования углеводородов разработаны алгоритмы структурно-параметрического синтеза систем энергообеспечения с оценкой эффективности технических решений по частным, комплексным и кумулятивному критериям, что позволяет исключить необъективность или субъективность выбора оптимальных вариантов при использовании единичных экономических критериев, в ущерб таких составляющих эффективности, как надёжность обеспечения энергоресурсами, экологическая безопасность и системная энергоэффективность.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Фонда поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых учёных "Национальное интеллектуальное развитие" в рамках научного проекта № 16-31-00001 "мол_эв_а".

Библиографические ссылки

1. **Островский Г.М., Бережинский Т.А., Беляева А.Р.** Алгоритмы оптимизации химико-технологических процессов. М.: Химия, 1978. 296 с.

2. **Кафаров В.В., Мешалкин В.П.** Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия, 1991. 432 с.

3. **Марка Д.А., Мак-Гоуэн К.Л.** Методология структурного анализа и проектирования: Пер. с англ. М.: Мета Технология, 1993. 240 с.

4. **Цвиркун А.Д.** Структура сложных систем. (Библиотека технической кибернетики). М.: Сов. радио, 1975. 200 с.

5. **Штойер Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.

6. **Korovkin N., Odintsov M., Belyaev N., Frolov O., Masashi H.** Various approaches to problems of multicriterion optimization processes of electric power systems // IEEE Conference Publications, 2014, 12—14 may. P. 418—421.

7. **Ларин Е.А., Долотовский И.В., Долотовская Н.В.** Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование. М.: Энергоатомиздат, 2008. 440 с.

8. **Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В.** Проектирование и оптимизация установок и систем энергетического комплекса промышленных предприятий. Саратов: Амирит, 2015. 336 с.

9. **Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В.** Информационно-аналитическая система нормирования и оптимизации выработки и потребления топлива и энергоносителей на предприятии // Патент РФ № 2465639. 2012, Бюл. № 30.

10. **Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В.** Системный анализ энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газа. Саратов: Буква, 2014. 326 с.

11. **Долотовский И.В., Ушаков К.Г.** Модули программного обеспечения синтеза рациональных систем энергообеспечения промышленных предприятий // Евразийский союз учёных (ЕСУ). 2016. № 3 (24). С. 15—19.

12. **Основные** методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 59 с.

13. **Saaty T., Thomas L.** Multicriteria Decision Making — The Analytic Hierarchy Process. Pittsburg: RWS Publications, 1992. 387 p.

14. **Система** "Энергоресурс": программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. № 2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.2010.

15. **Долотовский И.В., Долотовская Н.В.** Установка регенерации метанола // Патент РФ № 138474. 2014, Бюл. № 8.

16. **Долотовский И.В., Ленькова А.В.** Установка регенерации абсорбента с термической утилизацией горючих отходов // Патент РФ № 114424. 2011, Бюл. № 9.

17. **Долотовский И.В.** Установка электро- тепловодоснабжения предприятий добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья // Патент РФ № 118360. 2012, Бюл. № 20.

УДК 675.03.031.81: 577.15

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

elenabok@mail

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ БАЗ ДАННЫХ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ЭФФЕКТАМ

Даны предпосылки создания фонда физических эффектов, позволяющие сформулировать требования к информационной системе, ориентированной на поиск принципов действия технических систем. Прежде всего, эти системы должны представлять собой базу данных. Рассмотрены запросы к данным по физическим эффектам. Приведена математическая постановка задачи поиска принципов действия устройств для преобразования заданного выходного воздействия в заданный выходной результат.

Ключевые слова: автоматизация; информационно-поисковая система; компьютерные базы данных.

The preconditions for the physical effects fund establishing that allow to formulate requirements for information system, focused on the search of the technical systems activity principles are given. First of all, these systems must be a database. The requests for data on the physical effects are considered. The mathematical formulation of the search task the facilities activity principles for transformation of the specified output influence in the specified output result is adduced.

Keywords: automation, information retrieval system, computer database.

Информационная система должна представлять собой "... совокупность взаимосвязанных хранящихся вместе данных при наличии такой минимальной избыточности, которая допускает их использование оптимальным образом для одного или нескольких приложений; данные запоминаются так, чтобы они были независимы от программ, использующих эти данные; для добавления новых или модификации существующих данных, а также для поиска данных в базе данных применяется общий управляемый способ" [1].

База данных по физическим эффектам является частью системы автоматизированного проектирования (САПР). Это накладывает на её функционирование определённые требования.

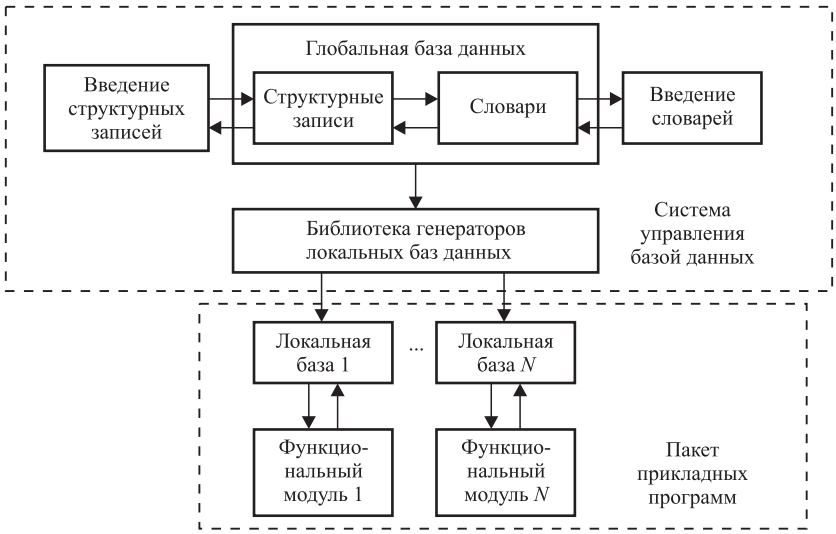
Известно, что наибольшая эффективность решения задач проектирования достигается в режиме диалога проектировщика с ЭВМ [2]. В связи с этим при решении задач проектировщик должен иметь возможность вносить коррективы в первоначально принятые системой решения и получать необходимые промежуточные результаты по формулируемому запросу. Для принятия системой решения о допустимости найденных вариантов принципов действия в базе данных наряду с самими данными необходимо хранить и оценки этих данных относительно некоторых критериев. Эти оценки могут вноситься как при ведении базы данных, так и при решении задач проектирования в процессе диалога. Создавая прикладные программы проектирования, необходимо стремиться к наибольшей автоматизации процесса выявления наилучшего решения.

В процессе эксплуатации базы данных возможно её развитие, дополняя и обновляя сами данные и включая в эксплуатацию прикладные программы обработки новых запросов. Для совершенствования базы данных без её коренной переделки необходимо иметь возможность изменять глобальную структуру данных, например, введением новых полей записи. Эти изменения не должны затрагивать ранее написанные прикладные программы. Расширение функциональных возможностей базы данных за счёт обработки новых запросов без существенного изменения ранее введённых в эксплуатацию прикладных программ возможно при изолированном решении задач, так как каждая прикладная программа может быть использована независимо от других прикладных программ.

Первоначальное наполнение базы данных и дальнейшее её ведение является трудоёмким процессом поиска и анализа существующих физических эффектов. Для обеспечения надёжной сохранности базы данных от уничтожения необходимо дублировать данные на

различных физических носителях для возможности их восстановления. Защита от случайного уничтожения данных проектировщиком или администратором может осуществляться системными средствами защиты.

При синтезе принципов действия проектировщик формирует схему соединения различных физических эффектов таким образом, чтобы выполнялось некоторое преобразование вида энергии, вещества или изменялся некоторый физический параметр в носителе эффекта или в среде. Для сложных объектов целесообразно хранить образ проектируемой схемы принципов действия в памяти ЭВМ, корректируя её в процессе решения задач поиска принципов действия и анализа результатов поиска. В связи с этим базы данных должны иметь возможность работы с динамическими файлами в режиме диалога.



Взаимодействие базы данных с пакетом прикладных программ

Решая задачи синтеза принципов действия, проектировщик стремится накапливать и использовать свой опыт. Целесообразно автоматизировать этот процесс ведением в простейшем случае каталогизации решённых задач вместе с постановками задач, а в дальнейшем использовать программы самообучения, которые автоматически корректируют оценки в базе данных относительно технических заданий на поиск принципов действия.

В САПР для анализа полученных решений используются программы имитационного моделирования [3]. Предварительное рассмотрение задач анализа принципов действия показало, что использование имитационного моделирования принципов действия в различных режимах позволит более точно оценить найденные варианты решений с точки зрения их функционирования. Для осуществления возможности иметь соответствующую информацию сформулированы основные требования к базе данных по физическим эффектам:

возможность совершенствования глобальной структуры базы данных без коренной переделки ранее введённых в эксплуатацию задач;

возможность изолированного решения задач;

высокая скорость реакции системы на запрос, необходимая для диалогового режима.

Этим требованиям в наибольшей степени соответствует структура, состоящая из глобальной базы данных, множества локальных баз и программного обеспечения, которое, в свою очередь, состоит из прикладных программ, реализующих определённые задачи, и программ системы управления базой данных (СУБД) (см. рисунок). В частности, в СУБД входят программы генерирования локальных баз данных, не входящие в глобальную базу.

Глобальная база данных по физическим эффектам является основной частью. Объектом здесь служит описание отдельного физического эффекта в виде записи, состоящей, например, из следующих полей: <название эффекта>, <физический объект>, <входное действие>, <характеристика взаимодействия>, <результат воздействия>, <характеристика результата воздействия>, <применение эффекта>, <физическая сущность эффекта>, <литература>. Для ведения глобальной базы данных создают программы внесения и удаления объектов, коррекции записей, изменения глобальной структуры, например, введение нового поля в запись. Отметим, что пользователем этих программ является администратор данных.

Локальные базы данных создаются, если это необходимо для каждой прикладной программы обработки запросов пользователей. Основным требованием к структуре локальной базы является минимизация времени обработки соответствующего запроса. Целесообразность локальной базы подтверждается тем фактом, что в некоторых задачах используется только часть глобальной базы или некоторая вторичная информация, полученная переработкой по определённому алгоритму. Например, в задаче поиска цепочек физических эффектов используется информация о связях

между физическими эффектами по исходным воздействиям и выходным эффектам [3]. Эту информацию получить непосредственно из глобальной базы трудно, а используется она при решении целого ряда задач, поэтому для повышения быстродействия имеет смысл организовать локальную базу, включающую только необходимые данные.

Локальные базы могут быть получены при помощи специальных программ преобразования глобальной базы, которые являются частью СУБД. В связи с тем, что глобальная база корректируется редко, возможен вариант ведения локальных баз, при котором они генерируются заново, исходя из нового варианта глобальной базы. Это значительно упрощает СУБД.

Преимущества использования локальных баз данных:

локальные базы независимы друг от друга, что даёт возможность быстрого ввода в эксплуатацию новых задач и получения независимого их решения; для ввода новой задачи достаточно в СУБД исключить программу генерации локальной базы;

возможность быстрого решения задач за счёт специальной структуры локальной базы, наиболее удобной для данной задачи; поиск в локальной базе осуществляется значительно быстрее, чем при использовании только глобальной базы, благодаря её меньшему объёму;

изменение структуры глобальной базы не затрагивает ранее введённые в эксплуатацию прикладные программы; в противном случае необходимо переписать программы генерирования локальных баз.

Недостатком использования локальных баз является некоторое дублирование информации, что компенсируется их достоинствами.

Рассмотрим более подробно способы общения с базой данных.

Наиболее естественным, с психологической точки зрения, типом взаимодействия проектировщика с ЭВМ является прямая связь в режиме диалога, для которого характерным является быстрый обмен сообщениями между человеком и машиной, и сообщения, как правило, невелики и легко обозримы. При этом человек может формировать и ставить задачи, оперативно оценивать полученные решения, корректировать данные и вводить новую информацию, обращаться к ЭВМ за справками и получать ответные сообщения через интервал времени, не нарушающий ход мыслительной деятельности человека [4].

Режим диалога особенно эффективен при решении творческих задач. К этому типу можно отнести задачи синтеза принципов действия и технических решений на ранних стадиях проектирования, так как они обладают свойствами неопределённости из-за дефицита информации и не поддаются строгой формализации. Поэтому возникает необходимость использовать опыт проектировщиков при решении этих задач в прямом контакте с ЭВМ.

Результаты исследований по проблеме проектирования диалоговых систем позволяют выделить ряд требований, которым должна удовлетворять такая система.

Надёжность диалога. Необходимо предусмотреть средства страховки от возможных ошибок пользователей. При формулировке задачи или стратегии решения задачи человек может сделать синтаксические ошибки или перепутать порядок директив. Система должна обнаружить такие ошибки. Необходимо исключить ситуации "зависания" или остановки системы вследствие неправильных действий человека.

Естественность диалога, при котором процесс решения задач становится проще и оперативнее [5]. В связи с этим язык диалога должен содержать некоторый набор фраз на языке человеческого общения, а также содержать специальные технические термины, ориентированные на некоторый класс задач. Важным фактором естественности диалога является время реакции машины на запрос человека, которое не должно превышать 5—10 с. В случае более длительного времени работы программы рекомендуется заполнять паузы репликами, имитирующими непрерывность диалога.

Адаптация к пользователю. В процессе диалога важным фактором является возможность взаимопонимания между человеком и машиной. При этом для устойчивого диалога необходимо реализовать процесс обучения человека фрагментам языка диалога, при этом система не должна требовать от человека каких-то специальных знаний для общения перед началом обучения. Естественно, если человек уже имеет некоторый опыт работы с системой, то необходимость заново обучать его отпадает. Таким образом, система должна настраиваться на уровень знания пользователем языка общения.

Расширяемость языка диалога. Язык диалога должен обладать свойством расширения, так как ограниченный язык может быть помехой при вводе в эксплуатацию новых задач. Расширяемость языка предполагает возмож-

ности введения пользователем новых директив, комментариев и реплик.

При проектировании диалоговой системы основной задачей является выбор языка диалога, в основе которого могут лежать различные принципы. Перечислим некоторые из них.

Основа — естественный язык, он наиболее удобен для человека, но требует большого объёма ввода информации, при этом программного обеспечения для его обработки не существует.

Основа — ограниченный естественный язык, который оптимален и для человека, и для ЭВМ. Трудность использования состоит только в том, что пользователь имеет тенденцию переоценивать возможность этого языка.

Мнемонические обозначения. Недостатком является необходимость помнить значения обозначений.

Язык программирования — мощный, точный, гибкий тип обмена. Недостаток — необходимость знания пользователем языка программирования.

Последний подход является характерным для процедурно-ориентированных систем.

Проблемно-ориентированные диалоговые системы рассчитаны на пользователя-программиста. Такие системы решают задачи определённого класса и состоят из набора отлаженных функциональных блоков.

В программах общения с базой данных наиболее подходящим является использование языка директив для вызова задач, ввода данных для коррекции данных, вывода результатов решения задач. Для информирования пользователя о ходе решения задач, пояснения директив и спецификаций данных целесообразно использовать набор фраз естественного языка.

Заключение. С психологической точки зрения в диалоге между человеком и ЭВМ важным является вопрос инициативы решения задач. Инициатива ведения диалога может принадлежать человеку, который знает, как решить задачу, а ЭВМ является для него только инструментом. При этом методическая сторона решения задачи, т.е. выбор порядка выполнения директив остаётся за человеком. Если инициатива ведения диалога принадлежит ЭВМ, то диалог ведётся по определённому сценарию: ЭВМ задаёт вопросы для выбора альтернативы разветвления вычислительного процесса, выдаёт запросы на ввод недостающих данных, поясняет свои запросы и комментирует ход вычислительного процесса. При этом методическая сторона решения задачи заложена в ЭВМ. Человек после формулировки основной части вопроса или задачи играет роль источника информации, которая не может быть получена формализованным путём.

Реализация приведённой концепции базы данных может осуществляться с использованием в качестве СУБД глобальной по физическим эффектам базы, уже разработанной СУБД общего назначения.

Библиографические ссылки

1. **Скрыпников А.В., Умаров М.М., Арутюнян А.Ю., Чернышова Е.В.** Анализ методов оценки надёжности сложных технических комплексов // Материалы межд. науч.-прак. конф. "Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса". Воронеж: ВГУИТ, 2015. С. 76—81.

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

3. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Эль Иаали Т.** Технологии безопасности распределённых информационных систем на базе грид-технологий. Тенденции инновационных процессов в науке: сб. статей межд. науч.-практ. конф. М.: РИО ЕФИР, 2015. 200 с.

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.

5. **Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Смирнова О.О.** Разработка алгоритмов обучения и распознавания с точки зрения повышения информационной безопасности. Национальная ассоциация учёных (НАУ) // Ежемесячный научный журнал. 2015. № 2 (7). С. 54—56.

УДК 621.396

П.А. Кучеренко, канд. техн. наук, доц., **С.В. Соколов**, д-р техн. наук, проф.
(Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону)

pavelpost83@mail.ru

ОБОБЩЁННЫЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ КРИТЕРИИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предложена общая схема алгоритма решения задачи идентификации структуры дискретных стохастических объектов на основе обобщённых вероятностных критериев. Рассмотрен алгоритм структурной идентификации на основе критерия минимума апостериорной невязки плотностей распределения. Представлены результаты численного примера, позволяющие оценить эффективность предлагаемого подхода при использовании различных вероятностных критериев.

