Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71
7
2017

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

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

УЧРЕДИТЕЛИ:
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

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

ООО «Издательство "Инновационное машиностроение"»

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Филиппенко Н.Г. Методика автоматизации процесса электротермического нагрева полимерных материалов . 291

Потапов В.В. Основные этапы и задачи риск-ориентированного подхода к управлению герметичностью систем безопасности контайнмента реактора 295

Байнева И.И. Энергоэффективные светодиодные технологии в сельском хозяйстве 298

Коноплев В.И., Анцев В.Ю., Башкин С.А. Грузовой вагон с устройством для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов 302

Крюков О.В. Автоматическое управление магистральными потоками газа с помощью электроприводных агрегатов . . . 305

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Толкачёв П.А. Методики увеличения качества спектра выходного сигнала для синтезаторов частот косвенного синтеза с делителем с переменным коэффициентом деления 309

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Чжо Зин Хтут, Селезнёва М.С., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Система контроля прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата 314

Елисеев В.Д., Котельникова А.В., Чемоданов В.Б., Парфёнов Н.М. Формирование директорного управления по сигналам отклонения штурвала и эталонной модели движения объекта 319

Стихановский Б.Н., Чернова Е.С. Применение датчика ударной скорости в машинах ударного действия 327

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тимофеева М.С., Глазунов Д.В., Мизюков Г.С. Современные информационные технологии независимой оценки качества подготовки выпускников 330

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 336

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Filippenko N.G. The automation method of the electrothermal heating process of polymeric materials . . 291

Potapov V.V. The main stages and tasks of the risk-oriented approach to managing the tightness of reactor containment safety systems 295

Bayneva I.I. Energy-efficient LED technology in agriculture. 298

Konoplev V.I., Antsev V.Yu., Bashkin S.A. Freight wagon with a device for unloading bulk agricultural products 302

Kryukov O.V. Automatic control of the main gas flows by means of electric drive units 305

MODERN TECHNOLOGY

Tolkachev P.A. The increasing method of the output signal spectrum quality for frequency synthesizers of indirect synthesis with a variable division coefficient divider 309

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Chzho Zin Khtut, Selezneva M.S., Proletarskiy A.V., Neusypin K.A. Control system of the aircraft sighting navigation system 314

Eliseev V.D., Kotelnikova A.V., Chemodanov V.B., Parfenov N.M. Formation of the directorate control on the signals of the steering wheel deflection and the reference model of the object movement 319

Stikhanovskiy B.N., Chernova E.S. Application of the shock velocity sensor in impact machines 327

EDUCATIONAL TECHNOLOGY

Timofeeva M.S., Glasunov D.V., Mizyukov G.S. Modern information technologies for independent assessment of the graduate training quality 330

SURVEY OF PERIODICALS

On the journal pages 336

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

Сдано в набор 27.04.2017.
Подписано в печать 22.06.2017.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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

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

УДК 539.538, 678-5/-8, 62-503.57

Н.Г. Филиппенко, канд. техн. наук, доц.
(Иркутский государственный университет путей сообщения)
ifpi@mail.ru

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Обработка полимерных материалов требует совершенствования существующих технологий и организации автоматизированного процесса управления. Приведены результаты проведённых исследований и разработанные методы выбора сигналов и параметров процесса управления высокочастотной электротермии, а также организация систем обработки сигналов, ответственных за контроль и управление технологическим процессом производства.

Ключевые слова: полимерные материалы; электротермия; автоматизированное управление.

Processing of polymer materials requires the improvement of existing technologies and the organization of an automated management process. The results of conducted research and developed methods for selecting signals and control parameters of controlling high-frequency electrothermy are presented, as well as the organization of signal processing systems responsible for monitoring and controlling the technological process of production.

Keywords: polymeric materials; electrothermy; automatic control.

Введение. Рациональное использование материальных и энергетических ресурсов в промышленности связано с наличием и особенностью работы АСУТП, для повышения эффективности которой требуется разработка объективных научно обоснованных методов выбора оптимальных параметров управления ТП, особенно при скоростных режимах работы оборудования.

Использование электротермии (прямое преобразование электрической энергии в тепло) в промышленности сдерживается отсутствием стройной теории организации процесса управления [1]. Это обусловлено тем, что технически сложно, а зачастую и невозможно проведение прямых измерений параметров обработки непосредственно в рабочей зоне. В связи с этим процессы одного из наиболее эффективных нагревов (высокочастотного (ВЧ)) контролируются по показателям работы генератора. Сложность управления данным ТП состоит в том, что продолжительность обработки часто не превышает нескольких секунд, а обрабатываемые материалы имеют незначительный интервал температурного перехода из вязкотекучего в деструктивное состояние. Ручное управление операциями становится неэффективным. Анализ современного состояния проблемы [1, 2] показал, что исследованиям по данной тематике уделяется незначительное внимание, а процент брака в технологии ВЧ-обработки достигает 18 % [2, 3].

Поэтому повышение качества термообработки и повторяемость её результатов требуют наличия автоматизированного регулирования параметров процесса ВЧ-обработки, т.е. являются актуальной задачей, которая решаема при наличии научно обоснованных методик выбора наиболее информативных и обработанных сигналов, работы ВЧ-оборудования.

Таким образом, актуально создание систем (устройств) сбора и обработки параметрических данных работы электротермического ВЧ-оборудования для организации процесса его автоматизированного управления.

Описание исследования и полученные результаты. Снижение энергетических затрат и времени ВЧ-обработки достигается режимами работы с максимальной мощностью (напряжением на обкладках рабочего конденсатора).

Для обеспечения высокого термического КПД процесс ВЧ-воздействия необходимо проводить с максимальной интенсивностью при максимально возможной напряжённости поля ($E_р = E_{доп}$) в материале или при $U_р = U_{доп}$.

Максимально возможное при ВЧ-обработке напряжение на рабочем конденсаторе $U_{доп}$ и, соответственно, максимальная напряжённость поля материала $E_{доп}$ ограничены не только пробивной напряжённостью термо-

пласта (которая весьма значительна), но и пробивной напряжённостью в воздушной прослойке между электродами рабочего конденсатора, которая присутствует в реальной технологической оснастке, также в порах, трещинах, расслоениях материала и др. Допустимая напряжённость поля в воздушном зазоре $E_в$ (сухой воздух) на частотах 10...40 МГц не должна превышать 8...10 кВ/см [4, 5]. В работе [4] рекомендуется выбирать рабочую напряжённость поля в термопласте в пределах 1,5...30 кВ/см. Такое изменение рабочей напряжённости поля обусловлено различиями в толщине, качестве, наличии включений и другими особенностями термопластов.

Определение напряжённости электрического поля в материале (в данном случае в полиамиде и в воздушной прослойке) показало, что, несмотря на изменение диэлектрической проницаемости полимера (с ростом температуры растёт напряжённость поля в материале), напряжённость в полиамиде будет оставаться приблизительно постоянной. В то же время с ростом диэлектрической проницаемости воздуха напряжённость поля в воздушной прослойке (включениях и загрязнениях) будет увеличиваться, что приводит к возникновению микропробоев на поверхности материалов так называемых частичных разрядов (ЧР). Определить допустимую рабочую напряжённость поля в материале расчётами не представляется возможным, так как не известна величина напряжённости. Последняя может быть определена экспериментально по динамике возникновения микроразрядов.

Таким образом, в рамках настоящего исследования в качестве показателя наиболее эффективного режима работы электротермического оборудования при организации АСУТП были определены сигналы от ЧР, возникающие в процессе термообработки.

Следующий этап исследования — выбор сигналов, характеризующих процесс диэлектрического нагрева в его динамике. Прямое измерение температуры обрабатываемого изделия не представляется возможным, так как мощное электрическое поле в рабочем конденсаторе оказывает возмущающее воздействие. Диэлектрический разогрев идёт во всём объёме полимера равномерно, но контакт массивных обкладок конденсатора (электродов) с деталью создаёт перепад температур на поверхности и внутри обрабатываемого материала, который сложно поддается расчёту. Идея контроля термического ВЧ-воздействия на полимеры по параметрам работы генератора была заимствована из работ [2, 6], в которых показана возможность расчёта температуры в зоне обработки по напряжению на обкладках рабочего конденсатора и анодному току работы ВЧ-генератора. Недостаток данной методики состоит в том, что она применима только к изделиям, имеющим одинаковые электрофизические, химические и геометрические параметры.

Поэтому была выдвинута гипотеза, что в качестве показателей температурного воздействия можно использовать характерные и показательные изменения электрофизических параметров полимеров при их фазовых и агрегатных превращениях.

Объяснение физических процессов, происходящих в полимерных материалах при изменении их диэлектрических показателей, описано в работе [6], где для определения тангенса угла диэлектрических потерь tgδ полимерного материала через мгновенные электрические параметры режима работы генератора — ток I_{ao} и напряжение $U_р$ на рабочем конденсаторе была получена соответствующая зависимость.

Исследования данной зависимости на установках промышленного типа, работающих в недонапряжённых режимах работы генератора (при постоянных значениях напряжения на рабочем конденсаторе и угловой частоты) подтвердили выдвинутую ранее гипотезу и показали, что состояние в процессе ВЧ-воздействия обрабатываемого полимерного материала определяется его электрофизическим параметром tgδ по анодному току I_{ao}.

Экспериментальные исследования проводили на установке ВЧ-обработки, собранной на базе оборудования электротермического нагрева модели УЗП-2500. Технологическая схема экспериментальной установки ВЧ-обработки полимерных материалов представлена на рис. 1.

В момент появления ЧР в полимерном материале возникает короткий импульсный электромагнитный сигнал, сопровождающийся звуковой волной. Поэтому для регистрации ЧР принято решение применить звуколокационный метод с использованием акустических датчиков. Данная методика позволяет определять местоположение сигнала ЧР по двум датчикам, разнесённым между собой на угол более 30°.

Фонограмма экспериментальных исследований по динамике ЧР на примере полиамида ПА-66 показана на рис. 2.

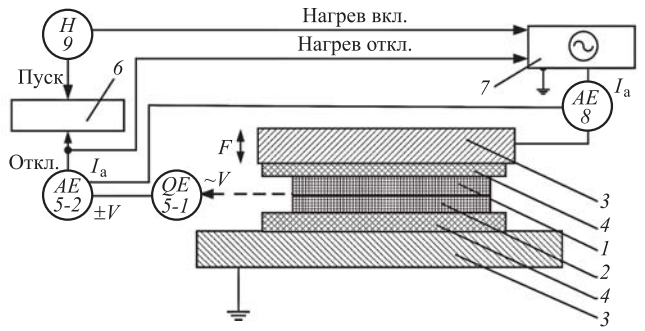


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки ВЧ-обработки полимерных материалов:
1, *2* — изделия; *3* — электроды рабочего конденсатора; *4* — изоляционный вкладыш; *QE5-1* — электромагнитный датчик; *AE 5-2* — аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); *6* — вычислительное устройство; *7* — ВЧ-генератор; *AE 8* — датчик анодного тока; *H9* — кнопка «ПУСК»; $I_а$ — анодный ток генератора; *V* — высокочастотное напряжение; *F* — регулируемое давление электрода

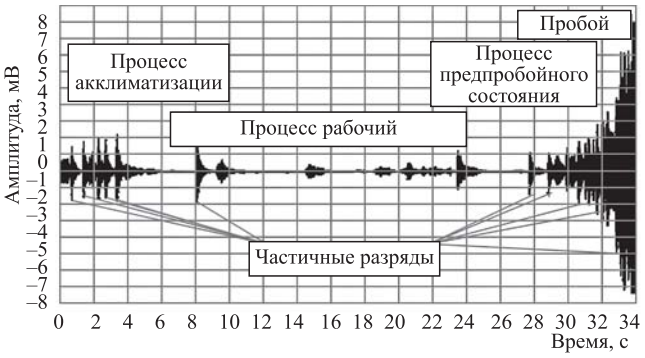


Рис. 2. Фонограмма динамики частичных разрядов

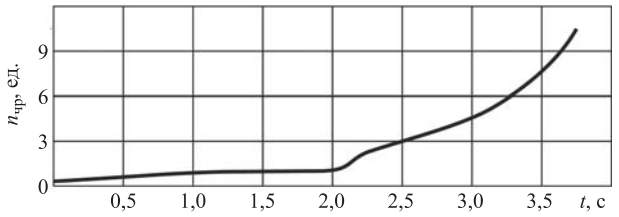


Рис. 3. Динамика частичных разрядов предпробойного состояния

Обработка результатов измерений выполнялась по алгоритму, приведённому ниже.

Определение соответствующих средних значений времени $\tau_{чр\,к}$ ЧР:

$$\tau_{чр\,к} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\tau_{чр\,i}, \qquad (1)$$

где $к$ — номер образца обработки; $к = 1, 2,...$; $\tau_{чр}$ — время возникновения ЧР; N — количество использованных образцов.

Значение N устанавливается с учётом того, что $\delta\tau_{чр\,ij} < 10$ %, где $\delta\tau_{ij}$ — разница между временем возникновения ЧР в образцах, обработанных на одном режиме; $i, j = 1, 2, 3$ — номера образцов.

Разница между временем возникновения ЧР в образцах определяется по формуле

$$\delta\tau_{чр\,ij} = \frac{\tau_i^{б} - \tau_j^{м}}{\tau_j^{м}} 100\ \%, \qquad (2)$$

где $\tau^{б}$, $\tau^{м}$ — большее и меньшее из сравниваемых значений времени возникновения ЧР.

Так, например, при выполнении условий (2) для всех сочетаний $\delta\tau_{чр12}$; $\delta\tau_{чр23}$; $\delta t_{чр13}$ принимаем $N_{обр} = 3$.

Если время возникновения ЧР одного из образцов отличается от остальных двух более чем на 10 %, то среднее значение определяется по двум оставшимся, т.е. $N_{обр} = 2$.

После получения данных возникновения ЧР, характеризующих динамику процесса предпробойного состояния, была получена характерная кривая, представленная на рис. 3.

В ходе экспериментальных исследований впервые было отмечено снижение начальной активности ЧР при повторном помещении изделия в ВЧ-поле. Объясняется это следующим: изменения, вызванные ВЧ-воздействием, меняют поверхностную структуру полимеров, происходит оплавление воздушных раковин, пор, выгорание посторонних включений и т.д., на начальном этапе обработки происходит «акклиматизация» полимерного материала к ВЧ-воздействию. Поэтому ЧР на этом этапе обработки (несмотря на некоторое негативное влияние) улучшают качество поверхности обрабатываемого полимера. Этот факт был взят за основу при организации управления процессом электротермии полимерных материалов на первом этапе обработки. Экспериментальные исследования показывают, что время активного проявления начальных ЧР зависит от множества сложно контролируемых показателей обрабатываемого материала. В отдельных случаях на начальном этапе обработки развитие ЧР зависит от мощности электромагнитного воздействия, что может привести к шунтирующим пробоям.

Также экспериментальным исследованиям показателей анодного тока работы ВЧ-генератора предшествовала подготовительная работа по выбору методов фильтрации сигнала. Был рассчитан и реализован аналоговый

фильтр. Однако выявленные недостатки работы аналогового фильтра обосновали необходимость создания цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [7, 8].

Реализация разработанного фильтра проводилась на языке C++ для программ микроконтроллеров семейства Arduino. На данный программный продукт фильтрации значений сигналов анодного тока высокочастотного генератора электротермической установки методом скользящей средней было получено свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа успешно реализует алгоритм решения методом скользящей средней с нормированием весовых коэффициентов. Отфильтрованные воздействием ВЧ-излучения и других помех, сигналы анодного тока в дальнейшем направляются в АЦП автоматизированной системы контроля и управления электротермическим оборудованием.

Особенность разработанного фильтра — использование достаточно низкой частоты среза, позволяющей добиться требуемого качества сигналов с незначительным математическим их искажением (рис. 4, *в*).

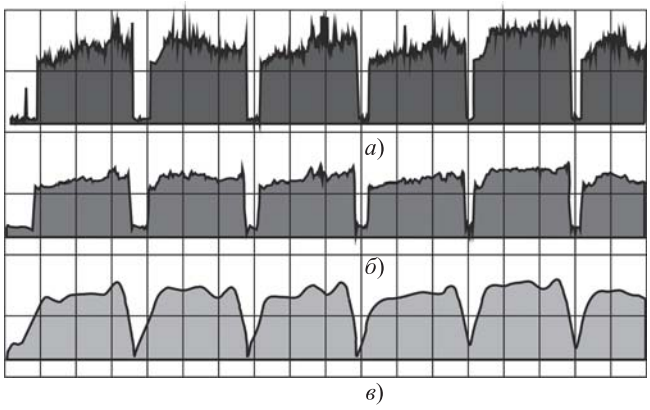


Рис. 4. Комплексный график полученных значений анодного тока работы ВЧ-генератора электротермического оборудования модели УЗП-2500:

а, *б*, *в* — сигналы реального значения анодного тока, анодного тока после аналоговой фильтрации и анодного тока после цифровой фильтрации

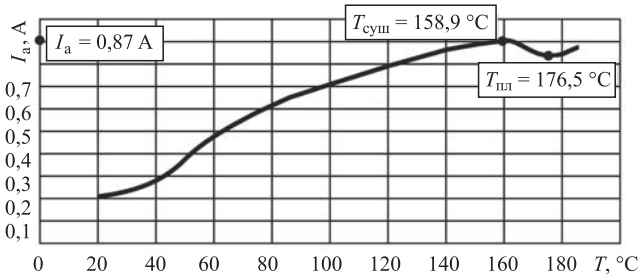


Рис. 5. Амперометрическая зависимость фазового превращения ПВХ

Полученные с помощью описанной методики амперометрические зависимости фазовых превращений $I_а$ (T) приведены на рис. 5.

Анализ данных показывает, что изменение фазового состояния образцов (начало плавления) соответствует первому минимуму значений анодного тока, а максимальному — температура полимера, составляющая примерно 85...91 % от температуры плавления ($T_{пл}$). Максимум дипольных потерь связан с подвижностью полярных групп (фазовое состояние) и приблизительно согласуется с результатами, приведёнными в работах [9, 10].

Таким образом, в рамках исследования теоретически были обоснованы и экспериментально подтверждены выбранные контролируемые параметры работы электротермического оборудования. Доказана возможность контроля фазовых и агрегатных превращений в полимерных материалах в процессе их электротермической обработки по динамике анодного тока ВЧ-генератора. Впервые для электротермии доказана возможность использования ЧР и их динамики для контроля этапов (процессов) обработки.

Апробация разработанных методик использования данных о ЧР и экстремумов анодного тока проводилась на предприятии полиграфической отрасли при организации АСУ ТП электротермического оборудования модели УЗП-2500 при сваривании изделий из пленки ПВХ. Результатом стало снижение более чем на 8 % брака при производстве изделий по причине прогара свариваемого материала и электродов.