Ключевые слова: идентификация структур; стохастический дискретный объект; вероятностные критерии; апостериорная плотность вероятности.

The algorithm general scheme for the task solution of the discrete stochastic objects structure identification from the generalized probability criteria is proposed. The algorithm of structural identification from the minimum criterion of the densities distribution posteriori misalignment distribution densities is considered. The numerical example results allow to evaluate the proposed approach effectiveness through the use of different probability criteria are introduced.

Keywords: structures identification; stochastic discrete object; probabilistic criteria; probability posteriori density.

Введение. В современных технических системах широко применяют цифровую обработку данных при наличии технологических процессов и объектов, представленных математическими моделями с дискретным временем. Для усовершенствования таких систем необходимо решить задачу эффективной идентификации структуры дискретных стохастических объектов, определяющих функционирование той или иной технической системы. Подобные задачи возникают, в частности, в системах телекоммуникации с кодовым разделением абонентов, в спутниковых радионавигационных системах, в системах защиты информации, радиоастрономии и т.д.

Существующие на сегодняшний день методы решения задачи структурной идентификации, в основном, разработаны для непрерывных систем [1, 2], в то время как в исследованиях, ориентированных на дискретные многоструктурные объекты, больше внимания уделяют разработке алгоритмов оценивания элементов вектора переменных состояния многоструктурного объекта [3—5] и практически без внимания остаётся проблема его эффективной структурной идентификации. Отметим также, что появляющиеся в последнее время решения с использованием алгоритмов оптимальной фильтрации ограничиваются, как правило, рассмотрением линейных моделей объектов и их измерителей [6], что резко сужает области применения подобных подходов для реальных процессов и систем, обладающих существенно нелинейной динамикой. В то же время для дискретных многоструктурных нелинейных стохастических объектов, наблюдаемых в условиях помех с негауссовскими в общем случае распределениями, решение задачи структурной идентификации в общей постановке отсутствует.

Таким образом, проведение исследований, направленных на синтез методов и алгоритмов, позволяющих решить задачу стохастической идентификации структур дискретных нелинейных объектов, представляется весьма актуальным как с практической, так и с теоретической точек зрения.

Для наглядности и большей детализации изложения синтеза процедуры структурной идентификации рассмотрим далее его в скалярном варианте (обобщение на векторный случай, как это будет видно из последующих построений, особенностей не имеет).

Постановка задачи структурной идентификации. Пусть дискретный объект со случайной сменой структуры (ОСС) задан в общем случае нелинейным разностным уравнением

$$x_k = f^{(l)}(x_{k-1}, n_k^{(l)}),\ l = \overline{1, L},\ x_1 = x(1),\ l_1 = l(1), \quad (1)$$

где k — текущий такт времени; x_k — переменная состояния объекта в k-й момент времени; $n_k^{(l)}$ — шум объекта для структуры l с известной плотностью распределения вероятности $q^{(l)}(n^{(l)})$; $f^{(l)}(x_{k-1}, n_k^{(l)})$ — соответствующая структуре l известная нелинейная функция объекта, допускающая обращение относительно своего второго аргумента; L — число возможных структур объекта.

Дискретное наблюдение переменных состояния в k-й момент времени осуществляется измерителем, выраженным в общем случае также нелинейным уравнением (уравнением наблюдения)

$$z_k = s(x_k, e_k), \qquad (2)$$

где e_k — шум наблюдения с известной плотностью вероятности $g(e)$; s — известная нелинейная функция наблюдения, также допускающая обращение относительно своего второго аргумента; z_k — дискретный отсчёт сигнала наблюдения в k-й момент времени (для сокращения дальнейшей записи набор сигналов наблюдения z_i (i = 1...k) обозначим как z_1^k).

Номер структуры объекта l изменяется в произвольные моменты времени жизненного цикла объекта (1), т.е. процесс смены структуры предполагается дискретным во времени случайным процессом с полностью неизвестными вероятностными характеристиками. Следует заметить, что ввиду полного отсутствия априорной информации о вероятностных характеристиках случайного процесса смены структуры, применение существующих подходов к решению задачи структурного распознавания, основанных на определении апостериорных плотностей многоструктурного объекта при известных статистических закономерностях процесса смены структуры [7], является невозможным.

Таким образом, в рассматриваемом общем нелинейном стохастическом случае задача идентификации структуры многоструктурного объекта (1) может быть сформулирована как задача точного и оперативного определения текущего номера структуры объекта l на основе наблюдаемых измерителем (2) дискретных отсчётов сигнала наблюдения.

Общая структура алгоритма идентификации. Для решения задачи в подобной постановке с учётом стохастической природы рассматриваемого объекта целесообразно построение алгоритма структурной идентификации с использованием методов, обеспечивающих максимальную потенциальную точность процедуры идентификации за счёт использования обобщённых вероятностных критериев, зависящих в общем случае нелинейно от наиболее исчерпывающей характеристики наблюдаемого стохастического объекта — его апостериорной плотности вероятности. Отметим, что ввиду отсутствия априорной информации о процессе смены структур, различные структуры объекта (1) при дальнейшем синтезе алгоритма идентификации будут рассматриваться как некоторый набор полностью независимых моноструктурных объектов (с сохранением формулировки "структура многоструктурного объекта" для каждого из них).

Принимая во внимание очевидную способность функции апостериорной плотности вероятности (АПВ), определяемой для того или иного объекта из этого набора, адекватно отражать закономерности его функционирования, предлагаемый алгоритм идентификации реализуем далее на основе формирования банка АПВ, соответствующих различным структурам ("настроенных" на каждую из L возможных структур), с последующей интерпретацией полученного на их выходах набора функций апостериорных плотностей в пользу той или иной структуры объекта. Очевидно, что только одна из L сформированных функций АПВ будет соответствовать наблюдаемым значениям переменной состояния истинной структуры ОСС и, следовательно, только для неё будут выполнены условия оптимума некоторого вероятностного критерия оптимальности J, выбираемого исходя из физического смысла решаемой задачи и особенностей исследуемых объектов и их наблюдателей.

Обозначив апостериорную плотность вероятности переменной состояния объекта для l-й структуры как $p^{(l)}(x_k|z_1^k)$, сформулируем общий вид предлагаемого критерия и условие определения оптимального по этому критерию значения оценки номера структуры $\hat{l}_k$ (для текущего момента времени k) следующим образом:

$$J_k^{(l)} = U\left(p^{(l)}(x_k \mid z_1^k)\right),\ l = \overline{1, L}, \qquad (3)$$

$$\hat{l}_k = \arg\min_l J_k^{(l)},$$

где U — некоторая известная критериальная функция для выбранного варианта вероятностного критерия.

Различные вариации вида критериальной функции U позволяют охватить самый широкий класс критериев оптимальности. Так, например, для подробно рассматриваемого ниже семейства критериев минимума отклонения АПВ переменной состояния объекта от заданной функции $r(x_k)$ критериальная функция U может быть записана в виде

$$U(p(x_k|z_1^k)) = V(p(x_k|z_1^k), r(x_k)), \qquad (4)$$

где V — некоторая функция (оператор) сравнения АПВ переменной состояния объекта и заданной функции $r(x_k)$ (в общем случае различной для каждого шага алгоритма идентификации).

Отметим также, что в качестве критериев идентификации могут быть использованы такие критерии, как критерий максимума (минимума) вероятности существования параметров состояния в некоторой области пространства состояний, критерий максимума информации о текущем состоянии объекта (критерий Фишера), критерий Шеннона и др.

На рис. 1 приведён общий вид структурной схемы предлагаемого алгоритма структурной идентификации со следующими условными обозначениями: ФАПВ l, $l = \overline{1, L}$ — формирователи функций АПВ для L различных структур наблюдаемого объекта; ВК — блок вычисления текущих значений вероятностных критериев $J_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, на основе поступающих на его входы функций АПВ различных структур; РУ — решающее устройство, формирующее на своём выходе текущее оптимальное значение оценки номера структуры многоструктурного объекта $\hat{l}_k$.

Для повышения точности процедуры идентификации текущие оценки номера структуры объекта в РУ целесообразно определять не на основе единичного ансамбля сформированных на очередном шаге алгоритма критериев $J_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, а с использованием некоторого интегрального (по шагам алгоритма) показателя — сразу для некоторой совокупности значений критериев, определённых на выбранном временном интервале работы алгоритма для каждой из возможных структур. Например, в простейшем случае, в качестве такого показателя можно использовать простую сумму или среднее арифметическое выборки критериев для различных структур, а при необходимости учёта возможных аномальных "выбросов" значений критериев, отрицательно влияющих на качественные характеристики работы алгоритма, — его менее "чувствительные" аналоги — среднее усечённое значение, среднее взвешенное и др.

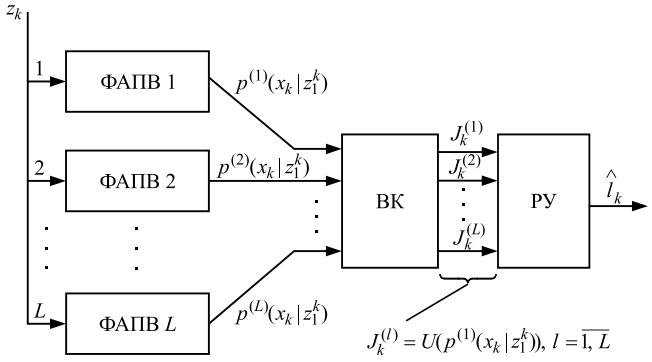


Рис. 1. Схема алгоритма структурной идентификации

Тогда условие оптимизации критерия идентификации структуры объекта на основе сформированных в текущий момент времени выборок значений критерия (3), определённых для различных структур, можно записать в виде

$$\min_l M\left(J_{k-N+1}^{(l)}, J_{k-N+2}^{(l)}, \ldots, J_k^{(l)}\right),$$

где N — размер выбранного интервала работы алгоритма идентификации; M — некоторая функция, определяющая выбранный интегральный показатель для соответствующей выборки критериев на заданном интервале работы алгоритма $[k - N + 1, k]$.

Рассмотрим один из вариантов алгоритма структурной идентификации, синтезированного в соответствии с предложенной схемой (см. рис. 1) и позволяющего обеспечить надёжное, устойчивое и в то же время достаточно оперативное решение задачи идентификации структур нелинейного стохастического объекта.

Синтез алгоритма структурной идентификации на основе критерия минимума апостериорной невязки плотностей распределения. Необходимые для реализации предлагаемого подхода апостериорные плотности вероятности переменной состояния объекта x, соответствующие различным структурам для k-го момента времени, определяют по известной формуле [8, 9]

$$p^{(l)}(x_k|z_1^k) = \frac{p^{(l)}(x_k)h(z_k|x_k)}{\int_{-\infty}^{+\infty} p^{(l)}(x_k)h(z_k|x_k)dx_k}, \; l = \overline{1, L}, \qquad (5)$$

где $p^{(l)}(x_k)$ — априорная (для текущего шага k) плотность вероятности переменной состояния объекта в предположении, что наблюдается структура с номером l; $h(z_k|x_k)$ — функция правдоподобия, определяемая выражением

$$h(z_k|x_k) = g\left(\overline{s}(z_k, x_k)\right)\frac{\partial \overline{s}(z_k, x_k)}{\partial z_k};$$

$\overline{s}(z_k, x_k)$ — функция, полученная обращением функции наблюдения $s(x_k, e_k)$ относительно переменной шума наблюдателя e_k.

Текущие априорные плотности вероятности для различных структур $p^{(l)}(x_k)$, $l = \overline{1, L}$ определяют в соответствии с тождествами:

$$p^{(l)}(x_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} p^{(l)}(x_{k-1}|z_1^{k-1}) p^{(l)}(x_k|x_{k-1}) dx_{k-1}, \quad l = \overline{1, L}, \tag{6}$$

где $p^{(l)}(x_{k-1}|z_1^{k-1})$ — определённая на предыдущем $(k-1)$-м шаге апостериорная плотность вероятности переменной состояния объекта для структуры l; $p^{(l)}(x_k|x_{k-1})$ — условная плотность вероятности перехода из состояния x_{k-1} в состояние x_k для l-й структуры

$$p^{(l)}(x_k|x_{k-1}) = q^{(l)}\left(\overline{f}^{(l)}(x_k, x_{k-1})\right)\frac{\partial \overline{f}^{(l)}(x_k, x_{k-1})}{\partial x_k};$$

$\overline{f}^{(l)}(x_k, x_{k-1})$ — функция, полученная обращением функции объекта $f^{(l)}(x_{k-1}, n_k^{(l)})$ относительно переменной шума объекта $n_k^{(l)}$.

Предлагаемый алгоритм структурной идентификации основан на сравнении априорных (для текущего шага работы алгоритма) плотностей вероятности переменной состояния объекта $p^{(l)}(x_k)$, $l = \overline{1, L}$ с их апостериорными плотностями $p^{(l)}(x_k|z_1^k)$, $l = \overline{1, L}$, формирующимися с учётом принимаемых отсчётов сигнала наблюдения z_k в соответствии с (5). То есть в процессе работы алгоритма идентификации для каждой из L возможных структур определяется, насколько имеющаяся на очередном шаге априорная информация о вероятностных характеристиках той или иной структуры согласуется (не согласуется) с апостериорной информацией, "скорректированной" текущим наблюдением (2). При этом для повышения устойчивости и надёжности работы алгоритма идентификации целесообразно аккумулировать результаты этого сравнения в пределах некоторого интервала его работы.

Таким образом, с учётом (4) набор значений вероятностных критериев (3), необходимый для решения поставленной задачи идентификации, определится следующей системой уравнений:

$$J_k^{(l)} = V\left(p^{(l)}(x_k|z_1^k), p^{(l)}(x_k)\right), \quad l = \overline{1, L}. \tag{7}$$

В качестве возможных вариантов оператора сравнения V в данном случае могут быть использованы самые различные меры совпадения вероятностных распределений (как симметричные, так и несимметричные). Выбор конкретного вида оператора V, обеспечивающего требуемую точность и оперативность решения задачи идентификации, обусловливается характерными особенностями исследуемого многоструктурного стохастического объекта и его наблюдателя.

С учётом изложенного конкретизируем вид критериальной функции U для семейства критериев минимума отклонения АПВ от заданной функции (4) (в качестве которой далее выбирают априорную плотность) следующим образом:

для критерия квадратичной разности

$$U\left(p(x_k|z_1^k)\right) = V\left(p(x_k|z_1^k), p(x_k)\right) = \int_X \left(p(x_k|z_1^k) - p(x_k)\right) dx_k, \tag{8}$$

где X — заданная область пространства переменных состояния объекта;

для критерия дивергенции Кульбака

$$U\left(p(x_k|z_1^k)\right) = -\int_X p(x_k|z_1^k) \ln\left(\frac{p(x_k)}{p(x_k|z_1^k)}\right) dx_k; \tag{9}$$

для критерия согласия Колмогорова

$$U\left(p(x_k|z_1^k)\right) = \sup_x \left| \int_{-\infty}^{x} p(x_k|z_1^k) dx - \int_{-\infty}^{x} p(x_k) dx) \right|. \tag{10}$$

Подробный сравнительный анализ результатов использования всех трёх приведённых критериев, показавших наилучшие результаты среди всех исследованных вероятностных критериев, представлен ниже при рассмотрении численного примера структурной идентификации выбранного объекта.

Рассмотрим схему предлагаемого алгоритма идентификации текущего номера структу-

ры объекта, представив её в виде последовательности следующих этапов.

На *этапе 1* вычисляют текущие априорные плотности вероятности $p^{(l)}(x_k)$, соответствующие каждой из L возможных структур, по формуле (6). При этом для первого шага алгоритма (при $k = 1$) в качестве апостериорных плотностей предыдущего ($k - 1$)-го шага $p^{(l)}(x_{k-1}|z_1^{k-1})$ в выражение (6) подставляют заданные исходные априорные плотности $p^{(l)}(x_0)$, $l = \overline{1, L}$. Важно отметить, что, как показали результаты серии численных экспериментов, отклонения средних значений априорных плотностей от начального значения переменной состояния не оказывают в дальнейшем существенного влияния на качество процедуры идентификации (алгоритм идентификации к ним устойчив).

На *этапе 2*, используя рассчитанные на первом этапе функции $p^{(l)}(x_k)$, $l = \overline{1, L}$, на выходах ФАПВ формируются апостериорные плотности $p^{(l)}(x_k|z_1^k)$ в соответствии с (5).

На *этапе 3* рассчитывают текущие значения вероятностных критериев $J_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$ в соответствии с выражением (7) для выбранного вида оператора сравнения априорной и апостериорной плотностей вероятности V.

На *этапе 4* для имеющихся текущих выборок значений критериев $J_{k-N+1}^{(l)}, J_{k-N+2}^{(l)}, \ldots, J_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, рассчитанных на интервале $[k - N + 1, k]$ для каждой из структур, определяют текущие значения функции интегрального показателя $M_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$.

На *этапе 5* в качестве текущей оптимальной оценки номера структуры объекта $\hat{l}_k$ выбирают номер структуры, соответствующий минимальному из рассчитанных значений $M_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, т.е.

$$\hat{l}_k = \arg\min_l M_k^{(l)}. \qquad (11)$$

Следует отметить, что с целью сокращения вычислительных затрат после определения оптимального номера структуры $\hat{l}_k = m$ на текущем шаге дальнейшие вычисления этапов 1—4 алгоритма можно осуществлять только для найденной m-й структуры. Возобновляют расчёт для всей совокупности возможных структур лишь при превышении значения функции интегрального показателя $M_k^{(m)}$ некоторой заранее заданной пороговой величины ΔM.