Таким образом, преимуществом разработанной методики выбора и обработки сигналов работы электротермического оборудования является простота её интеграции в существующие системы контроля и управления ТП (без изменения её электрических, кинематических и других цепей управления).

Использование АСУ позволило усовершенствовать существующие технологические процессы и внедрить с использованием сложных электродов новые: сварка ПВХ, бумвинила, коленкора, тиснение высокотемпературной полиграфической фольгой и конгревное тиснение.

Годовой экономический эффект от внедрения АСУТП высокочастотной обработки полимерных материалов только на Иркутском

полиграфическом предприятии составил более 800 тыс. руб.

Библиографические ссылки

1. **Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Машович А.Я.** Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск. 2011. Вып. 2 (30). С. 193—198.

2. **Донской А.В., Рамм Г.С., Вигдорович Ю.Б.** Электротермические установки с ламповыми генераторами Л.: Энергия, 1974. 208 с.

3. **Калганова С.Г.** Измерения в СВЧ электротехнологии. Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2004: тр. VII Междунар. научн.-техн. конф. Новосибирск, 2004. С. 58—60.

4. **Калганова С.Г.** Модификация свойств полимеров при нетепловом воздействии СВЧ электромагнитных колебаний. Композит 2004. Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология; докл. междунар. конф. Саратов, 2004. С. 309—312.

5. **Фейнман Р.** Энергия поля и его импульс. Плотность энергии и поток энергии в электромагнитном поле. Лекции по физике. Вып. 4. М.: Мир, 1965. 286 с.

6. **Марков А.В.** Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева // Электротехника. 2007. № 7. С. 60—64.

7. **Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов / пер. с англ.; под ред. С.Я. Шаца. М.: Связь, 1979.

8. **Haykin S.** Adaptive Filter Theory Prentice-Hall. Englewood Cliffs // Computer. 1991. Vol. 21. P. 105—117.

9. **Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С. и др.** Электрические свойства полимеров. Л.: Химия, 1986. 224 с.

10. **Макаров В.Г.** Промышленные термопласты: справочник. М.: Химия, 2003. 204 с.

УДК 621.039.538

В.В. Потапов, канд. техн. наук
(Всероссийский научно-исследовательский институт
по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС), г. Москва)

pv106@yandex.ru

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ЗАДАЧИ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ГЕРМЕТИЧНОСТЬЮ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ КОНТАЙНМЕНТА РЕАКТОРА

В обеспечении безопасности реакторов современных АЭС важную роль играет специальное сооружение — контайнмент. Его системы безопасности представляют собой совокупность тепломеханического оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры, разъёмные герметизирующие соединения которых во многом определяют надёжность этих систем. Предложена концепция управления герметичностью разъёмных соединений на основе риск-ориентированного подхода и описаны этапные задачи по его реализации применительно к системам безопасности контайнмента реактора.

Ключевые слова: атомная электростанция (АЭС); оборудование; сооружения; аварии; контайнмент; системы безопасности; разъёмные герметизирующие соединения; риск-ориентированный подход; концепция; этапные задачи.

To ensure the safety of reactors of modern nuclear power plants (NPP); a special structure — containment plays an important role. Its security systems are a set of thermal mechanical equipment, pipelines and pipeline fittings, whose detachable sealing connections in many respects determine the reliability of these systems. The tightness control conception of detachable joints based on the risk-oriented approach is proposed and step-by-step tasks for its implementation with respect to reactor containment safety systems are described.

Keywords: nuclear power plant (NPP); equipment; constructions; accident; containment; security systems; detachable sealing connections; risk-oriented approach; conception; stage tasks.

Наиболее сложным элементом атомных электростанций (АЭС) является реакторное отделение с его специальным оборудованием и сооружениями. Обеспечение безопасной эксплуатации оборудования и систем с технической точки зрения заключается в том, что

на пути распространения радиации во внешнюю среду организуется ряд преград и систем безопасности [1].

Продукты деления удерживаются первым барьером — самой таблеткой ядерного топлива; вторым барьером — циркониевой оболочкой тепловыделяющего элемента (твела); третьим барьером — корпусом реактора, оборудованием и трубопроводами первого контура и четвёртым барьером — сооружением в виде защитной оболочки.

Системы безопасности предназначены для выполнения следующих функций: защитных, обеспечивающих надёжный аварийный останов реактора и поддержание его в подкритическом состоянии в любых режимах нормальной эксплуатации и её нарушений, включая проектные аварии; локализующих — для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в предусмотренных проектом границах; обеспечивающих — для снабжения систем безопасности рабочей средой, энергией и создания требуемых условий их функционирования, включая передачу тепла к конечному поглотителю; управляющих, предусматривающих наличие блочного пульта управления, оперативный персонал которого осуществляет управление технологическим оборудованием систем безопасности при нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии.

В современных конструкциях реакторов для локализации возможных тяжёлых аварий используется такое сооружение, как *контайнмент* с его оболочками и системами безопасности. Главной функцией контайнмента как пассивной системы безопасности реактора является предотвращение выхода радиоактивных веществ в окружающую среду при авариях. Контайнмент является важнейшим сооружением АЭС. Его внутренняя гермооболочка из предварительно напряжённого бетона с металлической герметизирующей облицовкой представляет собой последний физический барьер на пути распространения радиоактивных материалов и ионизирующих излучений, а наружная оболочка из железобетона защищает реакторную установку от внешних физических воздействий, землетрясений, тайфунов.

Оболочки контайнмента имеют защитные и локализующие системы безопасности: пассивные для конденсации пара и снижения таким образом давления и активные специальные системы. К пассивным системам безопасности контайнмента относят систему пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ ЗО), систему поддержания разрежения и очистки среды в межоболочечном пространстве (СПРОС МП) и систему пассивного отвода тепла в атмосферный воздух (СПОТ АВ). К активным системам безопасности контайнмента относятся спринклерная система и система вентиляции межоболочечного пространства (СВ МП).

Системы безопасности контайнмента представляют собой упорядоченные по функциональному назначению совокупности тепломеханического оборудования, трубопроводов и трубопроводной арматуры, работающих под давлением. При этом оборудование, например роторного типа, компримирует и подаёт рабочую среду, трубопроводы организуют её поток, а через арматуру осуществляется управление её потоком.

Надёжность каждой из систем безопасности контайнмента реактора как системы, находящейся под давлением среды, во многом определяется *герметичностью разъёмных соединений* её элементов (оборудования, трубопроводов и арматуры), точностью функциональных параметров уплотнений и прочностью деталей, составляющих разъёмные герметичные соединения (РГС) этих элементов. И хотя удельный вес РГС в конструкциях элементов системы безопасности различен: минимальный для оборудования, значительный для трубопроводов и наибольший для арматуры, от них зависит стабильность давления в режиме ожидания и при аварийном режиме как в каждом из элементов, так и в конкретной системе безопасности. Нарушение герметичности приводит к сверхнормативным утечкам радиоактивных, агрессивных, взрыво- и пожароопасных сред, а в сочетании с нарушением прочности деталей РГС — к отказам элементов по уплотнениям и деталям, что снижает характеристики безотказности системы безопасности [2].

В качестве руководящего принципа в концепции государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности с учётом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020 г. указан *риск-ориентированный подход* к обеспечению безопасной эксплуатации опасных производственных объектов [3, 4].

Ниже рассмотрены компоненты методологии риск-ориентированного подхода и впервые предложена концепция управления герметичностью разъёмных соединений систем безопасности АЭС на примере контайнмента реактора с учётом параметрических отказов их уплотнений и характерного силового взаимодействия их деталей.

Реализация концепции связана с реализацией задач в рамках трёх основных этапов.

Первый этап связан с разработкой карты потенциальных отказов систем безопасности контайнмента реактора из-за негерметичности разъёмных соединений их элементов. На этом этапе даются характеристика поля потенциальных отказов, описание структуры пассивных и активных частей систем безопасности. Разрабатываются модели функционирования систем и их элементов с использованием классификаций подвижных и неподвижных РГС элементов — объектов управления отказами. Проводится анализ концепций и современных моделей оценки герметичности разъёмных соединений (РС) тепломеханического оборудования, трубопроводов и арматуры. Определяются функциональные геометрические параметры и параметры материала уплотнений, влияющие на герметичность РГС. Формализуются основные расчёты по оценке утечек РС во взаимосвязи с функциональными параметрами уплотнений для оборудования, трубопроводов и арматуры систем безопасности.

Второй этап связан с процедурами мониторинга технического состояния и оценкой результатов исследований взаимосвязей герметичности и функциональных параметров в рамках карты потенциальных отказов РС тепломеханического оборудования, трубопроводов и арматуры систем безопасности. Даются описание методов и средств мониторинга эксплуатационной герметичности и функциональных параметров РС, оценка отказов и повреждений, результатов экспериментальных исследований торцевых, манжетных и других уплотнений для валов насосов, вентиляторов и компрессоров; РС деталей затворов клапанной, клиновой и другой специальной арматуры; фланцевых и бугельных соединений паро- и водопроводов, воздуховодов систем безопасности.

Третий, заключительный, этап предусматривает разработку основ нормативного управления герметичностью РС в рамках карты потенциальных отказов систем безопасности. На данном этапе определяются основные направления управления герметичностью и функциональными параметрами РС. Формируются системы их нормирования применительно к торцевым, сальниковым и другим уплотнениям роторного оборудования; фланцевым и бугельным уплотнениям трубопроводов; клапанным, клиновым затворам арматуры систем безопасности.

Библиографические ссылки

1. **Арматура** систем АЭС. Требования. Исполнения. Опыт производства / В.И. Аксёнов, А.П. Андреев, А.И. Гошко и др. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 468 с.