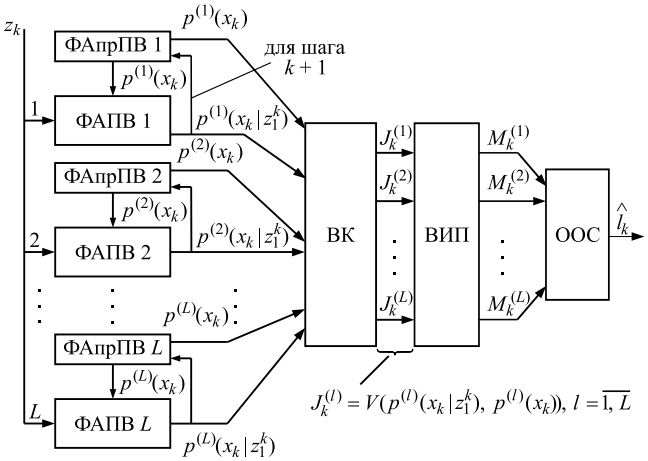


Рис. 2. Схема алгоритма структурной идентификации на основе критерия минимума апостериорной невязки

На рис. 2 представлена детализированная структурная схема предлагаемого алгоритма идентификации (особенности учёта порогового значения ΔM на рисунке не показаны), где использованы следующие условные обозначения: ФАпрПВ l, $l = \overline{1, L}$ — формирователь априорной плотности вероятности $p^{(l)}(x_k)$, соответствующий l-й структуре; ВИП — блок вычисления значений функции выбранного интегрального показателя для N последних шагов алгоритма $M_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$; ООС — блок определения (в соответствии с выражением (11)) текущей оценки номера структуры $\hat{l}_k$, удовлетворяющей выбранному критерию оптимальности.

В качестве основной проблемы практической реализации предлагаемого в работе подхода отметим высокий уровень его вычислительной сложности, однако, учитывая современные тенденции развития вычислительных средств, проблема подобного рода не является критической.

Эффективность предложенного метода структурной идентификации проиллюстрируем следующим примером.

Пример. Рассмотрим стохастический нелинейный объект со случайной сменой структуры, заданный следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_k^{(1)} = f^{(1)}(x_{k-1}^{(1)}, n_k^{(1)}) = 1 - 0,79(x_{k-1}^{(1)})^2 + n_k^{(1)} \\ \text{для 1-й структуры} \\ x_k^{(2)} = f^{(2)}(x_{k-1}^{(2)}, n_k^{(2)}) = 3,7x_{k-1}^{(2)}(1 - x_{k-1}^{(2)}) + n_k^{(2)} \\ \text{для 2-й структуры} \end{cases},$$

$$x_1^{(2)} = 0,8, \quad l_1 = 2, \qquad (12)$$

где $n_k^{(1)}$ — независимая случайная последовательность шума объекта для 1-й структуры с плотностью вероятности $q^{(1)}(n) = \exp\left(-e^{-(n-qa)/qb}\right)$ (тип I Гумбеля) с параметром сдвига $qa = 0$ и масштаба $qb = 0{,}03$; $n_k^{(2)}$ — независимая гауссовская последовательность шума объекта для 2-й структуры с нулевым средним и дисперсией $D = 0{,}0009$, т.е. $q^{(2)}(n) = \dfrac{\exp\left(-n^2/2D\right)}{\sqrt{2\pi D}}$.

Моменты смены структуры объекта для рассматриваемого примера выбирали в соответствии с представленной на рис. 3 зависимостью номера структуры (Стр.) объекта l_k от шага работы алгоритма идентификации k.

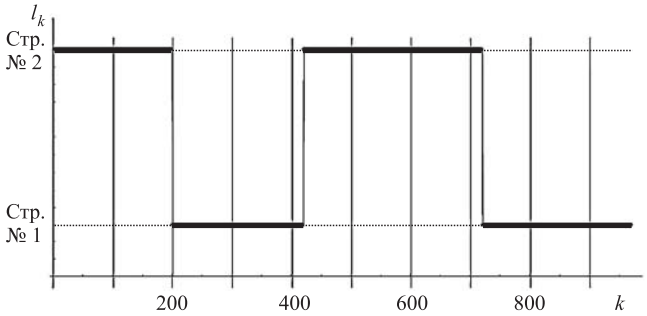


Рис. 3. Процесс изменения номера структуры объекта

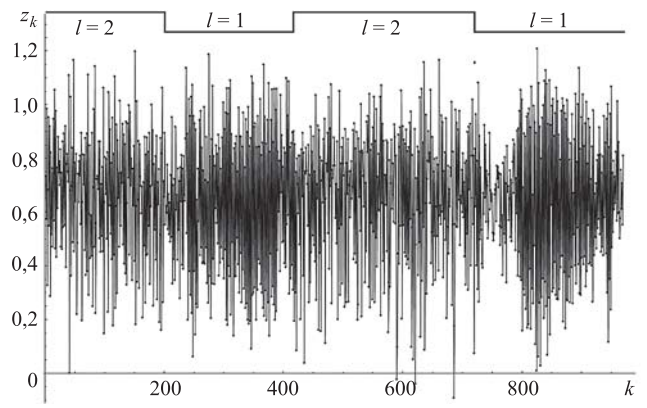


Рис. 4. Зависимость наблюдаемых значений z_k от номера шага работы алгоритма k

Наблюдение переменных состояния исследуемого объекта осуществлялось измерителем, выраженным уравнением

$$z_k = x_k + e_k,$$

где e_k — независимая гауссовская последовательность с нулевым средним и дисперсией $D_e = 0{,}01$ $\left(g(e) = \dfrac{\exp\left(-e^2 / 2D_e\right)}{\sqrt{2\pi D_e}}\right)$.

На рис. 4 показана зависимость наблюдаемых значений z_k от номера шага работы алгоритма k для рассматриваемого объекта (12).

Априорные плотности вероятности для первой итерации алгоритма задавались следующим образом: для структуры 1 была выбрана плотность вероятности типа I Гумбеля с параметром сдвига 0,5 и параметром масштаба 0,13; для структуры 2 выбирали нормальную плотность вероятности с математическим ожиданием 0,5 и дисперсией 0,017.

Определение интегралов, входящих в выражение (5), здесь и в дальнейшем проводилось численно с использованием квадратурных формул с шагом $\Delta = 0{,}01$. Бесконечные пределы интегрирования по переменной состояния x заменяли на конечные значения, удовлетворяющие точностным требованиям к алгоритму оценки ($x_{\min} = -0{,}5$; $x_{\max} = 1{,}5$).

На рис. 5 и 6 представлены графики входящих в (6) условных плотностей вероятности $p^{(l)}(x_k|x_{k-1})$, $l = 1, 2$ как функций от текущей переменной состояния x_k и переменной со-

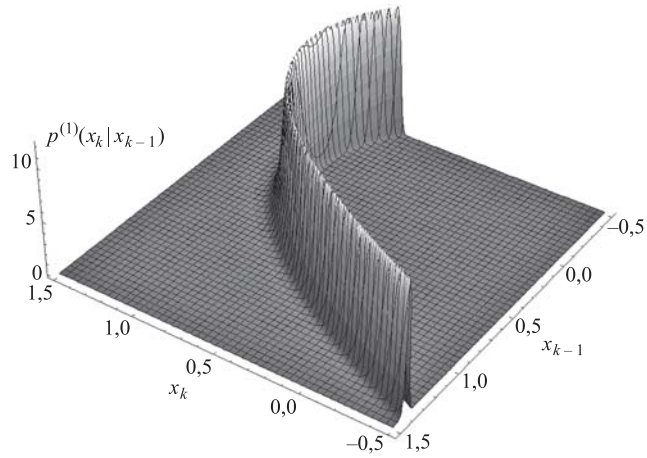


Рис. 5. График условной плотности вероятности переменной состояния для структуры 1

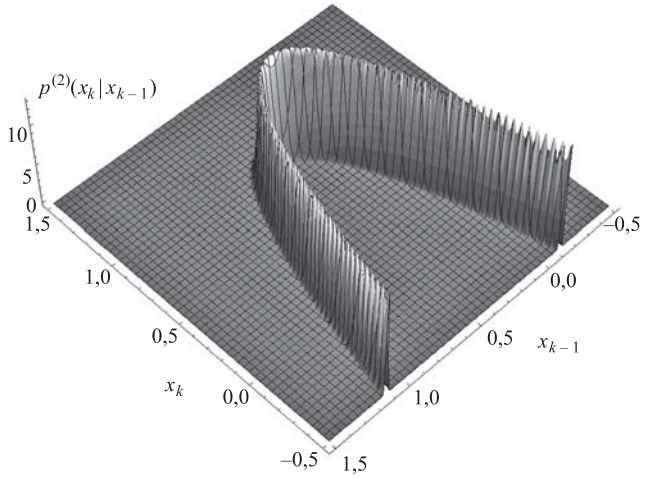


Рис. 6. График условной плотности вероятности переменной состояния для структуры 2

стояния предыдущего шага x_{k-1} для каждой структуры рассматриваемого нелинейного объекта (12).

Рассмотрим использование предложенных выше частных случаев критерия минимума апостериорной невязки и проведём их сравнительный анализ (т.е. критериев минимума квадратичной разности (критерий I), минимума дивергенции Кульбака (критерий II), а также критерия согласия Колмогорова (критерий III)).

Текущие значения критериев идентификации рассчитываются по формуле (7) для трёх операторов сравнения $V_i(...)$, i = I, II, III, соответствующих выбранным критериям I—III, т.е.

$$J_k^{(l)} = V_i\left(p^{(l)}(x_k|z_1^k), p^{(l)}(x_k)\right),$$

$$l = 1,2,\ i = \mathrm{I,II,III}. \qquad (13)$$

В качестве функции интегрального показателя использовали простую сумму выборки размера $N = 20$ (и $N = k$ при $k < N$) последних рассчитанных значений критериев, вычисленных в соответствии с (13), т.е. текущие значения этой функции определяли как

$$M_k^{(l)} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} J_{k-N+i}^{(l)}, k \geqslant N \\ \sum_{i=1}^{k} J_i^{(l)}, k < N \end{cases}, \ l = 1,2. \qquad (14)$$

Наилучшие результаты были получены при использовании критерия минимума квадратичной разности (критерий I). Соответствующие ему зависимости значений функции интегрального показателя $M_k^{(l)}$, l = 1, 2 от номера шага работы алгоритма k с отмеченными моментами смены номера структуры l представлены на рис. 7.

На рис. 8 проиллюстрирована эффективность работы предлагаемого алгоритма идентификации для всех трёх критериев сопоставлением на одной временной шкале оценок номера структуры $\hat{l}_k$, полученных с их использованием (в соответствии с (8)), и его истинных значений l_k (см. рис. 3).

Анализ представленных на рис. 8 зависимостей показывает, что наиболее эффективным в рамках предлагаемого подхода к решению задачи структурной идентификации оказался критерий минимума квадратичной разности (критерий I). Далее в порядке ухудшения качественных характеристик алгоритма следуют критерий минимума дивергенции Кульбака и критерий согласия Колмогорова. Отметим также имеющиеся ложные определения номеров структур, которые, однако, для выбранного критерия I имеют место лишь на небольших интервалах работы алгоритма идентификации и, с учётом приведённых ниже результатов интегральной оценки качественных показателей работы алгоритма, практически не оказывают влияния на его конечную эффективность. Кроме того, часть ложных определений обусловлена некоторым запаздыванием реакции алгоритма на событие очередной смены структуры объекта ввиду использования суммарных (по N шагам алгоритма) показателей (14) и в зависимости от особенностей идентифицируемых объектов (например, меньшей дисперсии шума) может быть сокращена уменьшением размера используемой выборки N.

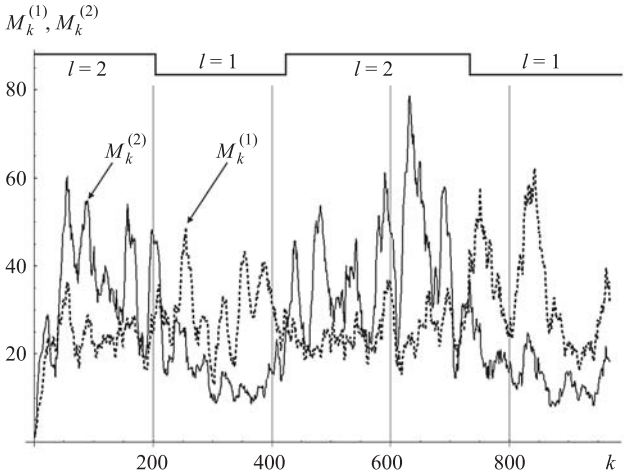


Рис. 7. Зависимость значений функций интегрального показателя $M_k^{(l)}$, l = 1, 2 от номера шага работы алгоритма k для критерия I

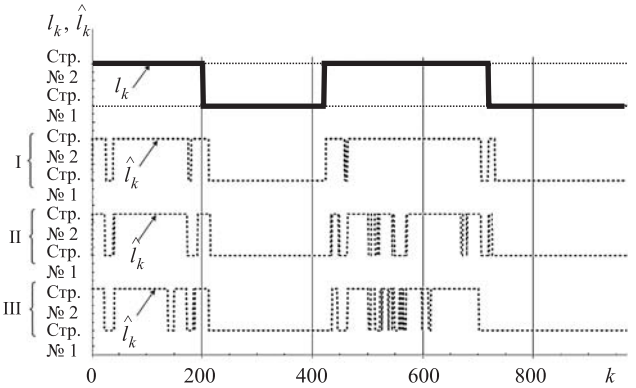


Рис. 8. Сопоставительный анализ оценок номеров структур с их истинными значениями

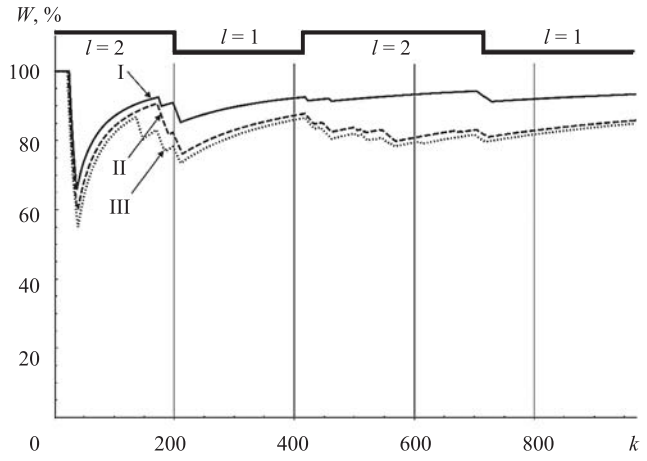


Рис. 9. Зависимости степени точности распознавания структур от номера шага работы алгоритма

Для количественной оценки эффективности предлагаемого алгоритма структурной идентификации определим показатель степени точности распознавания структур объекта W по формуле

$$W = \frac{C}{k} 100\ \%,$$

где C — количество правильно распознанных структур к k-му шагу работы алгоритма; k — номер шага алгоритма идентификации.

На рис. 9 представлены результирующие зависимости степени точности распознавания структур многоструктурного объекта (5) W от номера шага работы предложенного алгоритма структурной идентификации для рассмотренных критериев I—III.

Как видно из приведённого графика, характерными особенностями являются, во-первых, достаточно высокая точность распознавания структур, устойчиво достигнутая уже к 100-му шагу алгоритма, а во-вторых, её плавно возрастающий характер по мере увеличения числа шагов идентификации.

Заключение. В работе получено решение задачи структурной идентификации нелинейных дискретных многоструктурных стохастических объектов, обладающее рядом важных свойств. К их числу следует отнести:

высокий уровень потенциальной точности процесса идентификации структуры дискретных объектов за счёт использования обобщённых вероятностных критериев, зависящих в общем случае нелинейно от апостериорной плотности распределения вектора состояния и позволяющих охватить широкий класс условий оптимальности;

инвариантность к виду плотности распределения вероятности шума как объекта, так и наблюдателя;

возможность использования метода при полном отсутствии априорной информации о вероятностных характеристиках случайного процесса смены структуры объекта;

принципиальная возможность применения метода для существенно нелинейных динамических объектов и наблюдателей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 15-07-00112, грант № 13-07-00226 а.

Библиографические ссылки

1. **Карабутов Н.Н.** Структурная идентификация систем: анализ динамических структур. М.: МГИУ, 2008. 159 с.

2. **Хуторцев В.В., Соколов С.В., Шевчук П.С.** Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. М.: Радио и связь, 2001. 808 с.

3. **Ronghua Guo** Interacting Multiple model particle-type filtering approaches to ground target tracking // Journal of Computers. 2008. Vol. 3. No. 7. P. 23—30.

4. **Gordon N.J., Salmond D.J., Smith A.F.M.** Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation // IEE Proceedings-F. 1993. Vol. 140. No. 2. P. 107—113.

5. **Doucet A., Godsill S., Andrieu C.** On sequential Monte-Carlo sampling methods for Bayesian filtering // Statistics and Computing. 2000. Vol. 10. No. 3. P. 197—208.

6. **Кошаев Д.А.** Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. 2010. № 5. С. 70—83.

7. **Казаков И.Е., Артемьев В.М.** Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука, 1980. 384 с.

8. **Аоки М.** Оптимизация стохастических систем. М.: Наука, 1971. 424 с.

9. **Кучеренко П.А., Соколов С.В.** Нелинейная параметрическая идентификация стохастических дискретных объектов на основе обобщённых вероятностных критериев // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 5. С. 26—35.

УДК 681.513

Нгуен Динь Тхай
(Ханойский исследовательский институт, СРВ)
nguyendinhthaivn@gmail.com

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Исследованы критерии оценки эффективности применения комплексной обработки информации при использовании инерциальной навигационной системы, корректируемой с помощью спутниковых систем. Эффективность проведения коррекции обычно оценивается на основе анализа результатов полунатурного и лётного экспериментов. Разработан критерий оценки эффективности использования комплексной обработки информации в процессе функционирования навигационных систем в полёте.

Ключевые слова: алгоритм обработки информации; навигационные системы; критерий эффективности.

The efficiency valuation criteria of information complex processing through the use of an inertial navigation system, corrected with the help of satellite systems are investigated. The effectiveness of the correction is usually evaluated on the basis of the results analysis for half natural and flight experiments. A measure of the efficiency valuation criterion of the information complex processing application in the navigation systems functioning process at flight is developed.

Keywords: information processing algorithm; navigation systems; efficiency criterion.

Введение. При управлении летательными аппаратами (ЛА) в качестве источников информации о состоянии ЛА используются различные навигационные системы [1]. Обычно базовой навигационной системой ЛА является инерциальная навигационная система (ИНС), особенность которой — высокая помехозащищённость, но с течением времени погрешности увеличиваются и могут достигать неприемлемых величин. Поэтому для повышения точности ИНС применяют дополнительные измерительные системы и комплексную обработку информации (КОИ). В качестве дополнительной измерительной системы часто используют спутниковые системы (ГЛОНАСС, GPS), отличающиеся высокой точностью, но слабой помехозащищённостью. Самый распространённый алгоритм КОИ предполагает применение сигналов ИНС и ГЛОНАСС для алгоритма фильтрации [2], который используется при оценке погрешностей ИНС. Оценки погрешностей корректируют выходной сигнал ИНС.

В условиях устойчивой работы ГЛОНАСС точность ИНС с КОИ сопоставима с точностью ГЛОНАСС и может даже уступать ей.

В связи с этим обстоятельством актуальна задача оценки эффективности применения КОИ для коррекции навигационной информации от ИНС. Поэтому необходимо разработать критерий, с помощью которого можно принять решение об использовании ИНС, ГЛОНАСС и КОИ или только ГЛОНАСС в качестве источника информации при управлении ЛА.

Критерии оценки эффективности КОИ на основе материалов лётного эксперимента. В практических приложениях применяются критерии и методы оценивания эффективности алгоритмов КОИ на основе материалов лётных испытаний [3]. Анализируются точностные характеристики схемы коррекции ИНС и ГЛОНАСС на основе обработки информации, полученной в процессе лётного эксперимента [4].

В работе [5] представлены критерии оценивания эффективности КОИ после проведения лётных испытаний и наземной обработки полученной информации. Сформулированы требования, предъявляемые к измерительным выборкам, полученным в полёте, способам формирования наборов погрешностей в определении навигационных параметров ГЛОНАСС, погрешностей КОИ. Также оцениваются параметры распределения погрешностей ГЛОНАСС и КОИ с помощью методов статистического оценивания. Для получения достоверной оценки среднеквадратического отклонения (СКО) по малой выборке значений погрешности применяется метод последовательного анализа [5].

Предполагается, что СКО погрешности оценивается для нормально распределённых случайных величин и закона распределения Лапласа 1-го рода. Также разработана схема применения последовательного анализа сравнения между собой двух наборов из абсолютных значений погрешностей. При этом не делается никаких априорных предположений о законе распределения погрешности.

Погрешности навигационных параметров ГЛОНАСС малы, поэтому для их определения используют значения траекторных параметров, полученных с помощью комплекса бортовых траекторных измерений. Получение эталонных значений траекторных параметров осуществляется оптическими средствами — кинотеодолитами "Янтарь", "Оникс", РТС "Вега-Н", а также комплексом бортовых траекторных измерений, разработанным в ЛИИ им. М.М. Громова [6].

В качестве критериев оценки эффективности в работах [4, 5] использованы коэффициенты эффективности $K_Э$, фильтрации $K_Э^ф$ и смещения оценки $K_Э^С$, которые вычисляются для каждого навигационного параметра:

$$K_Э = \left(1 - \frac{\delta_{КОИ}}{\delta_Д}\right)100\%;$$
$$K_Э^ф = \left(1 - \frac{\sigma_{КОИ}}{\sigma_Д}\right)100\%; \qquad (1)$$
$$K_Э^С = \left(1 - \frac{|M_{КОИ}|}{|M_Д|}\right)100\%,$$

где $\delta_{КОИ}$ — величина, с вероятностью 0,95 ограничивающая абсолютное значение погрешности КОИ; $\delta_Д$ — величина, с вероятностью 0,95 ограничивающая абсолютное значение погрешности наиболее точного датчика; $\sigma_{КОИ}$ — СКО погрешности КОИ; $\sigma_Д$ — СКО погрешности наиболее точного датчика; $M_{КОИ}$ — математическое ожидание погрешности КОИ; $M_Д$ — математическое ожидание погрешности наиболее точного датчика.

Когда коэффициенты эффективности меньше 30 %, то делается заключение о нецелесообразности использовании КОИ [6].

Погрешность ГЛОНАСС в определении координат в устойчивом режиме эксплуатации обычно не превышает 30 м. Дальнейшее повышение точности измерительных систем приводит к снижению эффективности КОИ.

Обоснованность использования КОИ сохраняется до тех пор пока их точность больше или соизмерима с параметрами ГЛОНАСС.

Представленные критерии эффективности оценки КОИ (1) имеют существенные недостатки. При превышении погрешностей КОИ уровня погрешностей ГЛОНАСС коэффициенты эффективности (1) становятся отрицательными величинами. Коэффициент смещения оценки $K_Э^С$ при $M_Д \approx 0$ может достигать больших величин и оценка эффективности с помощью этого критерия становится несостоятельной [5].

Другим способом определения эффективности КОИ, разработанным профессором А.И. Татуевым, является вычисление коэффициента $K_Э$ точностной эффективности отношением СКО погрешности ГЛОНАСС к СКО погрешности КОИ (ИНС, ГЛОНАСС, алгоритм фильтрации):

$$K_Э = \frac{\sigma_{ГЛОНАСС}}{\sigma_{КОИ}}. \qquad (2)$$

Коэффициент эффективности $K_Э$ вычисляется отдельно для каждого навигационного параметра. Чем меньше СКО погрешности навигационных параметров КОИ, тем больше коэффициент $K_Э$ точностной эффективности. Значения $K_Э$, близкие к единице, свидетельствуют о совпадении точностных характеристик параметров КОИ и ГЛОНАСС. При уменьшении погрешностей КОИ по сравнению с погрешностями ГЛОНАСС величина коэффициента $K_Э$ будет больше единицы. Если оценённые характеристики погрешности параметров КОИ будут больше соответствующих характеристик ГЛОНАСС, то значения коэффициентов $K_Э$ окажутся меньше единицы.

Если величина $K_Э$ для исследуемого параметра будет больше единицы, то КОИ следует признать эффективной при определении этого параметра. При $K_Э$ меньше единицы КОИ неэффективно использовать для вычисления исследуемого параметра. Значения коэффициента $K_Э$ анализируются по формуле (2) с использованием величин СКО погрешности ГЛОНАСС и КОИ, полученными в процессе лётного эксперимента с некоторой ошибкой. Поэтому если оценённое значение коэффициента $K_Э$ окажется близким к единице, то можно считать, что КОИ не изменяет уровень погрешности корректора в определении данного параметра. Допуская уровень ошибки в определении $K_Э$ до 5 % от величины параметра $K_Э$, под "близостью" к единице будем подразумевать отклонение от единицы не более чем на 0,05, т.е. все значения $K_Э$ из интервала от 0,95 до 1,05 можно считать близкими к единице.

Применение КОИ, не обладающей точностной эффективностью в определении ряда навигационных параметров, может быть оправдано такими свойствами, как непрерывность и целостность сигнала КОИ.

Представленные критерии эффективности КОИ предполагают наличие данных лётных экспериментов, проведение которых является трудоёмким и дорогостоящим мероприятием.

Критерий оценки эффективности КОИ в полёте. В процессе полёта уровень погрешностей ГЛОНАСС и КОИ зависит от условий

функционирования измерительных систем, режима полёта и др. Поэтому оценки точностной эффективности применения КОИ, полученные по результатам анализа данных лётного эксперимента в условиях конкретного полёта ЛА, могут быть неадекватными.

Целесообразно разработать критерий оценки эффективности применения КОИ с использованием текущей информации, полученной на борту ЛА.

Базовый алгоритм рассматриваемой системы КОИ — алгоритм фильтрации. Одним из самых распространённых алгоритмов фильтрации является фильтр Калмана, недостаток которого — это возможность получения расходящегося процесса оценивания параметров в условиях отсутствия достоверной априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов. Этот недостаток устраняется при использовании адаптивных алгоритмов фильтрации [1], например адаптивного фильтра, способного функционировать в условиях стохастической неопределённости [7].

Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, изменение погрешностей ИНС:

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1,k} x_k + G_{k+1,k} W_k, \qquad (3)$$

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

Входные возмущения предполагаются r-мерным дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей:

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

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

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1} + V_{k+1}, \qquad (4)$$

где z_{k+1} — m-вектор измерений; V_{k+1} — m-вектор ошибок измерения; H_{k+1} — $(m \times n)$-матрица измерений.

Ошибки измерений предполагаются m-мерным дискретным аналогом гауссового белого шума, для которого $M[V_{k+1}] = 0$:

$$M\left[V_j V_{k+1}^T\right] = R_{k+1} \delta_{j,k+1},$$

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

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

$$M\left[V_j W_k^T\right] = 0 \text{ при любых } j \text{ и } k.$$

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

Ошибка оценивания $\tilde{x}_k$ определяется разностью x_k и $\hat{x}_k$:

$$\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k. \qquad (5)$$

Матрица корреляции ошибки оценивания имеет вид

$$\tilde{P}_k = M\left(\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T\right) \qquad (6)$$

и зависит от присутствия или отсутствия априорной информации о начальном состоянии системы.

Матрица априорной корреляционной ошибки запишется в виде

$$\begin{aligned} P_{k+1,k} &= M\left[\left(x_{k+1} - x_{k+1,k}\right)\left(x_{k+1} - x_{k+1,k}\right)^T\right] = \\ &= M\left[\left(A_{k+1,k}\tilde{x}_k + w_k\right)\left(\tilde{x}_k^T A_{k+1,k}^T + w_k^T\right)\right]; \end{aligned} \qquad (7)$$

$$P_{(k+1)/k} = \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T + K_k M\left[\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right] K_k^T, \qquad (8)$$

где $\upsilon_{k+1} = z_{k+1} - H_{k+1,k}\Phi_{k+1,k}\hat{x}_k$ — обновляемая последовательность; K — матрица усиления фильтра.

Адаптивный алгоритм оценивания, способный функционировать при отсутствии априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов имеет вид:

$$K_{k+1} = \begin{cases} P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T \left[M\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right]^{-1} \text{ при} \\ \operatorname{diag}\left[M\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right] > \operatorname{diag} H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T; \\ P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T \left[H_{k+1} P_{(k+1)/k} H_{k+1}^T\right]^{-1} \text{ при} \\ \operatorname{diag}\left[M\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right] \leqslant \operatorname{diag} H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T. \end{cases} \qquad (9)$$

В полёте для оценки эффективности КОИ можно воспользоваться структурой критерия (2).

В процессе обработки данных лётного эксперимента можно оценить СКО $\sigma_{\text{ГЛОНАСС}}$ погрешности ГЛОНАСС при нахождении местоположения и скорости ЛА.

Для определения величины (2), характеризующей эффективность применения КОИ, необходимо вычислить погрешности ГЛОНАСС и КОИ [8]. Погрешность при вычислении координат ГЛОНАСС с большой вероятностью

не превышает десятков метров, а погрешность по составляющим вектора скорости — десятых долей м/с. Для получения погрешностей навигационных параметров ГЛОНАСС и КОИ в рамках лётного эксперимента в процессе полёта ЛА необходимо провести высокоточные траекторные измерения.

В полёте оценивание погрешностей осуществляется по весьма ограниченному объёму статистического материала, что не позволяет однозначно определить закон распределения погрешности. Часто статистические характеристики погрешности оцениваются при априорном предположении, что погрешность имеет нормальный закон распределения [9].

Для определения СКО КОИ в полёте можно использовать дисперсию каждого оцениваемого параметра вектора состояния, который вычисляется алгоритмом фильтрации на борту ЛА. Дисперсии ошибок оценивания являются диагональными элементами матрицы вида (7), которая вычисляется по формуле (8).

При использовании скалярного алгоритма фильтрации дисперсия ошибки оценивания, в соответствии с выражением [7], имеет вид:

$$p^{i,}_{k,k-1} = a^2_{ii}\left(1 - k_{k-1}\right) p^{i,}_{k-1,k-2} + q^i_{k-1}, \qquad (10)$$

где $q^i_{k-1} = M\left|\left(w^i_{k-1}\right)^2\right|$ — дисперсия входного шума, неизвестная в практических приложениях; $k^i_k = \dfrac{p^{i,}_{k,k-1}}{p^{i,}_{k,k-1} + r^i_k}$ — коэффициент усиления фильтра.

При отсутствии априорной информации о входном шуме дисперсия ошибки оценивания запишется в виде:

$$p^{i,}_{k,k-1} = M\left|\left(\theta^i_k\right)^2\right| - r^i_k \geqslant 0, \qquad (11)$$

где $p^{i,}_{k,k-1}$ — априорная дисперсия ошибок оценивания, по определению не может быть отрицательной величиной.

Однако в процессе фильтрации за счёт скудности статистической выборки может возникнуть ситуация, когда неравенство (11) не будет выполняться. Поэтому, если $M\left|\left(\theta^i_k\right)^2\right| - r^i_k < 0$, то необходимо полагать $k^i_k = 0$. Действительно, при $M\left|\left(\theta^i_k\right)^2\right| - r^i_k < 0$ ошибка оценивания мала по сравнению с уровнем измерительного шума.

Дисперсия априорной ошибки оценивания определяется адаптивным образом:

$$p^{i,}_{k,k-1} = a^2_{ii} p^i_{k-1} + \left(k^i_{k-1}\right)^2 M\left|\left(\theta^i_k\right)^2\right|. \qquad (12)$$

Дисперсия оценивания ошибки при использовании жёсткой обратной связи по обновляемому процессу имеет вид:

$$p^{i,}_{k,k-1} = a^2_{ii} p^i_{k-1} + \left(k^i_{k-1}\right)^2 \left(\theta^i_k\right)^2. \qquad (13)$$

В критерии (2) вместо СКО КОИ используется значение $\sqrt{P_{k+1}}$. Таким образом, сформирован критерий, по которому можно судить об эффективности использования КОИ в полёте ЛА.

Выводы. Исследованы критерии эффективности КОИ навигационных систем ЛА, базирующиеся на обработке данных лётных экспериментов. Для определения эффективности КОИ в полёте предложен критерий оценивания эффективности КОИ, предполагающий использование априорных данных лётного эксперимента при определении СКО ГЛОНАСС, а для определения СКО КОИ использовать информацию, получаемую в полёте с помощью алгоритма фильтрации.

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
2. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 3 (3). С. 44—47.
3. **Харин Е.Г., Копелович В.А., Якушев А.Ф.** Методы и средства обеспечения лётных испытаний навигационной аппаратуры потребителей систем ГЛОНАСС/GPS // Новости навигации. 2001. № 3. С. 6—8.
4. **Харин Е.Г., Копылов И.А., Копелович В.А., Клабуко Е.В.** Лётные исследования алгоритмов комплексной обработки информации инерциальных и радионавигационных систем // Новости навигации. 2010. № 1. С. 8—17.
5. **Харин Е.Г., Масленников В.Г., Вавилова Н.Б., Копылов И.А., Староверов А.Ч.** Оптимальная обработка информации от инерциальных и спутниковых навигационных систем при анализе после полёта // Радиотехника. 2001. № 1. С. 44—49.
6. **Харин Е.Г., Поликарпов В.Г., Копылов И.А., Копелович В.А., Кожурин В.Р.** Использование комплекса бортовых траекторных измерений для оценивания характеристик систем и комплексов бортового оборудования при лётных испытаниях самолётов // Гироскопия и навигация. 2006. № 3 (54). С. 89—93.
7. **Салычев О.С.** Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение. 1987. 216 с.
8. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кузнецов И.А.** Исследование особенностей спутниковых навигационных систем. В сб. Теоретические и практические исследования XXI века. Труды междунар. научн.-практ. конф. М.: 2014. С. 579—583.
9. **Соловьев Ю.А.** Системы спутниковой навигации. М.: Эко Трендз, 2000. 270 с.