2. **Управление** ресурсными характеристиками элементов АЭС / В.В. Потапов, В.А. Ильин, А.М. Логинов и др.; под общ. ред. В.В. Потапова. М.: Инновационное машиностроение, 2015. 400 с.

3. **Гражданкин А.И.** О риск-ориентированном подходе в обеспечении промышленной безопасности // Промислова безпека. 2012. № 5.

4. **Потапов В.В.** Концептуальные положения и задачи риск-ориентированного подхода к безопасной эксплуатации атомных станций // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 1.

Уважаемые читатели!

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

Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 628.9

И.И. Байнева, канд. техн. наук, доц.
(Институт электроники и светотехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)

baynevaii@rambler.ru

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Рассмотрены вопросы внедрения светодиодных осветительных систем для организации освещения в птицеводстве. Такие энергоэффективные осветительные установки должны обеспечивать равномерную освещённость и возможность её изменения в широком диапазоне. Показано, что выбор ламп и вариантов освещения определяется физиологическими особенностями птицы и оптимальным соотношением между затратами на электроэнергию и производительностью. Проанализированы особенности использования светодиодного освещения, которое открывает дополнительные возможности в ценовой политике предприятия, увеличивая его рентабельность. Исследованы светотехнические характеристики и тепловой режим разработанного светодиодного светильника для клеточного содержания птицы.

Ключевые слова: энергосбережение; энергоэффективность; освещение; режим; источник света; светодиод; светодиодный светильник; птицеводство.

The issues of LED lighting systems introduction for the organization of lighting in poultry farming are considered. Such energy-efficient lighting installations should provide uniform illumination and the possibility of changing it over a wide range. It is shown that the choice of lamps and lighting options is determined by the poultry physiological features and the optimal relationship between energy costs and productivity. The features of using LED lighting, which opens additional opportunities in the pricing policy of the enterprise, increasing its profitability are analyzed. The lighting engineering characteristics and thermal conditions of the developed LED light for the cellular keeping of poultry were studied.

Keywords: energy saving; energy efficiency; lighting; mode; light source; light-emitting diode; LED lamp; poultry farming.

Введение. Свет — важнейший фактор, воздействующий на любой живой организм, в том числе и на птиц. В промышленных условиях птица обычно содержится при искусственном освещении и очень восприимчива к его изменениям. Освещение в птичнике позволяет управлять процессами физиологического развития птицы, обеспечивать более комфортные условия её содержания и добиваться существенного роста практически всех показателей продуктивности стаи [1].

В настоящее время светодиодное освещение активно применяется в сельском хозяйстве России. Оно позволяет эффективно снижать затраты на электроэнергию, более эффективно использовать энергетический ресурс предприятий и повышать за счёт этого рентабельность производства, в том числе и за счёт увеличенного срока службы осветительного оборудования [2].

Особенности и эффективность светодиодного освещения. Особенностям освещения с сельском хозяйстве посвящено много работ. Современная система освещения птичника должна соответствовать требованиям к энергосбережению, а также технологическим требованиям [3, 4].

Известно, что экономическая привлекательность любого оборудования определяется в первую очередь его надёжностью и продолжительностью работы [5]. Искусственное освещение в помещениях для содержания кур существенно влияет на технико-экономические показатели производства. Сократить затраты можно благодаря применению таких энергоэффективных источников света, как светодиоды. В настоящее время интерес к светодиодному освещению как наиболее надёжному, безопасному и экономически выгодному стремительно растёт [6—10]. Использование пониженного напряжения в цепях питания светодиодных светильников позволяет повысить электро- и пожаробезопасность помещений, что актуально при специфических условиях сельского хозяйства. Особенности светодиодных светильников и систем освещения на их основе позволяют применять технологии выращивания и содержания птицы и животных,

обеспечивающие существенное повышение производственных показателей. В настоящее время практически все крупные птицеводческие компании используют преимущества прерывистых режимов освещения. Существует большое число программ освещения, позволяющих значительно повысить эффективность выращивания птицы. Однако в каждом конкретном случае такая программа должна составляться исходя из текущих условий кормления, содержания птицы и экономических требований к процессу её выращивания. Осветительные установки должны обеспечивать равномерную освещённость и возможность её изменения в широком диапазоне.

Требования к освещению при содержании птицы. При выращивании и содержании кур немаловажное значение имеет интенсивность освещения [11]. При содержании взрослых кур-несушек рациональной является освещённость 10 лк, а родительского стада — 15 лк. В настоящее время многие зарубежные фирмы рекомендуют освещённость 20...25 лк. При этом система освещения должна быть спроектирована с некоторым запасом, так как со временем яркость ламп снижается, а также они запыляются и засоряются.

Исследования показали, что цвет освещения также оказывает влияние на поведение, рост и воспроизводство птицы. Птица воспринимает свет иначе, чем люди. Например, её чувствительность к различным длинам волн светового спектра отличается от чувствительности человека. Птица становится намного спокойнее, когда в птичниках используются монохромные светильники, которые не только излучают свет нужного цвета, но и подавляют нежелательные цвета. Сегодня считается, что наилучший спектр освещения — тёплый белый с цветовой температурой 2800...3200 К. Этот цвет наиболее близок к солнечному, а для его получения можно использовать светодиодные или люминесцентные лампы.

В последние годы интенсификация промышленного производства мяса птицы и яиц обусловила его высокую энергоёмкость. На освещение расходуется до 50 % потребляемой электроэнергии. Например, при использовании ламп накаливания на освещение приходится 45...48 % от всех затрат электроэнергии, что в промышленных условиях содержания кур-несушек составляет 70...100 тыс. кВт·ч в год [12].

Актуальность светодиодного освещения в промышленном птицеводстве. Проблема энерго- и ресурсосбережения в промышленном птицеводстве сегодня крайне обострилась. В условиях жёсткой конкуренции владельцы сельскохозяйственных предприятий должны серьёзно подходить к выбору систем освещения. Лампы и варианты освещения выбирают в соответствии с физиологическими особенностями птицы и оптимальным соотношением между затратами на электроэнергию и производительностью.

До недавнего времени в птицеводстве наиболее распространёнными источниками света были лампы накаливания (ЛН), излучение которых на 10...40 % состоит из видимого света, и люминесцентные лампы (ЛЛ). Оба вида ламп имеют свои преимущества и недостатки.

Преимуществами ЛН являются небольшие размеры, простота устройства, невысокая стоимость. Их очевидные недостатки — сравнительно небольшая световая отдача, большая яркость раскалённых нитей, которая отрицательно воздействует на зрение, сравнительно короткий срок службы (800...1000 ч), значительная энергоёмкость. К этому следует добавить, что во многих странах запрещено применение ЛН в качестве источников света [7, 8].

ЛЛ в связи с более длительным сроком их эксплуатации и большей светоотдачей в сравнении с ЛН привлекают все большее внимание птицеводов. По некоторым данным, в мире ЛЛ составляют около 70 % всех источников искусственного света. Они дают возможность уменьшить расходы электроэнергии в 3...5 раз по сравнению с ЛН.

При изучении влияния ЛН, натриевых ламп высокого давления и ЛЛ белого света на рост и развитие индюшат и бройлеров существенных преимуществ тех или других источников света установлено не было, однако при применении последних двух типов ламп достигалась значительная экономия электроэнергии.

Применение ЛЛ сначала диктовалось соображениями энергосбережения, но при использовании они показали более высокую эффективность в формировании продуктивных показателей птицы.

В настоящее время энергосберегающее освещение для птицефабрик развивается по трём направлениям: применение компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), линейных ЛЛ и светильников на основе светодиодов. Каждое из направлений имеет определённые преимущества и недостатки, а также ближнесрочные перспективы [9].

Применение в системах освещения птичников для содержания кур-несушек ЛЛ мощ-

ностью 16 Вт с цветовой температурой 2700 К позволяет снизить затраты электроэнергии на освещение, приходящиеся на единицу продукции, в 3,1 раза (при расстоянии между лампами 3 м) и 6,2 раза (при расстоянии между лампами 6 м). Помимо экономии электроэнергии это позволяет повысить яйценоскость, массу яиц и сохранность птицы. Кроме того, по своему спектральному составу люминесцентный свет ближе к естественному (дневному). Причём светоотдача ЛЛ в 3...10 раз выше, чем ЛН.

Однако люминесцентным лампам присущ ряд существенных недостатков:

при использовании ЛЛ трудно регулировать уровень освещённости в помещениях, предлагаемые методы приводят к уменьшению срока службы ламп;

ЛЛ присуще мерцание (до 100 раз в секунду), что может вызвать у животных так называемый стробоскопический эффект, который негативно влияет на их физиологическое состояние;

ЛЛ содержат некоторое количество такого опасного вещества, как ртуть. Порядок утилизации перегоревших ламп строго регламентируется действующим законодательством. За несоблюдение норм законодательства предприятия подвергаются штрафным санкциям, величина штрафов может превышать стоимость сэкономленной электроэнергии.

Спрос на энергосберегающее освещение для птичников вырос за последние годы в несколько раз. Это связано с несколькими причинами:

постоянным ростом цен на электроэнергию;

коротким сроком службы ЛН;

улучшением характеристик светодиодных светильников;

повышением требований по экологической безопасности.

В совокупности эти факторы привели к массовому отказу птицеводческих предприятий от приобретения систем накального освещения и поиску более экономичных решений, в частности связанных с использованием светодиодных осветительных систем.