УДК 004.942, 004.67, 656.7.043

Е.В. Пестерев, Я.Г. Клюшин, канд. физ-мат. наук, доц.
(Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации)
yogurt@live.ru

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Изучен процесс принятия решения, основанный на анализе многомерных данных, полученных из статистики функционирования рассматриваемых систем. Сформулированную в терминах обработки статистических данных поставленную задачу предложено исследовать в терминах распознавания образов и хемометрики. Рассмотрены методы формирования и обработки статистических данных, заключающиеся в формировании многомерной структуры данных с последующей её обработкой производственной функцией. Исходные признаки проанализированы с точки зрения принципа доминирующих мотиваций. Для апробации методов проведена серия численных экспериментов, которая заключается в определении среднего арифметического нескольких сгенерированных случайных чисел.

Ключевые слова: поддержка принятия решений; функция уверенности; производственные функции; статистические данные; многомерные данные; распознавание образов; хемометрика; байесовская вероятность; многофакторные модели; многомерная статистика.

The process of decision making based on the analysis of multidimensional data obtained from the statistics of considered systems functioning is studied. Raised task formulated in terms of statistical data processing is proposed to use in terms of form recognition and chemometrics. The methods of statistical data formation and processing, consisting in forming a multi-dimensional data structures with its subsequent processing by using the production function are considered. Initial signs are analyzed in terms of the dominant motivation principle. To test the methods a series of numerical experiments for definition the arithmetical mean of several generated random numbers.

Keywords: decision making support; confidence function; production functions; statistical data; multidimensional data; pattern recognition; chemometrics; Bayesian probability; multifactor models; multivariate statistics.

Введение. Развитие технологий хранения и обработки данных всё чаще находит отражение при решении задач поддержки принятия решений [1, 2]. Речь идёт о таких системах, как Business Intelligence, OLAP и т. п. Использование в этих системах методов многомерной статистики накладывает ограничения на применение принципов, отражающих понимание связи явлений, получивших своё применение при анализе доминирующих мотиваций [3]. Примечательно, что в психологии и физиологии при изучении доминирующих мотиваций считается, что мотивация отражается в особом распределении межимпульсных интервалов в нейронах различных отделов мозга. При этом кроме того, что отношение этих импульсов разное для различного мозга/индивида, оно различно для каждого биологического качества мотиваций. Но даже для каждого процесса отдельная область мозга характеризуется наличием какого-то количества нейронов с доминирующим для каждой мотивации распределением межимпульсных интервалов. Приняв за основу такой подход, для задач принятия решения сформулируем его следующим образом: влияет на принимаемое решение (доминирующую мотивацию) не только сам по себе фактор, но и условия, в которых она возникла, т. е. и все остальные факторы. Выход видится в применении подходов анализа многомерных данных, главным отличием которого от многомерной статистики [4] является акцентирование внимания на содержательной части данных, а не на статистических погрешностях [5, 6].

Также проблема заключается в том, что разделы, где применяются принципы анализа многомерных данных, зачастую используют уникальный аппарат для решения целого ряда задач из самых разных областей [7—10].

Но в своей предметной области аппарат производственных функций (ПФ), активно применяемый в экономическом анализе, вводит величины, характеризующие взаимосвязь факторов и влияние фактора на ответ (эластичность замещения, эластичность выпуска, предельный продукт).

Задача построения классификатора и функция уверенности. Будем считать, что исследуемое решение/свойство зависит от известного набора переменных. Математически сформулируем это следующим образом [4]: искомые решения (**y**-переменные) — функция от наблюдаемых переменных/факторов (**x**-переменные), т. е. $y = y(\mathbf{x})$, $x_i \in X$, $y_i \in Y$, $i = 1, ..., n$, $j = 1, ..., m$; X — множество всех **x**; Y — множество всех **y**. В результате серии наблюдений, каждой y-переменной ставится в соответствие вектор **x**-переменных. Пару $(y, \mathbf{x})$ будем называть прецедентом [11].

В качестве x предлагается брать не непосредственное значение x_i-переменной, а количество её появлений. Однако данные, использованные в таком виде, не отражают тех принципов, которые обозначены выше. Для этого необходимо организовать **x** в виде особой структуры данных, затем сформулировать правило, по которому каждому вновь выпавшему вектору **x** будет поставлена в соответствие y-переменная, т. е. необходимо решить задачу построения классификатора (регрессии и предсказания). В качестве решающего правила далее используется обобщение ПФ, которое назовем функцией уверенности, имея в виду, что получаемое значение есть уверенность в выборе соответствующей y-переменной.

Пусть дано некоторое множество **x**-переменных X и множество **y**-переменных Y, на котором определено отношение предпочтения $\succsim$. Тогда вещественная функция f: $Y \to \mathbb{R}$ называется функцией уверенности, если выполняется условие

$$y_1 \succsim y_2 \Leftrightarrow f((y_1, \mathbf{x})) \geqslant f((y_2, \mathbf{x})); \quad \forall \mathbf{x} \in X;\ y_1, y_2 \in Y, \tag{1}$$

где **x**-переменные являются сочетаниями элементов x_k множества X из m по k; m — количество элементов множества X, $k = 1, ..., m$.

В частном случае, когда множество X совпадает со множеством Y и при этом $k = 1$, то определение ни чем не отличается для функции полезности (ПФ). Обозначим $f((y, \mathbf{x})) = f(\mathbf{x})$, так как **y**-переменные однозначно определяются вектором **x**-переменных.

Аппарат ПФ сформулирован в терминах дифференциалов, но так как количество появления событий есть величина целочисленная, имеющая минимальное приращение, равное единице, то сформулируем следующие показатели этих функций в конечномерных разностях.

Предельный продукт — это мгновенная скорость изменения уверенности от частоты появления x_i-переменной:

$$Mf_i(\mathbf{x}) = \frac{\Delta f(\mathbf{x})}{\Delta x_i}. \tag{2}$$

Эластичность уверенности (выпуска) по отношению к количеству появлений x_i-переменной

$$\varepsilon_i(\mathbf{x}) = Mf_i(\mathbf{x}) \Big/ \frac{f(\mathbf{x})}{x_i}. \tag{3}$$

Если (2) — это мгновенная скорость, то знаменатель в (3) — средняя скорость изменения уверенности. Тогда отношение (3) есть характеристика того, как изменяется уверенность: если $\varepsilon(\mathbf{x}) > 1$, то мгновенная скорость больше средней до рассматриваемого момента, т. е. величина $f(\mathbf{x})$ ускоряется (в среднем за весь период, так как в предшествующем опыте ситуация могла быть и другой); а если $0 < \varepsilon(\mathbf{x}) < 1$, то величина $f(\mathbf{x})$ замедляется так же в среднем за весь период.

Формирование многомерных данных. Пусть имеется некоторая система, данные о функционировании которой используются для принятия последующих решений. Первое, что необходимо сделать — сформировать статистику в виде базы данных, а затем структурировать её так, чтобы можно было использовать предложенный аппарат. Для учёта динамики системы, т. е. эластичности уверенности (скорости изменения уверенности в зависимости от опыта), потребуется в процессе конвертации данных из исходной базы в структурированную рассчитать параметр $\varepsilon_i(\mathbf{x})$ по формуле (3). Начинать эту процедуру с самого начала нецелесообразно, так как первые расчёты "перекроются" последующими. К тому же если есть заданный аналитический вид функции уверенности, то и скорость функции $f(\mathbf{x})$ должна однозначно определяться. Но коэффициенты, входящие в $f(\mathbf{x})$, определяются по

полученным данным, т. е. будут изменяться с каждым следующим прецедентом. Чтобы первичные данные не пропали, рассчитанные по ним значения необходимо учесть, например, рассчитывая среднее между эластичностями на предыдущем шаге и текущем.

Информация, которая обрабатывается — количество появлений **x**-переменных при каком-то выборе *y*-переменной (прецедент), т. е. на входе необходим массив, состоящий из множества строк и нескольких столбцов, в которые будут записаны значения **x**-переменных и соответствующая им *y*-переменная. В первый столбец запишутся **y**-переменные. Тогда, если в базе *k* столбцов, то $m = k - 1$ — количество **x**-переменных, а *c* — количество строк в базе (количество прецедентов). Но массив, характеризующий данные о множестве значений, которые принимают **x**-переменные, не состоит из *c* строк, так как среди них много повторяющихся. Большинство из них будут повторяющимися, а само множество значений не должно превышать нескольких десятков. Если составим массив $\mathbf{p}^{(1)}$ с элементами $p_i^{(1)}$ ($i = 1, ..., m$), тогда *i*-й элемент говорит о количестве принимаемых значений каждой **x**-переменной. В дальнейшем верхний индекс **y**-переменной, взятый в круглые скобки — это мерность массива. Сумма всех элементов $p_i^{(1)}$ — это количество всевозможных значений, принимаемых **x**-переменными: $P = \sum_{i=1}^{m} p_i^{(1)}$. Множество **y**-переменных запишем в массив $\mathbf{d}^{(1)}$ с элементами $d_i^{(1)}$ ($i = 1, ..., n$), где *n* — количество **y**-переменных.

Далее предлагается структура данных, в которую конвертируется исходная база. Для её хранения необходимо два массива данных. Первый — двумерный массив $\mathbf{x}^{(2)}$ с элементами $x_{i,j}^{(2)}$ ($i = 1, ..., n$, $j = 1, ..., P$). Это информация о том, сколько раз встречалась x_j-переменная при выборе y_i-переменной. Однако интересна не столько информация о количестве появлений, сколько о том, какие были условия для возникновения каждой **x**-переменной. Для такой информации двух осей мало. Поэтому, кроме массива $\mathbf{x}^{(2)}$ введём массив $\mathbf{x}^{(3)}$ с элементами $x_{i,j,k}^{(3)}$ ($i = 1, ..., n$, $j = 1, ..., P$, $k = 1, ..., P$), который говорит о том, сколько раз появлялась x_k-переменная вместе с x_j-переменной в ситуации, когда выбиралась y_i-переменная. Пусть случилась ситуация, в которой выбрана пятая *y*-переменная, чему способствовало появление трёх **x**-переменных, первая из которых приняла третье значение из множества принимаемых ею значений, вторая — девятнадцатое, а третья — двадцать четвертое. Тогда, если принять, что $n = 10$, $m = 3$, $p_i^{(1)} = \text{const} = 10$, т. е. диапазон одинаков для каждой **x**-переменной, получим, что наибольшее $j = P = p_i^{(1)} m = 30$. После описанной ситуации инкрементированию подлежат: из массива $\mathbf{x}^{(2)}$ — $x_{5,3}^{(2)}$, $x_{5,19}^{(2)}$, $x_{5,24}^{(2)}$; из массива $\mathbf{x}^{(3)}$ — $x_{5,3,19}^{(3)}$, $x_{5,3,24}^{(3)}$, $x_{5,19,3}^{(3)}$, $x_{5,19,24}^{(3)}$, $x_{5,24,3}^{(3)}$, $x_{5,24,19}^{(3)}$.

В элемент с индексами *i*, *j*, *k* не будет записана информация о факторе *j*. Это следствие того, что массив $\mathbf{x}^{(3)}$ хранит информацию только о *k*-х элементах, которые выпали вместе с *j*-м элементом. Для хранения информации непосредственно о появлении фактора *j* служит массив $\mathbf{x}^{(2)}$. Так как в $\mathbf{x}^{(3)}$ инкрементируются все сочетания факторов, то в конечном итоге появление всех факторов учтётся.

Сформировав данные, можно приступить к обработке новых. Если прецеденты представляли пары (*y*, **x**), то новая ситуация характеризуется только набором **x**-переменных. В соответствии с этим набором необходимо выяснить, в какой из **y**-переменных можно быть более уверенными. Поэтому для каждой из них необходимо рассчитать функцию уверенности.

Функция уверенности будет являться суммой слагаемых, каждое из которых есть функция уверенности для отдельной **x**-переменной. Если ситуация состоит из *m* **x**-переменных, то функция уверенности состоит из *m* слагаемых, каждое из которых в свою очередь состоит из $m - 1$ слагаемого (для функции Кобба—Дугласа это будут множители).

В результате формируется одномерный массив **f**(**x**), состоящий из элементов $f_i(\mathbf{x})$ ($i = 1, ..., n$). **y**-переменные, в которых уверенность больше, имеют бльшие значения функции $f(\mathbf{x})$. Нетрудно упорядочить **y**-переменные в порядке уверенности в них. Первые из получившихся можно использовать для принятия решения.

Построение функции уверенности, численные эксперименты. Для апробации предложенных методов и алгоритмов написана компьютерная программа, целью которой было исследовать поведение функции при разных наборах следующих параметров: количество **x**-переменных, **y**-переменных, значений, при-

нимаемых одной **x**-переменной, экспериментов (прецедентов),

$$f(\mathbf{x}) = A\left(\sum_{i=1}^{m} a_i x_i^{\beta_i}\right)^h. \qquad (4)$$

Известно, что коэффициент замещения β_i связан с эластичностью замещения. Его численное значение получают из экономического анализа задачи. В численном анализе примем $\beta_i = 1$.

За основу алгоритма расчёта функции уверенности взята работа [7], в которой предлагалось в начале расчёта использовать более "простые" функции.

Серия экспериментов заключается в следующем: по набору **x**-переменных будут выбираться **y**-переменные, множество *Y* которых не совпадает со множеством *X*. Для такой постановки выбрана задача поиска среднего арифметического значения сгенерированных случайных чисел, из которых автоматически будет выбираться среднее арифметическое. Через заданное количество экспериментов проверяется, сможет ли программа для следующего набора чисел определить среднее арифметическое, не зная заранее принцип выбора, а опираясь только на статистику.

Один расчёт представляет собой следующую последовательность операций:

1. Генерация заданного количества случайных чисел и выбор среди них максимального.
2. Проведение заданного количества опытов.
3. Генерация заданного количества случайных чисел и выбор той *y*-переменной, для которой функция уверенности даёт максимальное значение.
4. Повторение операции 3 заданное количество раз.
5. Повтор операций 1—4 для одинакового количества прецедентов.
6. Расчёт среднего арифметического из числа правильных ответов.

Результатом всех этих действий будет одно число — количество правильных ответов для следующих заданных показателей: количество прецедентов, количество **x**-переменных (случайных чисел), **y**-переменных; количество значений, которые могут принимать **x**-переменные.

В результате получаем несколько серий экспериментов, в каждой из которых известно, какое количество ответов было правильным. Посчитав среднее арифметическое, найдём количество правильных ответов для заданного набора параметров. Последний блок повторений осуществляется для избежания субъективности, которая возникает при формировании прецедентов.

Полученные значения уверенности оценивались с точки зрения ординалистского подхода, так как абсолютные значения лишены смысла. Поэтому утверждать, что две разные **y**-переменные с разными значениями функции уверенности сильно отличаются в зависимости от различия их показателей — не верно. Чтобы это учесть, одновременно будем давать два варианта ответов: какой процент из **y**-переменных с наибольшей уверенностью совпадает с правильным ответом, и какой процент из двух **y**-переменных с наибольшими уверенностями совпадает с правильным ответом.

На (рис. 1—3) представлены расчёты зависимости количества правильных ответов *s* от прецедентов *k* и от **x**-переменных *m*, **y**-переменных *n*, принимаемых значений каждой *x*-переменной *p*. Базовым принят следующий набор значений: $n = 10$, $m = 10$, $p = 20$.

Проанализируем каждую из зависимостей в отдельности.

Из рис. 1 видно, что даже при малых значениях прецедентов функция уверенности имеет правильный ответ в более чем 20 % случаев. Это может быть связано с тем, что числа генерировались случайно с нормальным распределением выпадающих чисел. Поэтому когда начинаются экспериментальные генерации, то вероятность выпадения чисел, которые появлялись при формировании прецедентов, очень велика. Важнее то, что с увеличением прецедентов растёт и количество правильных ответов. Но для этой задачи эта зависимость не так ярко выражена при боль-

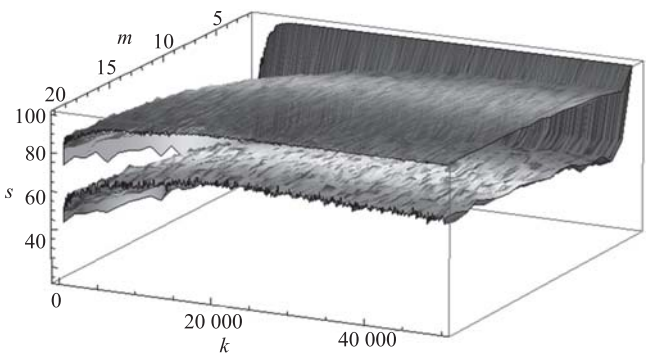


Рис. 1. Зависимость величин *s*, *m* и *k* при *n* = 10 и *p* = 20 для одного наибольшего значения (нижняя поверхность) и для двух наибольших значений (верхняя поверхность)

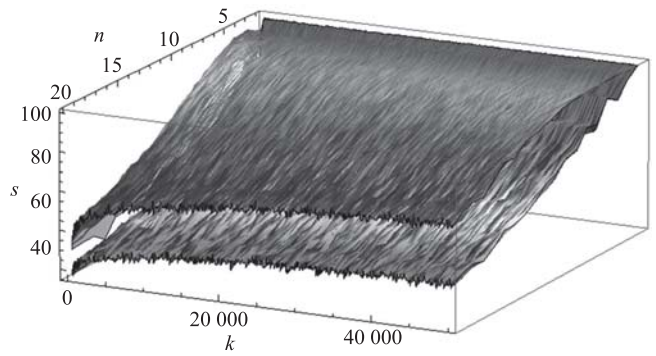


Рис. 2. Зависимость величин *s*, *n* и *k* при *m* = 10 и *p* = 20 для одного наибольшего значения (нижняя поверхность) и для двух наибольших значений (верхняя поверхность)

шом количестве **x**-переменных. Здесь проявляется ещё один интересный результат: чем больше **x**-переменных учтено, тем точнее будут предсказания. При малых значениях этого параметра количество правильных ответов достигает минимального значения. И чем больше **x**-переменных, тем больше отдаляются друг от друга две поверхности.