Светодиоды имеют больший срок службы — более 50 000 ч, т.е. почти в 50 и 5 раз больше, чем у ЛН и ЛЛ соответственно. Они устойчивы к многократным включениям и выключениям, обеспечивают противопожарную и электрическую безопасность (имеют низкое напряжение — обычно 12...36 В). По сравнению с ЛН и ЛЛ, которые имеют направленность светового потока 360°, светодиоды с углом половинной яркости 120...140° позволяют более эффективно использовать интенсивность источника света. В сельском хозяйстве как одной из наиболее энергоёмких отраслей применение светодиодных систем очень актуально [9]. Современные полупроводниковые источники света в ряде случаев могут служить без замены в течение всего срока эксплуатации осветительного оборудования птичника. Благодаря безопасному напряжению питания и долговечности такие светильники оказываются вне конкуренции при размещении внутри клеточной батареи. При этом по показателю светоотдачи (лм/Вт) светодиодные системы обогнали ЛЛ, а по цене уже сопоставимы с ними.

Светодиоды дают возможность уменьшить расходы электроэнергии на 85 % по сравнению с ЛН и до 50 % по сравнению с ЛЛ [4]. Исследования показывают, что светодиодные системы сокращают потребление электроэнергии на освещение корпусов для птицы и животных в 8...10 раз по сравнению с ЛН и в 1,8...2,2 раза по сравнению с ЛЛ.

Конструкция и характеристики светодиодных светильников для птицеводческих ферм. Преимуществом светодиодных светильников в условиях птичника является их миниатюрность, которая позволяет создавать равномерную освещённость в клетках, расположенных на разных ярусах батареи. В помещениях для содержания птицы и животных светильники можно размещать на относительно небольшой высоте: от 0,4 м (при клеточном содержании) до 2,5...4 м (при напольном содержании), что позволяет эффективно использовать в светильниках маломощные сверхъяркие светодиоды. Их массовое производство в настоящее время обусловливает достаточно низкую по сравнению с ЛН или ЛЛ стоимость системы светодиодного освещения, которая окупается в течение от одного до трёх лет.

Наиболее распространённое исполнение светодиодных светильников для освещения клеток представлено на рис. 1. В качестве

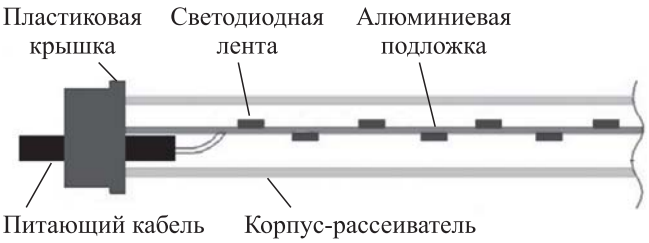
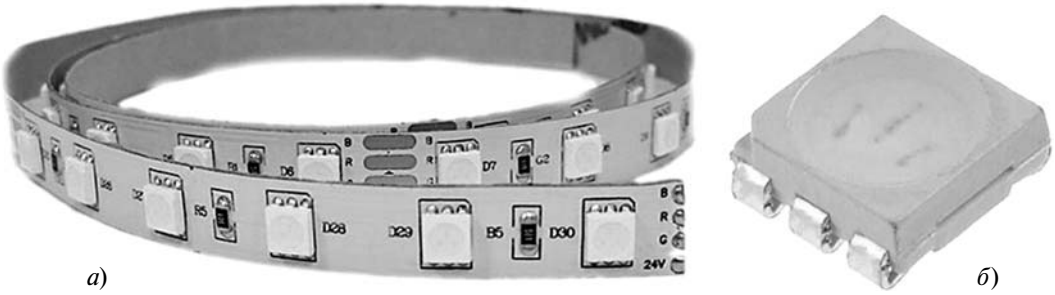


Рис. 1. Типичная конструктивная схема светодиодного светильника



а) *б*)

Рис. 2. Светодиодная лента (*а*) со светодиодами SMD 5050 (*б*)

источника света используется светодиодная лента типа SMD на основе светодиодов 5050 (рис. 2), которая обладает следующими преимуществами:

лёгкой системой креплений;

низким тепловыделением;

малыми размерами;

стабильной яркостью во всем температурном диапазоне;

продолжительным ресурсом работы.

Некоторые параметры светодиодов, такие как цветовая температура, могут влиять на производимую продукцию (количество/размер). Подобрав подходящие параметры освещения, можно увеличить усвояемость корма птицами бройлерных пород или повысить яйценоскость несушек.

Степень защиты светильников для птичников должна быть не ниже IP65 (полная защита от проникновения пыли и попадания струй воды, падающих на светильник под любым углом), так как им приходится работать в достаточно жёстких условиях: при высокой концентрации пуха, пыли; в условиях газации; во время санитарной обработки птичника светильники подвергаются мойке под сильными струями воды.

Применение светильников, в цепи питания которых используется напряжение промышленной сети 220 В (ЛН или ЛЛ), влечет за собой опасность возникновения ситуаций, когда из-за потери герметичности корпуса светильника или повреждения кабелей питания возможно поражение электрическим током обслуживающего персонала или возникновение пожара. В светодиодных светильниках может использоваться низкое напряжение питания, что обеспечивает электро- и пожаробезопасность при обслуживании и эксплуатации системы освещения.

Разработка светодиодного светильника. Для организации энергоэкономичного освещения в птицеводстве был разработан светодиодный светильник, для которого было выполнено исследование светораспределения (получены кривые силы света и фотометрическое тело (рис. 3, см. обложку)), светового потока и температурного режима (рис. 4, см. обложку). Экспериментальные исследования проводили на гониофотометре GO-2000A. Электрические и световые характеристики светильника: световой поток 1557 лм; световая отдача 49 лм/Вт; мощность 32 Вт; максимальная сила света 270 кд.

На основе экваториальной кривой силы света светильника (см. рис. 3, *а*) был определён такой угол его поворота вокруг вертикальной оси *OZ*, чтобы он обеспечивал наиболее равномерную освещённость всех близлежащих кормушек. Для определения высоты подвеса светильника относительно освещаемых объектов (клеток и кормушек) провели измерения освещённости на разных высотах по отношению к светильнику под углами 90 и 45° к клеткам. При высоте расположения кормушек нижнего яруса 0,5 м, среднего — 1,0 м и верхнего — 1,5 м для обеспечения приблизительного равенства освещённости на кормушках всех ярусов высота подвеса светильника должна составлять 2 м.

Выводы. Рассмотрены вопросы энергосбережения и особенности применения светодиодных осветительных систем для организации освещения в птицеводстве, которые призваны обеспечивать равномерную освещённость и возможность её изменения в широком диапазоне. Проанализированы особенности и роль освещения в процессе выращивания птицы. Выполнен сравнительный анализ таких традиционных в птицеводстве осветительных систем, как приборы с лампами накаливания и люминесцентными источниками света, а также перспективных энергоэффективных систем светодиодного освещения, их достоинств, недостатков и особенностей применения. Показано, что при выборе системы освещения и её

характеристик для птицеводческого предприятия необходимо учитывать физиологические особенности птицы и выбранная система должна обеспечивать минимальные затраты на электроэнергию и обслуживание систем освещения. Исследованы светотехнические характеристики и тепловой режим разработанного светодиодного светильника для выращивания кур. Определено его оптимальное расположение по отношению к кормушкам.

Библиографические ссылки

1. **Лямцов А.К., Гришин К.М., Малышев В.В.** Компактные люминесцентные и светодиодные лампы для птичников // Сельский механизатор. 2012. № 5. С. 28—29.

2. **Байнева И.И.** Энергоэффективные светодиодные технологии в птицеводстве: сб. науч. тр. SWorld. Вып. 3 (40). Т. 3. Иваново: Научный мир, 2015. С. 38—43.

3. **Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А.** Оценка эффективности источников излучения для птицеводства // Мир науки и инноваций. 2015. Т. 3. С. 54—57.

4. **Гладин Д.** Светодиодное освещение: только преимущества // Животноводство России. 2012. № 9. С. 62—64.

5. **Айзенберг Ю.Б.** Задача стимулирования производства и применения энергоэффективных светотехнических изделий // Светотехника. 2009. № 2. С. 23—25.

6. **Bayneva I.I.** Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures // International Journal of Applied Engineering Research. Vol.10. № 3 (2015). P. 6479—6487.

7. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Продукция светотехнической промышленности России: проблемы энергосбережения и энергоэффективности // Экономика фирмы. 2014. № 2 (7). С.4—7.

8. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Аспекты разработки энергоэффективных светотехнических изделий для решения задач повышения энергосбережения // Вестник Мордовского университета. 2014. № 1—2. С. 76—80.

9. **Байнева И.И.** Задачи и проблемы повышения энергоэффективности и энергосбережения в России: сб. научн. тр. Sworld. Одесса: КУПРИЕНКО. 2013. Т. 7. № 2. С. 52—55.

10. **Байнева И.И.** Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. SWorld. Вып. 3 (40). Т. 3. Иваново: Научный мир, 2015. С. 34—38.

11. **Казаков А., Седов И.** Световой период при выращивании кур-несушек // Птицеводство. 2008. № 9. С. 41.

12. **Буяров В.С., Салеева И.П., Буярова Б.А.** Ресурсосберегающие методы и приемы повышения эффективности производства мяса бройлеров // Вестник ОрелГАУ. 2009. № 2 (17). С. 54—60.