Во второй серии экспериментов (рис. 2) зависимость от рассматриваемого параметра другая: чем меньше количество **y**-переменных, тем больше правильных ответов даёт метод. При этом зависимость от количества **y**-переменных более существенна. Из рис. 2 видно, что увеличение их числа до 20 резко снижает количество правильных ответов. В рамках исследуемого диапазона ни верхняя, ни нижняя поверхности не достигают своих асимптот по величине правильных ответов, но значительно замедляют свой рост. При очень большом количестве прецедентов возможно достижение высоких показателей.

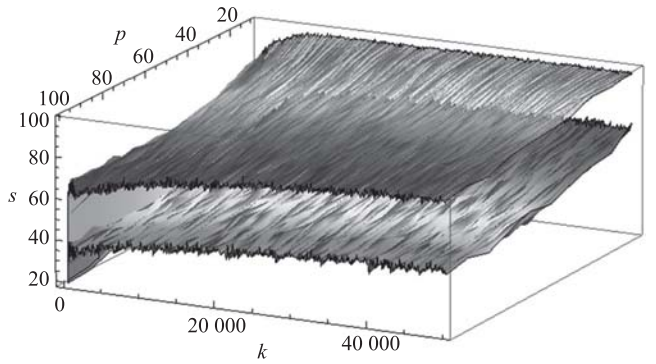


Рис. 3. Зависимость величин *s*, *p* и *k* при *m* = 10 и *n* = 10 для одного наибольшего значения (нижняя поверхность) и для двух наибольших значений (верхняя поверхность)

При варьировании количеством принимаемых значений **x**-переменными (рис. 3) существенные изменения претерпела нижняя поверхность. При малых значениях количества **x**-переменных количество правильных ответов остаётся на низком уровне. При этом верхняя поверхность повторяет своё поведение.

Начиная с некоторого момента, метод функции уверенности на каждом последующем этапе имеет не столь значительный прирост точности по сравнению с предыдущим, поэтому основываясь на этих расчётах, можно получить примерное представление о том, сколько данных необходимо обработать, чтобы иметь точный результат. Высокие результаты получались тогда, когда рассматривали ответ по двум максимумам, т.е. среди полученных ответов не стоит откидывать все, кроме первого решения. Например, в некоторых случаях получалось двукратное увеличение правильных ответов, когда рассматривали два наибольших значения. Стоит учесть, что в этих задачах приходилось проводить округление в ту или иную сторону. Поэтому утверждать, что из двух чисел одно правильнее другого — не всегда верно. Все зависит от способа округления.

Заключение. Таким образом, рассмотрена проблема распознавания решения, основанного на анализе многомерных данных. Для решения этой задачи были предложены структура данных, учитывающая попарное и тернарное появление **x**-переменных; метод обработки статистических данных, структурированных в соответствии с предложенным подходом, основанный на использовании ПФ.

Для экспериментальной оценки предложенных методов проведена серия экспериментов, заключающаяся в выборе одной из **y**-переменных на основании **x**-переменных в той ситуации, когда множество *Y* не совпадает со множеством *X*. В процессе тестирования получены графики зависимости количества правильных ответов от определяющих параметров: количество прецедентов, **x**-переменных, **y**-переменных, принимаемых значений каждой **x**-переменной.

Библиографические ссылки

1. **Тартынский В.А.** Реализация хранилищ данных в системах поддержки принятия решений // Молодой учёный. 2009. № 9. С. 31—34.

2. **Акимов А.А., Богатырев В.Е., Финогеев А.Г.** Системы поддержки принятия решений на базе беспроводных сенсорных сетей с использованием интеллектуального анализа данных // Надёжность и качество: сб. ст. Междунар. симп. Пенза: Приволжский дом знаний, 2010. С. 113—115.

3. **Крыжановский Г.А., Купин В.В.** К вопросу формализации предпочтений активных элементов в системе организации воздушного движения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2011. № 171. С. 114—120.

4. **Фомин Я.А., Тарловский Г.Р.** Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.

5. **Вапник В.Н., Червоненкис А.Я.** Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 416 с.

6. **Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.** The Elements of Statistical Learning. 2-nd edt. Springer. 2009. 739 p.

7. **Esbensen K.H.** Multivariate Data Analysis In Practice. An Introduction to Multivariate Data Analysis and Experimental Design. 5th edt. CAMO Process AS, 2010. 598 p.

8. **Beeb K.R., Pell R.J., Seasholtz M.B.** Chemometrics — A Practical Guide. Wiley, 1998. 360 p.

9. **Eriksson L., Johansson E., Kettaneh-Wold N., Wold S.** Multi-and Megavariate Data Analysis. Umea: Umetrics AB, 2006. 533 p.

10. **Hoskuldsson A.** Prediction methods in Science and Technology, vol. 1. Copenhagen: Thor Publishing, 1996. 404 p.

11. **Местецкий Л.М.** Математические методы распознавания образов: курс лекций. URL: http://www.ccas.ru/frc/papers/mestetskii04course.pdf (дата обращения: 26.04.2016).

ЭКСПОЦЕНТР

ВЕСТНИК ПРЕСС-СЛУЖБЫ

ИНТЕРПЛАСТИКА-2017
24.01.2017—27.01.2017
20-я Международная специализированная выставка пластмасс и каучука

УПАКОВКА / УПАКИТАЛИЯ-2017
24.01.2017—27.01.2017
25-я Международная специализированная выставка упаковочных технологий. Переработка, упаковка, печать

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ-2017
24.01.2017—27.01.2017
18-я Специализированная выставка строительных материалов

УДК 681.513

Е.С. Лобусов, канд. техн. наук, доц., **Хоанг Мань Тыонг**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Evgeny.lobusov@yandex.ru

ИЗМЕРЕНИЕ ОВАЛЬНОСТИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Рассмотрены вопросы, связанные с определением овальности труб большого диаметра, что является важным при организации процесса сварки. Проведён анализ существующих методов определения овальности, предложено для решения данной задачи использовать переносную платформу, снабжённую измерителями угловой скорости.

На основании геометрических свойств эллипса, как модели трубы большого диаметра, показано, что определение овальности можно связать с определением радиуса кривизны сечения трубы.

Перемещение измерительной платформы по поверхности трубы без потери контакта обеспечивает получение всех необходимых данных для текущего определения радиусов кривизны и, соответственно, их максимального и минимального значений.

Предлагаемые алгоритмы отработаны с помощью программно-реализуемого имитатора и подтвердили свою работоспособность.

Ключевые слова: измерительная платформа; труба большого диаметра; геометрические параметры эллипса; моделирование; овальность.

The questions associated with the definition of the large diameter pipes ovality, which is important in the organization of the welding process. The analysis of existing methods for determining ovality is carried out. it is proposed to solve this problem use A portable platform, equipped with gauges of angular velocity, is proposed to use for this task decision. Based on the geometrical properties of the ellipse as the model of large diameter pipe, it is shown that the ovality definition can be associated with the definition of the pipe section curvature radius. Measuring planform movement on pipes surface without losing contact loss platform provides all the necessary data receipt for the current definition of the curvature radius and, consequently, their maximum and minimum values. The proposed algorithms are worked out by using of programmaticaly implemented simulator and confirmed their efficiency.

Keywords: measuring platform; large-diameter pipe; geometric parameters of the ellipse; modeling; ovality.

Введение. Цилиндрические трубы широко применяются на предприятиях нефтяной и газовой промышленности. Для образования соединений используется операция сварки. Однако перед операцией соединения необходимо проконтролировать геометрические параметры соединяемых труб. Выявляемые дефекты проявляются в виде отклонений от заданных параметров. Так, овальность трубы ухудшает прочностные, гидродинамические качества трубопроводов, особенно при высоком давлении. Кроме того, овальность трубы усложняет процесс сварки. Если её параметры больше допустимого значения, то возникают сложности с последующей стыковкой и сваркой.

Для контроля параметров используются такие средства, как например, лазерный сканер, штангельтрубомер и др. [1—3]. Компания Nordinkraft Engineering (РФ) разработала систему для измерения диаметра и овальности труб, основанную на использовании оптико-электронных методов контроля и принципов оптической триангуляции [4]. К недостаткам приведённых средств можно отнести сложность конструкции, ограничение размеров измеряемых труб, большие затраты времени, низкая мобильность, невысокая точность.

Однако при применении оптико-электронных методов измерений возникает ряд факторов, снижающих точность, например вредное влияние внешних условий (изменение температуры, высокая влажность, вибрация и т. д.), материал и характер поверхности труб.

Изложенное в работах [5—7] решение задачи — определение геометрических параметров и ориентации в пространстве цилиндрическо-

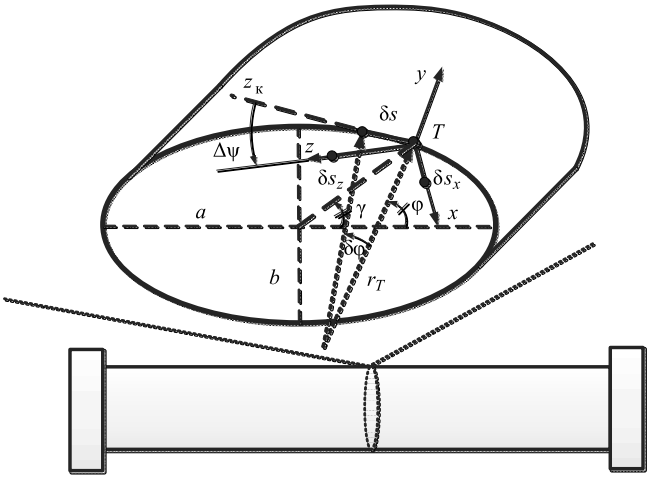


Рис. 1. Геометрические параметры трубы:
a, *b* — соответственно большая и малая полуоси эллипса трубы; *xyz* — система координат, связанная с расположением измерительного прибора (ось *x* в идеале направлена по продольной оси трубы)

го и конического тела с помощью переносной измерительной платформы, снабжённой датчиками угловой скорости — оказывается перспективным вариантом и для решения других практических задач. Ниже рассматривается определение овальности трубы с использованием предлагаемого подхода.

Постановка задачи определения овальности трубы. Имеется некоторая цилиндрическая труба, перпендикулярное сечение которой имеет эллиптическую форму. Овальность трубы определяется разностью большой и малой полуосей эллипса сечения.

Для определения большой и малой полуосей эллипса трубы воспользуемся переносной измерительной платформой [5, 7].

Детальное представление положения измерительной платформы на поверхности трубы в некоторой точке *T* показано на рис. 1.

Любое положение измерительной платформы в точке *T* на трубе характеризуется углами γ и $\Delta\psi$.

Для малых перемещений устройства (измерительной платформы) в окрестности точки *T* можно записать.

$$r_T \delta\varphi = \delta s,$$

где δs, $\delta\varphi$ — линейное и угловое перемещение платформы по поверхности трубы в плоскости сечения; r_T — радиус кривизны.

Именно вычисление радиуса кривизны составляет основную задачу. Для этого следует определить переменные δs и $\delta\varphi$.

Для определения угловой переменной $\delta\varphi$ воспользуемся измерительной платформой, представленной на рис. 2 [5, 7]. В соответствии с используемым подходом выделяются три этапа решения задачи.

На 1-м этапе платформа находится на опорном столе. За это время определяется угловая скорость Земли, что позволяет в дальнейшем рассматривать и анализировать только *относительное* движение платформы, что и требуется при практическом применении.

2-й этап функционирования платформы связан с её переносом (выполняется оператором) и установкой на поверхности трубы, которая рассматривается как правильное геометрическое тело. На этом этапе в работу включается и алгоритм интегрирования кинематических уравнений сложного углового движения.

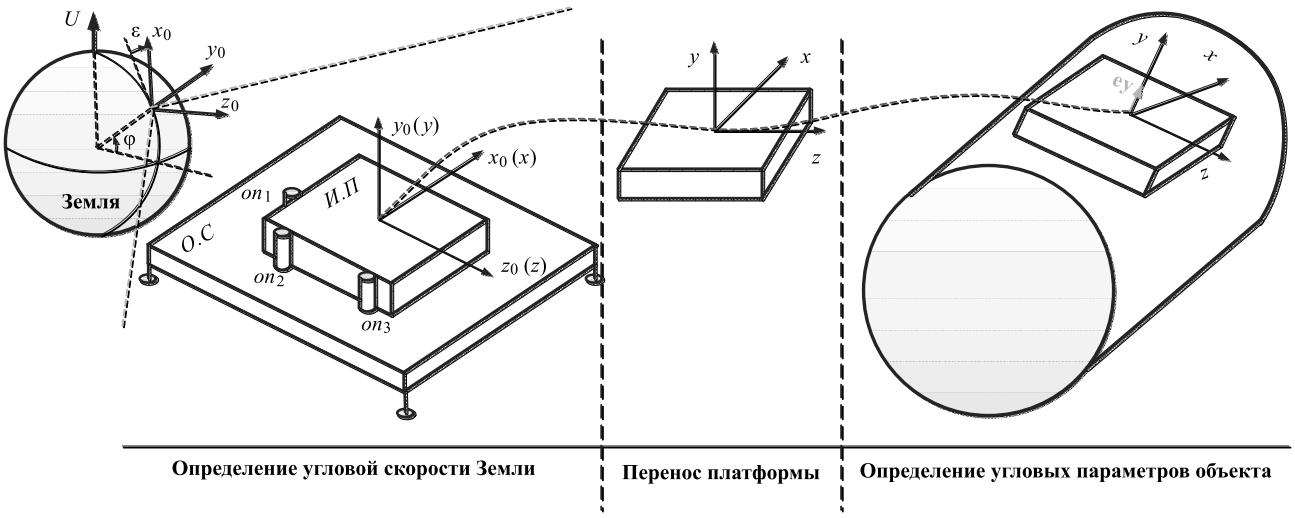


Рис. 2. Процесс определения овальности трубы

В процессе интегрирования происходит компенсация угловой скорости Земли.

3-й этап начинается с установки платформы на поверхность трубы и последующим перемещением по поверхности объекта без потери контакта.

При движении платформы по поверхности трубы угловое расстояние $\delta\varphi_i$ в окрестности точки T_i определяется по формуле

$$\delta\varphi_i = \arcsin\left(\left\|\left[\mathbf{e}_{y_i}, \mathbf{e}_{y_{i+1}}\right]\right\|\right), \qquad (1)$$

где $\mathbf{e}_{y_i}$ и $\mathbf{e}_{y_{i+1}}$ — единичные векторы направлений вдоль вертикальной оси платформы в моменты времени t_i и $t_i + \Delta t$ (Δt — шаг дискретизации).

Для определения линейного перемещения δs можно использовать различную аппаратуру, например оптические сенсоры, мерную ленту и др., а для получения высокой точности при определении линейного перемещения предлагается использовать мерную ленту с нанесёнными на неё рисками с известной дискретностью по расстоянию Δ_s. При перемещении платформы по поверхности трубы считываются проходящие риски. Происходит текущее интегрирование кинематических соотношений углового движения, что позволяет определить в текущем времени $\delta\varphi$, δs, а также текущий радиус кривизны r_T.

С учётом погрешностей измерения ε_s и ε_φ получается соотношение

$$\frac{\delta s + \varepsilon_s}{\delta\varphi + \varepsilon_\varphi} \cong \frac{\delta s}{\delta\varphi} + \frac{\varepsilon_s}{\delta\varphi} - \frac{\delta s}{(\delta\varphi)^2}\varepsilon_\varphi,$$

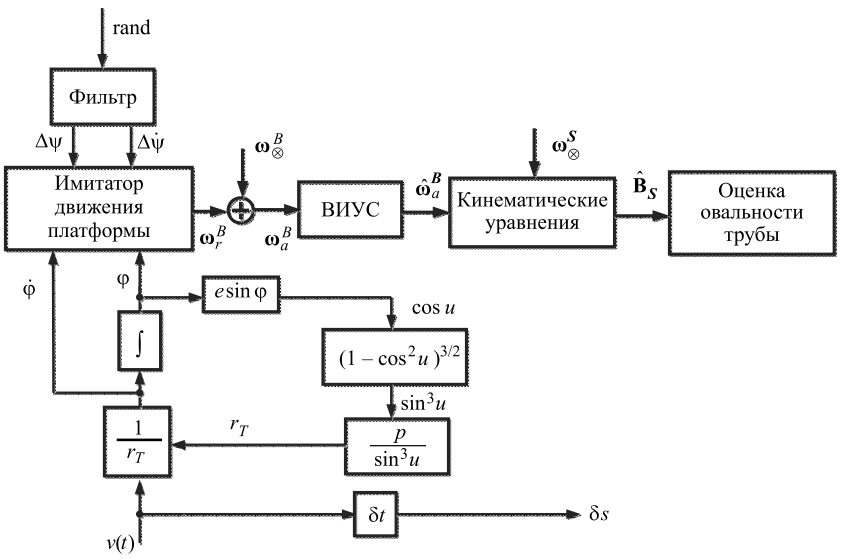


Рис. 3. Схема моделирования процесса проведения измерений радиусов кривизны

а относительная погрешность определения радиуса кривизны r_T имеет вид

$$\frac{\hat{r}_T - r_T}{r_T} = \frac{\dfrac{\varepsilon_s}{\delta\varphi} - \dfrac{\delta s}{(\delta\varphi)^2}\varepsilon_\varphi}{\dfrac{\delta s}{\delta\varphi}} = \frac{\varepsilon_s}{\delta s} - \frac{\varepsilon_\varphi}{\delta\varphi}. \qquad (2)$$

Погрешность вычисления угловой переменной, т.е. погрешность интегрирования, практически отсутствует, т.е. $\varepsilon_\varphi = 0$, а относительная погрешность определяется только погрешностью измерения линейного перемещения ε_s, отсюда

$$\frac{\hat{r}_T - r_T}{r_T} = \frac{\varepsilon_r}{r_T} \cong \frac{\varepsilon_s}{\delta s}.$$

Обычно для трубы большого диаметра требуется точность определения радиуса кривизны не хуже 1 % [1].

Кроме того, из общего выражения для радиуса кривизны в меридиональном сечении

$$r(\gamma) = \frac{(a^2\sin^2\gamma + b^2\cos^2\gamma)^{3/2}}{ab}$$

следует, что

$$r_{\min} = \frac{b^2}{a},\ r_{\max} = \frac{a^2}{b}.$$

Поэтому из полученных текущих значений радиусов кривизны находят максимальное и минимальное значения $r_{\min}$ и $r_{\max}$, позволяющих определить малую и большую полуоси:

$$b^3 = r_{\max} r_{\min}^2 \text{ и } a^3 = r_{\max}^2 r_{\min},$$

а также овальность ε трубы по формуле:

$$\varepsilon = 2(a - b).$$

Из изложенного выше подхода определения овальности ясно, что реализация подхода направлена на вычисление максимального и минимального значений радиусов кривизны.

Отработка алгоритма процесса определения овальности трубы моделированием. Для отработки процесса определения текущих радиусов кривизны используется соответствующий имитатор. На рис. 3 показана схема для моделирования процесса проведения измерений радиусов кривизны.

Кинематические уравнения при движении платформы по поверхности трубы:

$$\boldsymbol{\omega}_a^B = \boldsymbol{\omega}_\oplus^B + \boldsymbol{\omega}_r^B = \mathbf{B}_s \omega_\oplus^S + \mathbf{A}_2(\Delta\psi)\begin{bmatrix}\dot{\varphi}\\0\\0\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\\Delta\dot{\psi}\\0\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2(\Delta\psi) = \begin{bmatrix}\cos\Delta\psi & 0 & -\sin\Delta\psi\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\Delta\psi & 0 & \cos\Delta\psi\end{bmatrix},$$

где $\boldsymbol{\omega}_r^B$ — вектор угловой скорости в связанной с платформой системой координат; $\boldsymbol{\omega}_\oplus^S$ — вектор угловой скорости вращения Земли (определён на первом этапе); $\mathbf{B}_S$ — матрица направляющих косинусов, характеризующая текущее угловое положение платформы от положения на момент установки на поверхность трубы; $\Delta\dot{\psi}$, $\Delta\psi$ — угловая скорость и угол, вызванные возмущениями от действий оператора (считаются случайными) относительно вертикального направления платформы; φ — угловое перемещение платформы вокруг центральной оси трубы от положения платформы на момент установки на поверхность трубы.

Блоки ВИУС и кинематические уравнения на рис. 3 определяются соответствующими моделями.

Параметры трубы как эллипса задаются значениями фокального параметра $p = \dfrac{b^2}{a}$ и эксцентриситета $e = \dfrac{c}{a}$.

Скорость обкатки $v(t)$, т.е. скорость перемещения платформы по поверхности трубы, рассматривается как входная независимая переменная. Вектор скорости лежит в плоскости сечения трубы. На рис. 4 показаны используемые переменные.

Используя свойства эллипса [2], можно записать выражение для радиуса кривизны:

$$r_T = \frac{p}{\sin^3 u},$$

где $\cos u = e\sin\varphi$.

В свою очередь, изменение угла φ определяется из решения дифференциального уравнения $\dot{\varphi} = \dfrac{v(t)}{r_T}$.

Фильтр (формирующий фильтр 2-го порядка) позволяет рассчитать как выходную переменную, так и её производную.

Знание выходных сигналов имитатора позволяет выполнить обработку на предмет получения $\delta\varphi$ и δs.

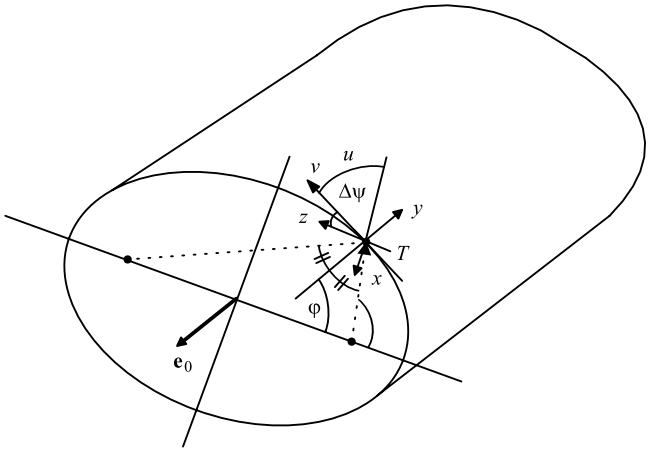


Рис. 4. Сечение трубы

Текущая переменная $\delta\varphi_i$ получается как результат интегрирования кинематических соотношений, позволяющих вычислить угловое положение платформы в двух положениях.

Результат векторного произведения векторов $\mathbf{e}_{y_i}$ и $\mathbf{e}_{y_{i+1}}$ можно записать в виде

$$\mathbf{B}_\text{э}^\text{T}\Big|_1 \begin{bmatrix}0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 0\end{bmatrix} \mathbf{B}_\text{э}^\text{T}\Big|_1 \mathbf{B}_\text{э}^\text{T}\Big|_2 \begin{bmatrix}0\\1\\0\end{bmatrix} = [\mathbf{e}_{y_1}, \mathbf{e}_{y_2}],$$

где $\mathbf{B}_\text{э}^\text{T}\Big|_1$ и $\mathbf{B}_\text{э}^\text{T}\Big|_2$ — матрицы направляющих косинусов (МНК) в двух положениях платформы на поверхности трубы.

В данном выражении матрицы рассчитываются относительно опорного стола.

Переменная δs получается как разность

$$\delta s = s_i - s_{i-1}.$$

Условия моделирования:

скорость линейного перемещения $v(t) = 30 + v_\text{сл}$, мм; $v_\text{сл}$ — случайная функция;

угловое вращение платформы вокруг своей вертикальной оси $\Delta\psi(t) = \Delta\psi_\text{сл}$, $\Delta\psi_\text{сл}$ — случайная функция;

угловая установка платформы на трубе: начальный угол $\varphi = 30°$; начальный угол $\Delta\psi = 1°$;

шаг дискретизации по времени $\delta t = 0{,}025$ с;

шаг дискретизации по перемещению считается достаточно малым;

большая и малая полуоси эллипса сечения приняты равными:

$a = 550$ мм; $b = 500$ мм;

цена импульса ВИУС — 0,29″/имп.;

время проведения моделирования $t = 60$ с.

На рис. 5—7 показаны результаты моделирования процесса проведения измерения овальности трубы.

По результатам моделирования получены следующие результаты:

оценка максимального значения радиуса кривизны $\hat{r}_{\max} = 608{,}7154$ мм;

оценка минимального значения радиуса кривизны $\hat{r}_{\min} = 451{,}4602$ мм;

оценки малой и большой полуосей эллипса:

$$\hat{b} = \sqrt[3]{\hat{r}_{\max}\hat{r}_{\min}^2} = 498{,}7517 \text{ мм},$$

$$\hat{a} = \frac{\hat{b}^2}{\hat{r}_{\min}} = 550{,}9971 \text{ мм};$$

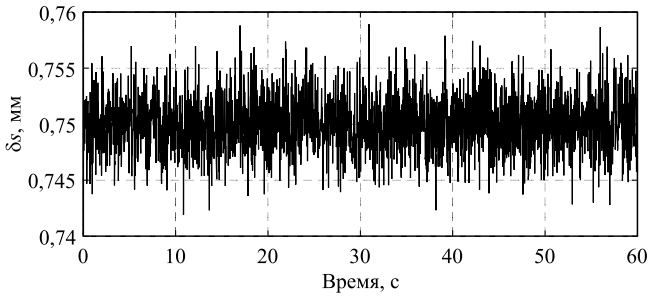


Рис. 5. Линейное перемещение δ*s*

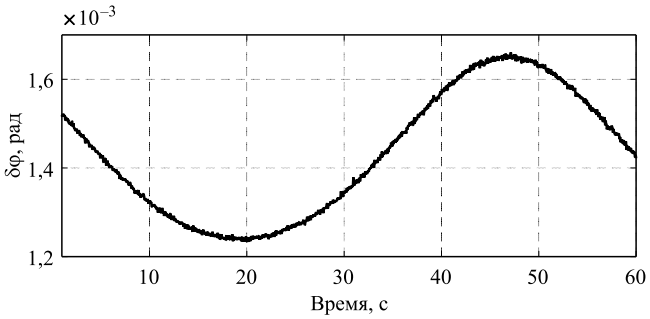


Рис. 6. Угловое перемещение δφ

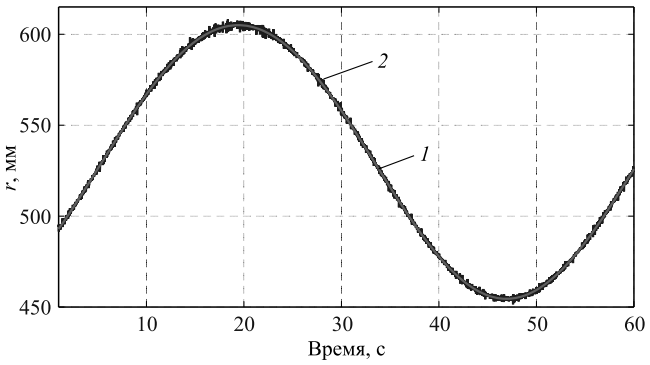


Рис. 7. Значения радиуса кривизны трубы *r*, мм:
1, *2* — реальные и полученные

точность определения значений малой и большой полуосей:

$$\delta b = 1{,}2483 \text{ мм}, \ \delta a = 0{,}9971 \text{ мм};$$

действительное значение овальности трубы $\varepsilon = 100$ мм, оценка значения овальности трубы $\hat{\varepsilon} = 104{,}4908$ мм, результирующая точность ≈ 5 %.

Выводы. Таким образом, для определения овальности труб большого диаметра предлагается использовать переносную платформу с установленными на ней измерителями угловой скорости.

Разработаны алгоритмы определения овальности, основанные на использовании свойств эллипса и интегрировании кинематических уравнений углового движения.

Проведено моделирование предлагаемых алгоритмов с использованием имитатора, которое показало работоспособность данных алгоритмов по определению значения овальности трубы.

Библиографические ссылки

1. **Берндшустер**, **Лейнгрубер Томас.** Новая технология соединения полиэтиленовых труб большого диаметра. Технологии и материалы. Полимерные трубы. № 3 (12) / Июль 2006. С. 32—36.

2. **Бурмистров Е.В.** Измерение отклонений формы цилиндрических поверхностей // Метод указания к лабораторной работе / Самарский государственный аэрокосмический ун-т. Самара, 2001. 20 с.

3. **Персион А.А.**, **Гарус К.А**. Монтаж трубопроводов. Справочник. Киев. 1987. 208 с.

4. http://nk-engineering.com/ready/sistema-izmereniya-diametra-i-ovalnosti-trub-razlichnogo-diametra (дата обращения: 09.03.2016).

5. **Лобусов Е.С.** Использование инерциальных средств для определения углового положения цилиндрических тел // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 8. С. 31—35.

6. **Лобусов Е.С.**, **Хоанг Мань Тыонг.** Использование средств инерциальной навигации для определения ориентации в пространстве и угла при вершине прямого кругового конуса // Мехатроника, автоматизация, управление. № 3. 2016. С. 211—216.

5. **Овчинникова Е.В.** Определение параллельности валов при помощи Paralign @ // Российский научно-технический журнал MEGATECH — новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. 2011. Т. 2—3. С. 88—89.

УДК 628.937

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд., экон. наук, доц.
(Московский технологический университет),
А.А. Ашрятов, канд., техн. наук, доц., **С.А. Вишневский**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)

mikaeva@npo.lit.ru

РАЗРАБОТКА СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ С ИЗМЕНЯЕМЫМ СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены сверхяркие светодиоды с возможностью излучать свет в узких диапазонах длин волн, обладающие рядом существенных преимуществ перед источниками света других типов, способствующие созданию совершенно новых, уникальных по своему дизайну и характеристикам световых приборов — интеллектуальных светильников. Предлагаемые светодиоды могут не только изменять цветовую температуру и световой поток, излучаемого светильником света, в режиме реального времени, но и за секунды преобразовать светоцветовую среду помещения. Однако отсутствие необходимой информации и опыта разработок в данной области затрудняет развитие световых приборов с изменяемым спектром излучения.

Ключевые слова: источник света; световой прибор; светильник; регулируемый спектр излучения; светодиодная лента; освещение музеев и выставок; динамическое освещение.

Ultrabright LEDs with possibility to emit light in narrow wavelength ranges are introdused. LEDs have a number of significant advantages over other types of light sources and promote to create of lighting devices — intellectual lamps, which are completely new, unique in its design and characteristics. Offered LEDs can not only change in real time the color temperature and the emitted luminous flux, but also convert for a second lightcolor environment premises environment. However, lack of necessary information and development experience in this area hinders the development of lighting devices with variable emission spectrum.

Keywords: a light source; light device; lamp; adjustable emission spectrum; LED strip; lighting of museums and exhibitions; dynamic lighting.

Введение. Появившиеся не так давно на рынке светодиодные источники света составляют значительную конкуренцию другим, ранее используемым типам источников света. Преимуществами новых светодиодов являются высокая световая отдача, большой срок службы, малые габариты, экологичность и др. Кроме того, такие отличительные особенности светодиодов, как большая яркость и способность излучать свет в узком диапазоне длин волн, позволяют создавать уникальные по своему дизайну и характеристикам световые приборы.

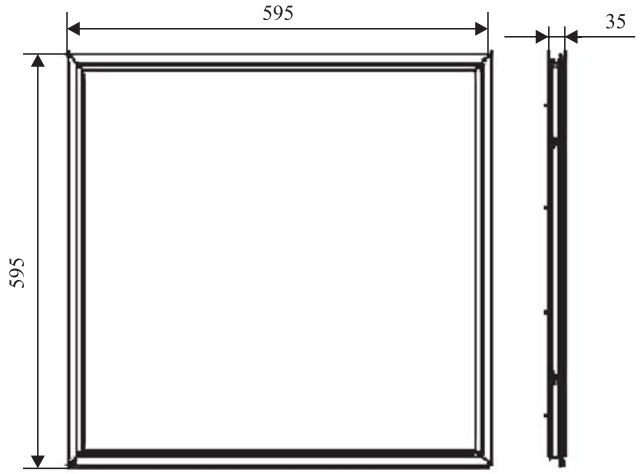
Особенность световых приборов, основанных на светодиодных источниках света, излучающих свет с различными длинами волн — способность изменять суммарный спектр излучения всего светового прибора [1]. Такие световые приборы можно применять для формирования светоцветовой среды помещения. Использование подобных световых приборов для освещения выставочных экспонатов, макетов, картин и т.п. позволяет подчеркнуть все тонкости и детали освещаемого объекта, выразить его истинный смысл [2]. Например, при освещении картины, которую художник писал при закате солнца, светом галогенных ламп теряется её истинный вид, это обусловливается тем, что краски, используемые для написания картины при естественном свете, имеющем иной спектр, получат совершенно другие оттенки. Применяя для освещения световой прибор с изменяемым спектром излучения, появляется возможность подобрать спектр излучения так, что будут подчеркнуты все тонкости рассматриваемой картины.

Другая область применения световых приборов данного типа — освещение рабочих помещений. Цветовая температура естественного света меняется на протяжении всего дня, формируя циркадные ритмы в организме человека. Освещение помещений светом с постоянной цветовой температурой приводит к сбою циркадных ритмов, что вызывает повышенную сонливость днём и не крепкий сон ночью [3]. Использование световых приборов с изменяемым спектром излучения позволит поддерживать циркадные ритмы человека, что будет способствовать повышению уровня

работоспособности, улучшению физического и психологического состояний человека [4, 5]. Люди, проживающие на территориях крайнего севера, лишены суточной дозы солнечного света, что вызывает ультрафиолетовую недостаточность. Добавление в светильник светодиодов, излучающих необходимую дозу ультрафиолетового излучения, будет способствовать выработке витамина D в организме человека.

Возможности создания световых приборов с изменяемым спектром излучения. Изменять спектральный состав излучаемого световым прибором света можно несколькими способами. В простейшем варианте в световом приборе размещают несколько источников света, излучающих свет с определёнными спектрами. При необходимости изменения спектрального состава света, излучаемого световым прибором, выполняется переключение с одного используемого источника света на другой. Этот способ достаточно прост и не требует использования сложных контроллеров, но в этом случае возможно получить лишь несколько вариантов спектрального состава света. Размещение в корпусе светильника одной группы основных источников света одного типа, как правило, излучающих белый свет, и несколько дополнительных групп источников света, излучающих свет в отдельных узких областях спектра видимого излучения, позволяет корректировать спектр излучения группы основных источников света. Такой метод требует использования сложного контроллера, но позволяет выполнять более точную корректировку спектра излучения светового прибора [6].