УДК 629.463.24: 621.86.068

В.И. Коноплев, канд. техн. наук, доц., **В.Ю. Анцев,** д-р техн. наук, проф., **С.А. Башкин**
(Тульский государственный университет)
konoplev@tsu.tula.ru

ГРУЗОВОЙ ВАГОН С УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ВЫГРУЗКИ СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

Предложен грузовой вагон с устройством для выгрузки сыпучих легкоповреждаемых сельскохозяйственных продуктов. Груз перекатывается к проёму вагона по диафрагме, выполненной в виде П-образных трапециевидных в сечении складчатых оболочек, наполненных сжатым воздухом. Грузовой вагон с устройством позволяет проводить выгрузку продуктов через любую дверь вагона.

Ключевые слова: вагон; диафрагма; оболочка; сжатый воздух; пневматическое оборудование; гравитация.

A freight wagon with a device for unloading bulk, easily damaging agricultural products is proposed. The cargo rolls to the wagon aperture through the diaphragm, made in the form of U-shaped trapezoidal cross-section folded shells filled with compressed air. Freight wagon with the device allows you to carry out the products unloading through any door of the wagon.

Keywords: wagon; diaphragm; shell; compressed air; pneumatic equipment; gravity.

Выгрузка сыпучих легкоповреждаемых сельскохозяйственных продуктов из грузовых вагонов отличается высокой трудоёмкостью. Выгрузке продуктов из грузового вагона только через одну из его дверей посвящены работы [1, 2]. Предлагаемый вагон

с разгрузочным устройством [3] позволяет решить проблему выгрузки продуктов через любую из его дверей.

Грузовой вагон с устройством для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов (рис. 1) содержит раму *1*, на которой смонтирован кузов *2*, имеющий в средней части переднюю *3* и заднюю *4* двери, боковые *5* и торцевые *6* стенки и пол *7*, на котором расположены нижняя *8* и верхняя *9* гибкие диафрагмы.

Гибкие диафрагмы расположены симметрично относительно поперечной оси вагона и повернуты на 180° одна относительно другой. Они выполнены в виде П-образных трапециевидных складчатых оболочек *10...17*, могут перемещаться в вертикальном направлении и по периметру вагона соединены ползунами *18* с направляющими *19*, например двутаврами, которые жёстко закреплены на боковых и торцевых стенках вагона.

Нижняя диафрагма состоит из четырёх складчатых оболочек *10...13* и используется при разгрузке вагона через заднюю дверь, а верхняя диафрагма — из четырёх складчатых оболочек *14...17* и используется при разгрузке вагона через переднюю дверь. Каждая складчатая оболочка имеет подвод для сжатого воздуха.

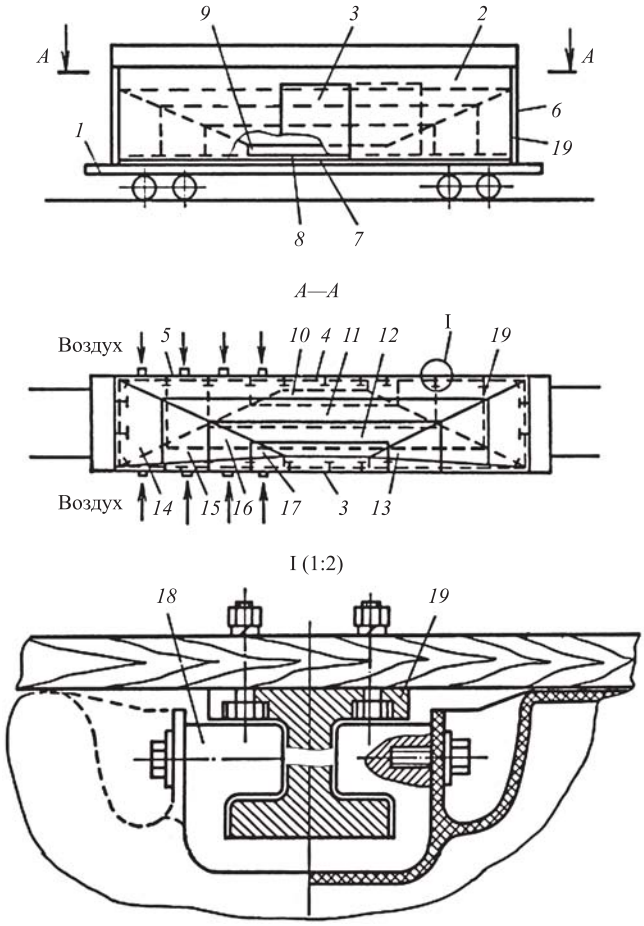


Рис. 1. Схема грузового вагона с устройством для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов

При выгрузке сыпучих материалов сжатый воздух подаётся к оболочкам диафрагмы таким образом, чтобы диафрагма наклонилась относительно горизонтальной поверхности и разгружаемый сыпучий материал начал перемещаться к одной из дверей. Наклон диафрагмы должен быть больше угла естественного откоса насыпного груза, т.е. угла между образующей конуса из свободного насыпного груза и горизонтальной плоскостью [4]. В этом случае обеспечивается условие гравитационного истечения материала под действием силы тяжести. При разгрузке вагона через переднюю дверь сжатый воздух подводится к складчатым оболочкам верхней диафрагмы. Наполняясь, они начинают перемещаться вверх вместе с насыпным грузом. Ползуны верхней диафрагмы скользят вдоль направляющих и предотвращают увеличение зазора между диафрагмой и боковой и торцевой стенками по периметру вагона. Груз перекатывается к проёму передней двери и высыпается из вагона. После завершения разгрузки компрессор отключается, воздух из складчатых оболочек верхней диафрагмы спускают и она ложится на нижнюю диафрагму.

При разгрузке вагона через заднюю дверь сжатый воздух подводится к складчатым оболочкам нижней диафрагмы. Наполняясь, они начинают перемещаться вверх вместе с верхней диафрагмой и насыпным грузом. Ползуны верхней и нижней диафрагм скользят вдоль направляющих и предотвращают увеличение зазора между верхней и нижней гибкими диафрагмами и боковой и торцевой стенками по периметру вагона. Груз перекатывается к проёму задней двери и высыпается из вагона. Верхняя диафрагма при разгрузке через заднюю дверь не работает, так как сжатый воздух в неё не подаётся. После завершения разгрузки компрессор отключается и воздух из складчатых оболочек нижней диафрагмы спускают. Нижняя и верхняя гибкие диафрагмы ложатся на пол вагона.

Расчёт пневматического оборудования основан на том, что требуется обеспечить давление в складчатых оболочках, необходимое для выгрузки, например картофеля.

При расчёте определяется производительность компрессора.

Усилие, необходимое для подъёма разгружаемого транспортируемого груза, должно быть не менее величины, определяемой по формуле

$$F \geqslant g\rho Q,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2; ρ — насыпная плотность транспортируемого груза, т/м^3; Q — объём транспортируемого груза в вагоне, м^3.

Исходя из этого давление, создаваемое компрессором, определяется по формуле

$$p \geqslant F/S,$$

где S — суммарная площадь проекции четырёх П-образных складчатых оболочек на горизонтальную плоскость, м^2.

Величина S определяется по формуле

$$S = \sum S'_{1-4} \cos\alpha,$$

где $\sum S'_{1-4}$ — площадь четырёх П-образных складчатых оболочек диафрагмы, на которых находится груз, м^2; α — угол естественного откоса транспортируемого груза.

Таким образом, давление компрессора определяется по формуле

$$p = \frac{g\rho Q}{\sum S'_{1-4} \cos\alpha}.$$

Производительность компрессора П следует определять по формуле

$$\Pi = \Sigma V_{1-4}/t,$$

где ΣV_{1-4} — суммарный объём четырёх П-образных складчатых оболочек диафрагмы, м^3; t — оптимальное время заполнения воздухом четырёх П-образных складчатых оболочек диафрагмы, ч.

Схема воздухоснабжения складчатых оболочек грузового вагона с устройством для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов приведена на рис. 2.

При выборе компрессора в качестве исходных используют следующие характеристики окружающей среды: температуру воздуха — от −10 до +40 °С, относительную влажность воздуха — до 80 % при температуре 20 °С.

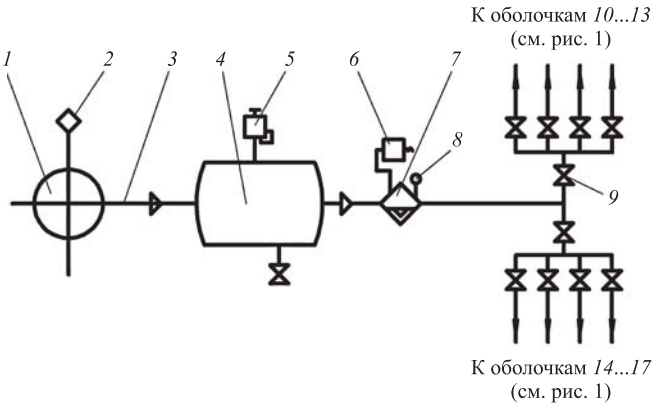


Рис. 2. Схема воздухоснабжения складчатых оболочек грузового вагона с устройством для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов:
1 — компрессор; 2 — воздушный фильтр; *3* — нагнетательный трубопровод; *4* — ресивер; *5* — предохранительный клапан; *6* — масловлагоотделитель; *7* — регулятор давления; *8* — манометр; *9* — система запорных вентилей

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый грузовой вагон с устройством позволяет полностью механизировать процесс выгрузки из него сыпучих легкоповреждаемых сельскохозяйственных продуктов, например картофеля. Предложенная методика расчёта давления и производительности компрессора позволяет подобрать необходимое пневматическое оборудование.