а)



б)

Рис. 1. Потолочный светильник "Армстронг":
а — внешний вид; *б* — габаритные размеры

Существует огромный выбор светильников, предназначенных для освещения закрытых помещений, отличающихся размерами, формой, мощностью и др. Наиболее широкое и целесообразное применение получили потолочные светильники типа "Армстронг".

Потолочный светильник типа "Армстронг" имеет форму квадрата размерами 595×595 мм (рис. 1). Высота светильника зависит от используемых в нём источников света. Световой поток, излучаемый светильником, зависит от мощности и количества используемых в светильнике источников света, а также от типа рассеивателя. Обычно для создания заданного уровня освещённости, равномерно распределённому по площади помещения, используются светильники, имеющие световой поток 3000—4500 лм.

В качестве источников света в светильниках обычно используют светодиодные модули или светодиодные линейки (рис. 2), равномерно размещённые по площади основания светильника. В зависимости от мощности чаще всего в светильник устанавливают 16, 20, 25, 30 или 36 светодиодных модулей либо 4 или 5 светодиодных линеек. Также возможно использование светодиодных лент.

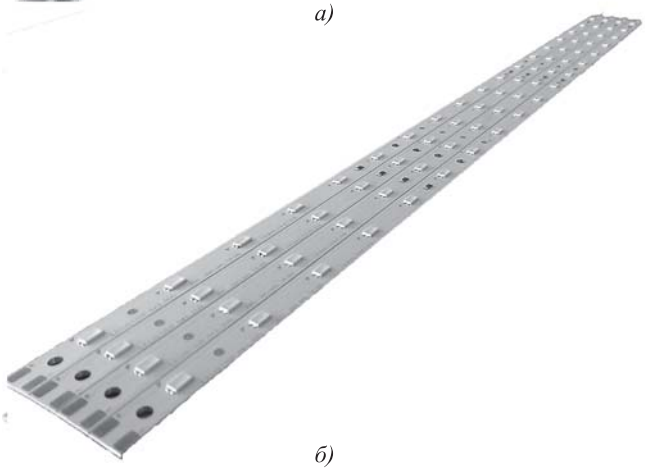
В настоящее время выпускают светодиодные ленты, линейки и модули, имеющие различные электрические параметры. Светодиодные ленты рассчитаны на напряжение питания 12 или 24 В и потребляют ток, значение которого напрямую зависит от длины ленты. Светодиодные модули рассчитаны на питание от 5, 12, 24 В или другие напряжения. Светодиодные линейки рассчитаны на питание со стабилизацией по току, значение которого может быть 150, 300, 700 мА или др.

Для питания светодиодных источников света применяют специальные драйверы питания со стабилизацией по току либо по напряжению. При использовании схемы питания со стабилизацией по напряжению выходное напряжение драйвера подбирают в соответствии с напряжением питания источника света. При использовании схемы питания со стабилизацией по току, подбирают соответствующий драйвер, способный поддерживать в цепи питания ток, требуемый источнику света. Мощность драйвера подбирают с учётом коэффициента запаса и находят по формуле:

$$P_{\text{др}} \geqslant \Sigma P_{\text{ист}} k_{\text{зап}},$$

где $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, равный 1,25.

а)



б)

в)

Рис. 2. Светодиодные источники света:
а — модуль; *б* — линейка; *в* — лента

Таким образом, мощность драйвера питания должна быть равна или больше суммарной мощности всех источников света, подключённых к драйверу, умноженная на коэффициент запаса.

Так как описываемый световой прибор должен содержать не только источники, излучающие белый свет, но и источники, излучающие свет с длинами волн, соответствующими красному, жёлтому, зелёному, синему и фиолетовому цветам, необходимо применять несколько драйверов питания [6].

В качестве источников, излучающих белый свет, целесообразнее использовать светодиодные линейки. В качестве источников, излучающих свет различных цветов, целесообразнее использовать светодиодные ленты. Светодиодные модули усложняют процесс смешения белого света и света различных цветов вследствие большой концентрации яркости в местах расположения светодиодных модулей.

При использовании в качестве источников белого света светодиодных линеек необходимо подбирать драйвер со стабилизацией по току и с возможностью диммирования. Соответственно, для питания светодиодных лент, излучающих свет различных цветов, потребуется драйвер со стабилизацией по напряжению и контроллер, задающий токи питания светодиодным лентам, излучающим свет отдельных цветов.

Одна светодиодная линейка NEO-L-30S5630, излучающая белый свет, при токе питания 300 мА выдаёт световой поток 980 лм [7]. С учётом того, что кроме основных источников излучающих белый свет, в светильнике будут установлены дополнительные источники света, излучающие свет различных цветов, а также учитывая, что часть света, излучаемого светодиодами, будет поглощена рассеивателем, то для создания светового потока в пределах 3000—4000 лм достаточно использовать четыре светодиодные линейки.

Требуемая длина светодиодной ленты, излучающей свет того или иного цвета, зависит от цветовой температуры источника, излучающего белый свет. Это связано с тем, что белый свет, излучаемый светодиодами, представляет собой смесь синего света, излучаемого кристаллом светодиода, и жёлтого света, излучаемого люминофорным слоем. Если свет, излучаемый светодиодом, холодный, то в нём преобладает синяя составляющая, если тёплый — жёлтая [6]. Таким образом, используя в качестве основного источника светодиоды, излучающие холодный свет, потребуется большое количество светодиодов, излучающих свет с длинами волн, соответствующими красному, оранжевому и жёлтому цветам, и наоборот, используя в качестве основного источника света светодиоды, излучающие тепло — белый свет, потребуется большое количество светодиодов, излучающих свет с длинами волн, соответствующими фиолетовому, синему и голубому цветам.

Варианты конструкции и их особенности. Как было указано ранее, прототипом разрабатываемого светодиодного светильника с изменяемым спектром, будет являться потолочный светильник типа "Армстронг". В качестве источников света будут использоваться светодиодные линейки и ленты.

В простейшем случае возможно расположение светодиодных линеек, излучающих белый свет на задней стенке светильника (рис. 3). В таком случае светодиодные ленты, излучающие свет различных цветов, придётся разместить в непосредственной близости к светодиодным линейкам, излучающим белый свет, в противном случае на рассеивателе будут видны цветные пятна, что ухудшает внешний вид светильника.

Представленный вариант расположения светодиодных лент и линеек наиболее простой, но самый актуальный при использовании незначительного количества либо отсутствия светодиодных лент, излучающих свет различных цветов. Это связано с тем, что при использовании светодиодных лент, излучающих свет различных цветов, большой мощности даже при их расположении вплотную со светодиодными линейками, излучающими белый свет, смешение света с различными длинами волн не будет осуществлено в нужной мере, что повлечёт возникновение цветных пятен на рассеивателе светильника.

Устранить возникновение цветных пятен можно, расположив светодиодные ленты, излучающие свет различных цветов, имеющих большую насыщенность (красный, зелёный и синий), таким образом, чтобы свет от них попадал на рассеиватель, лишь отразившись от основания светильника (рис. 4). В этом случае свет, попадающий на рассеиватель, не будет сконцентрирован непосредственно над светодиодными лентами в виде насыщенных цветных пятен, что позволит получить равномерное смешение и распределение света по площади рассеивателя.

Данное утверждение справедливо лишь для цветных светодиодных лент, при включении светодиодных линеек, излучающих белый свет на однородном фоне рассеивателя,

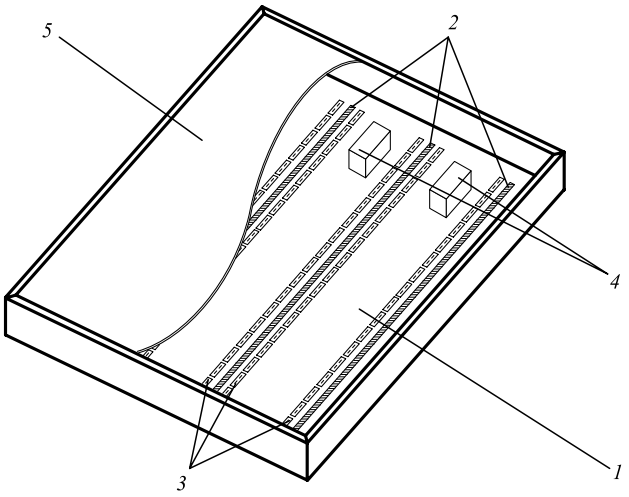


Рис. 3. Взаимное расположение узлов светильника:
1 — задняя стенка светильника; *2* — светодиодные линейки (ленты), излучающие белый свет; *3* — светодиодные ленты, излучающие свет различных цветов; *4* — драйверы питания; *5* — рассеиватель

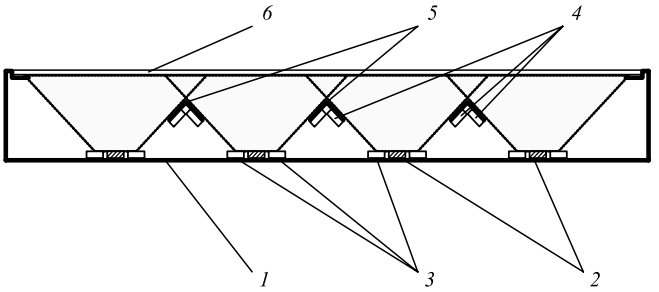


Рис. 4. Расположения светодиодных лент и линеек в светильнике:
1 — задняя стенка светильника; *2* — светодиодные линейки (ленты), излучающие белый свет; *3* — светодиодные ленты, излучающие свет жёлтого и фиолетового цветов; *4* — светодиодные ленты, излучающие свет синего, зелёного и красного цветов; *5* — алюминиевые уголки-теплоотводы; *6* — рассеиватель

оттенок которого зависит от интенсивности излучения того или иного цвета, возникнут ярко выраженные пятна белого цвета, расположенные над линейками, излучающими белый свет. Это связано с тем, что яркость светодиодных линеек, излучающих белый свет, намного выше яркости светодиодных лент, излучающих свет различных цветов.

Оптимальным является вариант, когда светильник полностью основан на отражённом свете (рис. 5). В данном случае выгоднее все светодиодные линейки и ленты разместить на боковых стенках светильника. Причём светодиодные линейки, излучающие белый свет, разместить ближе к рассеивателю и закрыть светозаграждающими пластинами так, чтобы свет от них не попадал напрямую на рассеиватель.

Покрытие задней стенки светильника возможно исполнить в двух вариантах, зеркальное и диффузное (белое матовое). В первом случае при использовании зеркального покрытия задней стенки светильника светораспределение на рассеивателе будет напрямую зависеть от того, под каким углом наблюдатель смотрит на светильник, и в некоторых случаях возможно наблюдение цветных пятен. В случае, когда задняя стенка светильника имеет диффузное покрытие, осуществляется наиболее качественное и равномерное смешение цветов, что даёт равномерное распределение света на плоскости рассеивателя, почти не зависящее от угла наблюдения.

Светодиодные линейки, излучающие белый свет, из-за большой яркости светодиодов необходимо размещать вплотную к светозаграждающей пластине. Ширина пластины не должна быть большой и выбирается таким образом, чтобы выполнялся закон полного отражения, и свет, попадающий от светодиодной линейки, напрямую на рассеиватель не проходил через него (рис. 6).

Таким образом, оптимальным вариантом светового прибора с изменяемым спектром излучения является прибор, использующий отражённый свет и большое количество светодиодов малой мощности. Для питания отдельных групп светодиодов необходимо использовать отдельный драйвер питания или отдельный канал многоканального драйвера питания с возможностью регулирования тока питания каждой отдельной группы светодиодов (рис. 7) [6].

Заключение. Возможность создания световых приборов с изменяемым спектром излучения появилась совсем недавно [1], в связи с чем информация о сложностях, возникающих при конструировании подобных световых приборов, отсутствует. Рассмотренный опыт, связанный с разработкой описываемых световых приборов, подтверждает возможность их создания, а также подчеркивает преимущества и недостатки различных вариантов конструкции.

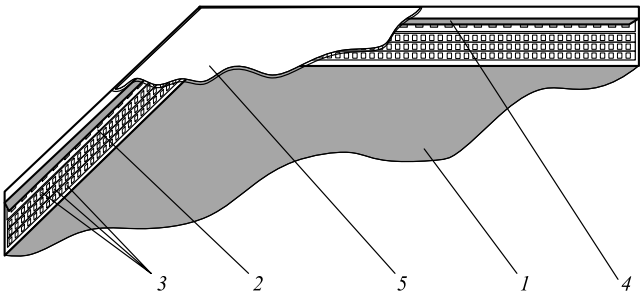


Рис. 5. Конструкция светильника рассеянного света:
1 — задняя стенка светильника; *2* — светодиодные линейки (ленты) излучающие белый свет; *3* — светодиодные ленты, излучающие свет различных цветов; *4* — светозаграждающие пластины; *5* — рассеиватель

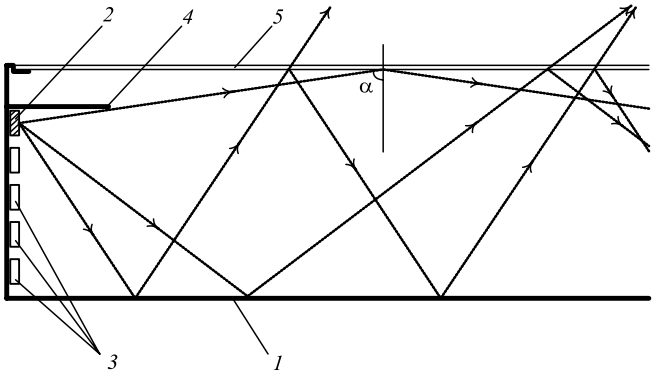


Рис. 6. Ход лучей в светильнике:
1 — задняя стенка светильника; *2* — светодиодные линейки (ленты), излучающие белый свет; *3* — светодиодные ленты, излучающие свет различных цветов; *4* — светозаграждающие пластины; *5* — рассеиватель; α — угол полного отражения

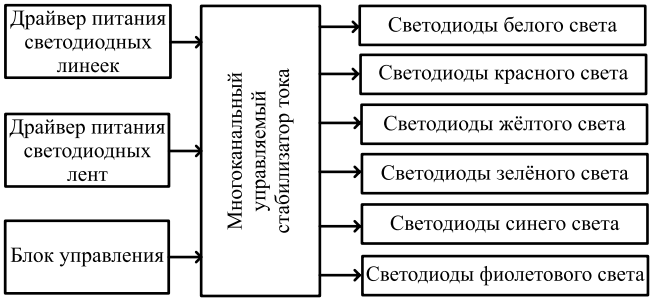


Рис. 7. Структурная схема соединения электрических узлов светильника

Соединение описанных светильников в осветительную установку, управляемую единым контроллером, а также добавление дополнительных датчиков мониторинга освещённости и цветовой температуры позволит получить интеллектуальную осветительную установку, способную выполнять различные задачи в зависимости от области применения.

Использование данной осветительной установки для освещения рабочих помещений [3] позволит имитировать освещение, близкое к естественному [5], что снизит сонливость персонала и тем самым повысит производительность труда [8]. При использовании описываемой осветительной установки в зонах отдыха, гостиных, комнатах переговоров и других подобных помещениях, появится возможность создания такой светоцветовой среды помещения, которая будет гармонично сочетаться с интерьером самого помещения, что создает благоприятную атмосферу как для отдыха, так и для проведения переговоров. Освещение предложенными светильниками экспонатов в музеях и выставочных павильонах, картин в картинных галереях и т.п. [2] позволит настраивать свет так, что освещаемый объект предстанет перед зрителем совершенно в другом стиле.

Библиографические ссылки

1. **Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е.** Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // Светотехника. 2013. № 5—6. С. 34—39.

2. **Шанда Я.** Что такое точность воспроизведения цвета в музейном освещении // Светотехника. 2014. № 5. С. 23—27.

3. **Захари Иванов.** Применение биодинамических систем освещения в осветительных установках. Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. X Междунар. науч.-тех. конф., Саранск, 13—14 декабря 2012 г. Саранск: СВМО, 2012. С. 115—119.

4. **Вишневский С.А., Ашрятов А.А.** About the intellectual control of the led the lighting installation // сб. науч. тр. XI Национальной конференции с международным участием BulLight2014. Болгария, 2014. С. 90—92.

5. **Внукова О.** Освещение офисных пространств с учётом суточных биоритмов человека // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 5. С. 24—25.

6. **Вишневский С.А., Ашрятов А.А.** Автоматический регулятор цветовой температуры светодиодных источников света: сб. науч. тр. SWorld — Одесса, 2013. С. 61—63.

7. **Светодиодный** модуль NEO-L-30S5630. URL: http://e-neon.ru/user_img/catalog_datasheets/neo-l-30s5630_ver%201.3.pdf (Дата обращения: 15.01.2016).

8. **В. Ван Боммель.** Качество освещения и энергоэффективность: критический обзор // Светотехника. 2011. № 1. С. 6—11.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал "Автоматизация. Современные технологии"
успешно прошёл аккредитацию в ВАК 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