Библиографические ссылки

1. **Коноплев В.И., Шестаков В.А., Конов А.Г., Рыжаков Н.А.** Грузовой вагон для перевозки сельскохозяйственных продуктов // Патент России № 2048331. 1995. Бюл. № 32.

2. **Коноплев В.И.** Устройство для выгрузки сыпучих сельскохозяйственных продуктов из грузового вагона // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 6. С. 9—10.

3. **Коноплев В.И., Конов А.Г., Шестаков В.А., Рябов Г.Г.** Грузовой вагон // Патент России № 1594032. 1991. Бюл. № 32.

4. **Спиваковский А.О., Дьячков В.К.** Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.

Уважаемые читатели!

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

УДК 62-52:656.56

О.В. Крюков, д-р техн. наук, доц.
(АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород)

o.kryukov@ggc.nnov.ru

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены принципы энергоэффективного транспорта природного газа по магистральным газопроводам исходя из нормативно-технических документов. Представлены схема и современные технические средства частотно-регулируемых электроприводов и алгоритмы управления технологическими установками компрессорных станций магистрального транспорта газа.

Ключевые слова: энергоэффективность; магистральный газопровод; газоперекачивающий агрегат; электропривод; компрессорная станция; оптимальное управление; технологический агрегат.

The principles of energy efficient natural gas transport along main gas pipelines on the basis of normative and technical documents are considered. The scheme and modern technical means of frequency-regulated electric drives and algorithms for technological installations control of the main gas transport compressor stations are presented.

Keywords: energy efficiency; main gas pipeline; gas pumping unit; electric drive; compressor station; optimal control; technological aggregate.

Введение. Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) заключается в максимальном использовании их пропускной способности (газоперекачки) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку [1, 2]. Этот режим в значительной степени определяется работой компрессорных станций (КС) газотранспортных систем (ГТС) и характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие газохранилищ, а также научно обоснованных нормативных методик оптимизации.

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать максимальное (в соответствии с расчётом) давление газа в трубопроводе, снижать температуру перекачиваемого газа за счёт его охлаждения, использовать газопроводы большего диаметра с очисткой внутренней полости трубопровода [3].

Анализ показателей, характеризующих работу МГ нашей страны сегодня, свидетельствует о значительном износе, снижении технического состояния и производительности основных агрегатов КС [4]. Средний возраст газопроводов в России составляет 22 года. Большая часть из них (около 80 %) имеет возраст от 15 до 40 лет, что превышает нормативные показатели.

В последние годы интерес к проблемам энергоэффективности и энергосбережения на МГ значительно возрос, в том числе к разработке новых концепций оптимального управления, реализации интеллектуальных и малолюдных технологий функционирования, технических решений по применению новой техники, включая высоковольтные многоуровневые преобразователи частоты (ПЧ) [2—5]. Появились первые реализации подобных систем для основных технологических установок КС (рис. 1, см. обложку) — электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) и аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [1, 4].

Все отмеченные выше факторы при их системной реализации в рамках КС значительно повышают технико-экономическую привлекательность и конкурентоспособность ЭГПА, обеспечивая решение главных задач в области энергоэффективности и безопасности функционирования МГ, а также стабильности, надёжности и экологичности транспорта энергоресурсов России.

Реализация возможностей ЭГПА. Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85* (п. 3.116) в комплексе средств автоматизации компрессорных цехов

(КЦ) следует предусматривать системы автоматического регулирования, обеспечивающие поддержание заданных значений давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [1]. Однако существующие средства автоматики в основном работают автономно от агрегатов в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные режимы. Вместе с тем сегодня возможности регулируемого ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление КЦ, используя автоматическое слежение за возмущениями детерминированного и стохастического характера [3—7].

В соответствии с патентом на изобретение ведущего проектного института ПАО «Газпром» — АО «Гипрогазцентр» [2] при участии автора предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 2). Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка МГ измеряются и автоматически регулируются исходя из условия поддержания их на оптимальном уровне в соответствии с заданием и значениями внешних возмущений, действующих на параметры потока газа в газопроводах [3, 4].

Анализ предлагаемого способа, заключающегося в формировании давления и температуры потока сжатого газа по всей трассе МГ с помощью ЭГПА и вентиляторов АВО, установленных на всех КС в начале каждого линейного участка МГ, в сравнении с аналогами показывает, что данный способ магистрального транспорта газа отличается от известных тем, что в нём автоматически устанавливаются и плавно регулируются значения давления и температуры газа с помощью регулируемых ЭГПА и АВО в зависимости от текущих значений давления и температуры газа в МГ, измеряемых соответственно датчиками давления и температуры газа, заданных давления и температуры участка МГ, а также возмущающих воздействий — величин стохастического характера. Тем самым минимизируются параметрические изменения давления и температуры газопровода, чем повышается его эксплуатационная надёжность, а также минимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.

В качестве исходного состояния оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. При

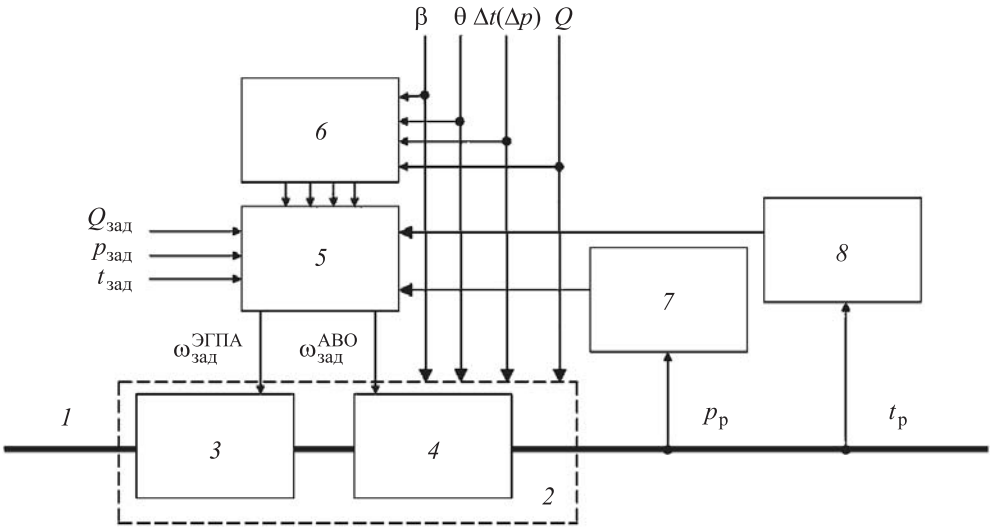


Рис. 2. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную КС:
1 — линейная часть МГ; *2* — КС; *3* — ЭГПА; *4* — АВО газа; *5* — блок расчёта параметров регулирования; *6* — датчики измерения внешних воздействий; *7*, *8* — датчики давления и температуры газа, измеряющие реальные значения давления и температуры газа на выходе КС; $\omega_{зад}^{ЭГПА}$, $\omega_{зад}^{АВО}$ — скорости вращения приводов ЭГПА и вентиляторов АВО соответственно; $Q_{зад}$, $p_{зад}$, $t_{зад}$ — заданные значения производительности, давления и температуры газа соответственно; β — влажность воздуха; θ — температура воздуха; Δt (Δp) — перепад температур или давлений на КС; Q — производительность перекачки газа КС; $p_р$, $t_р$ — реальные значения давления и температуры газа на выходе КС

этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трёхфакторный вид:

$$G = \alpha R + \beta W + gC, \qquad (1)$$

где α, β, γ — весовые коэффициенты; R — фактор «режима», т.е. минимизации (максимизации) давления в определённых точках ГТС — любых точках, расположенных выше и ниже КС или регулирующего вентиля, а также устройства потребления газа; W — фактор «энергии» или минимизации потребления электроэнергии на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в газопровод; C — фактор «цели», т.е. максимизации (минимизации) расхода газа на участке системы, расположенном между двумя точками газопровода, или давления в определённой точке соединения.

Матричное выражение (1) включает в себя ограничения равенства, в число которых входят закон потери напора в трубопроводах и первое правило Кирхгофа, определяющие расчёты сетей, и ограничения неравенства, в число которых входят ограничения на минимальные и максимальные значения расхода газа, ограничения на минимальное и максимальное давления в активных или пассивных объектах и ограничения мощности ЭГПА КС.

Оптимальная конфигурация активных объектов КС моделируется в виде программы P оптимизации вида

$$P = \begin{cases} \min\limits_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \|S\|; \\ C_I(x) + \beta e \leqslant s_I; \\ C_E(x) = s_E, \end{cases} \qquad (2)$$

где $x \in R^n$, $s_I \in R^p$, $s_E \in R^q$, $e \in \{0, 1\}$, x — совокупность переменных расхода газа и давления; $G(x)$ — целевая функция, представляющая собой экономический критерий оптимизации; $\|S\|$ — матрица параметров совокупности всех отклонений системы; $C_I(x)$ — совокупность p линейных и нелинейных ограничений неравенства для активных объектов; β — вектор, коэффициенты которого равны нулю или максимальным значениям ограничений; e — вектор двоичных переменных; $C_E(x)$ — совокупность q линейных и нелинейных ограничений равенства; s — переменная отклонения, ненулевое значение которой обозначает нарушение ограничения (s_I, s_E — для ограничений неравенства и равенства соответственно); α — коэффициент, соответствующий допустимой степени нарушения ограничений.

В результате при заданном расходе газа $Q_{зад}$ (см. рис. 2) давление $p_р$ и температура $t_р$ газа на выходе КС устанавливаются и стабилизируются на заданном оптимальном по энергопотреблению КС уровне. Таким образом, данный способ магистрального транспорта газа позволяет создать надёжную и долговечную в эксплуатации систему, ограничивающую отклонение значений давления и температуры газа выше и ниже предельных значений.

Использование предлагаемого способа магистрального транспорта газа обеспечивает автоматическую стабилизацию давления и температуры газа на выходе КС и тем самым практически полностью устраняет недопустимые деформации и напряжённые состояния трубопровода, а также возможные разрушения его противокоррозионной изоляции. В результате повышается эксплуатационная надёжность, а также оптимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа магистральных газопроводов.

Для реализации предложенной энергоэффективной технологической схемы система электропривода ЭГПА должна быть частотно-регулируемой и инвариантной ко всем параметрам возмущений детерминированного и стохастического характера [4, 5], т.е. комбинированной системой автоматического регулирования (САР) — по отклонению и возмущению — с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру — давлению газа на выходе КС. Такая система [5] показана на рис. 3.

Объектом управления для электропривода *9* является газоперекачивающий агрегат *10*, на вход которого подаётся газ. Повышение давления (компримирование) газа происходит за счёт политропной работы компрессоров

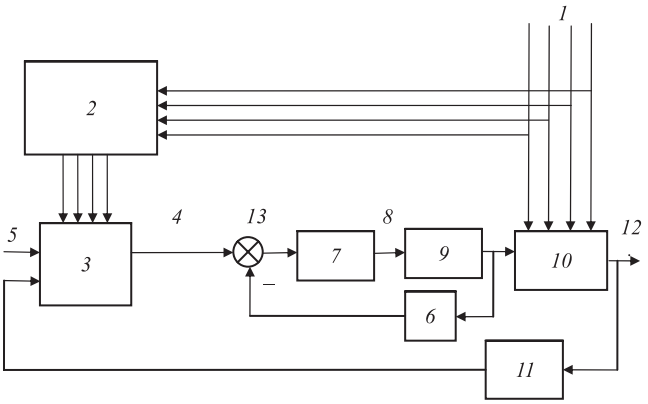


Рис. 3. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА

ГПА. Вращение газоперекачивающего агрегата *10* обеспечивается двигателем *9* с устройством изменения его частоты вращения (ПЧ) с законом управления U/f^2 = const (U, f — напряжение и частота питающего двигатель напряжения). На вход блока *3* расчёта необходимой скорости вращения электропривода поступают сигналы о значениях возмущающих воздействий с датчиков *2* измерения внешних воздействий *1* и сигнал задания давления *5*, который корректируется с датчика давления *11*. Динамические колебания скорости вращения электропривода ГПА *9* поступают на датчик скорости вращения *6* и далее на второй вход сумматора *13*. Сигнал *4* с выхода блока *3* расчёта необходимой скорости вращения электропривода ГПА поступает на сумматор *13*, где корректируется сигналом с датчика скорости *6*. Сигнал с сумматора *13* поступает на ПИ-регулятор *7*, на выходе которого формируется сигнал *8*, пропорциональный требуемой скорости вращения электропривода *9*. Газоперекачивающий агрегат *10*, вращаемый электроприводом *9*, создаёт требуемое давление газа на выходе компрессорной станции *12*.

Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению (давления газа) и САР по возмущению (стохастических возмущений), обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях различных случайных воздействий средствами инвариантной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА. При этом решается задача повышения точности отработки требуемого давления газа на выходе КС и стабилизации процесса компримирования газа средствами ЭГПА. Этому способствует строгое соблюдение параметров основного технологического процесса компримирования газа, что позволяет повысить производительность и надёжность газопровода в условиях возмущающих воздействий [7, 8].

При необходимости перевода ЭГПА в турбодетандерный режим работы необходимо обеспечивать на выходе ПЧ параметры напряжения с помощью введения внешней отрицательной обратной связи по выходному напряжению.

Библиографические ссылки

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло и др.; под ред. О.В. Крюкова. Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. 560 с.

2. **Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Репин Д.Г.** Способ магистрального транспорта газа // Патент № 2502914, МПК F17D1/02. АО «Гипрогазцентр». 2013. БИ № 36.

3. **Крюков О.В.** Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15. М., ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2015. С. 368—386.

4. **Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е.** Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Тр. IV Всеросс. науч.-практ. конф. / под общей ред. В.Ю. Островлянчика. Новокузнецк, 2010. С. 38—45.

5. **Крюков О.В., Степанов С.Е.** Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент № 107427, МПК H02P 27/04. АО «Гипрогазцентр». 2011. БИ № 22.

6. **Крюков О.В.** Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 3. С. 45—50.

7. **Крюков О.В., Степанов С.Е.** Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2014. № 8 (710). С. 50—56.

8. **Крюков О.В.** Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Тр. VIII Междунар. (XIX Всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. С. 157—163.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей,
присылаемых для публикации, можно найти
на сайте www.mashin.ru

УДК 681.518.52

П.А. Толкачёв
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
tolkachevpa@mail.ru

МЕТОДИКИ УВЕЛИЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СПЕКТРА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ КОСВЕННОГО СИНТЕЗА С ДЕЛИТЕЛЕМ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ

Рассмотрены методы увеличения качества спектра выходного сигнала для синтезаторов частот косвенного синтеза. Первый метод заключается в изменении по случайному закону моментов переключения коэффициента деления (рандомизации), второй — в коррекции фазовой ошибки. Проведено имитационное моделирование работы данных методов с помощью программного пакета Simulink.

Ключевые слова: синтезатор частот косвенного синтеза; дробно-переменный коэффициент деления; метод рандомизации коэффициентов переключения; метод коррекции фазовой ошибки; моделирование дробного синтезатора частот.

Methods for increasing the quality of the output signal spectrum for frequency synthesizers of indirect synthesis are considered. The first method consists in changing according to the random law of the division coefficient switching moment (randomization), the second method consists in correcting the phase error. Simulation modeling of these methods using Simulink software package was carried out.

Keywords: frequencies synthesizer of indirect synthesis; fractional-variable coefficient of division; method of switching factors randomization; method of phase error correction; simulation of fractional frequency synthesizer.

В настоящее время всё бóльшую роль в системах передачи информации играют синтезаторы частот (СЧ) косвенного синтеза, основанные на применении фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). СЧ с делителем с переменным коэффициентом деления (ДПКД) в случаях, когда необходимо спроектировать СЧ в высокочастотном диапазоне, имеет достаточно сложную и нерациональную реализацию [1].

На рис. 1 изображён СЧ с ФАПЧ и ДПКД, генерирующий синусоидальный сигнал с частотой $f_{вых}$ = 2 ГГц, при частоте опорного генератора (ОГ) $f_{ОГ}$ = 19,68 МГц. В случае когда требуется реализовать систему с частотным разрешением в 200 кГц (как для систем WCDMA), выбираем предварительный коэффициент деления M = 492, следовательно, частота сравнения ЧФД $f_{ФД}$ становится равной 40 кГц. Поэтому для достижения разрешения в 200 кГц коэффициент деления ДПКД должен быть не меньше N = 50 000, так как

$$f_{вых} = \frac{N}{M} f_{ОГ} = N f_{ФД} \rightarrow \Delta f = f_{ФД},$$

где $f_{ОГ}$ — частота опорного генератора; $f_{ФД}$ — частота сравнения фазового детектора; N — коэф-

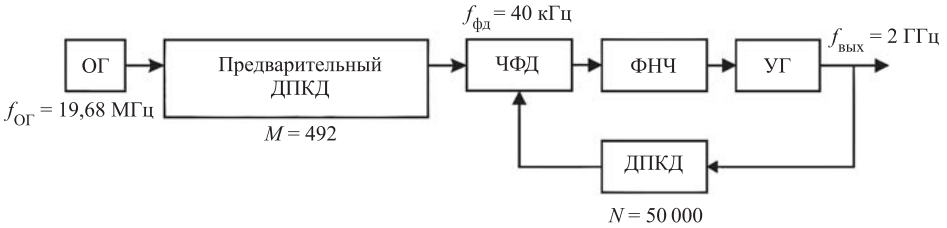


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частоты косвенного синтеза с применением фазовой автоподстройки частоты и делителя с переменным коэффициентом деления:
ОГ — опорный генератор; предварительный ДПКД — предварительный делитель с постоянным коэффициентом деления M; ЧФД — частотно-фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; УГ — управляемый генератор; ДПКД — делитель с переменным коэффициентом деления N

фициент деления ДПКД; M — коэффициент деления предварительного ДПКД; Δf — разрешение по частоте; $f_{вых}$ — частота на выходе СЧ.

В результате такой реализации шаг сетки частот (разрешение по частоте) не может превышать частоту сравнения фазового детектора, при этом уровень шумов на выходе управляемого генератора (УГ) возрастёт на 114 дБ относительно ОГ [1]. Кроме того, фазовый детектор, работающий на частоте $f_{ФД}$ = 40 кГц обеспечит стабилизацию частоты в пределах нескольких килогерц, что приведёт не только к увеличению шумов на выходе УГ, но и к значительному увеличению времени перестройки [2].

Для того чтобы частота фазового детектора стала выше разрешения по частоте, необходимо использовать дробный ДПКД (ДДПКД).

СЧ с ДДПКД позволяет обеспечить разрешение по частоте выше частоты сравнения фазового детектора. Метод реализации ДДПКД основан на применении фазового аккумулятора [3].

На рис. 2 изображена традиционная схема реализации СЧ с ДДПКД, который производит деление на $N\frac{1}{4}$. Дробный коэффициент деления реализуется подачей управляющего сигнала на одно из двух положений ДДПКД: на блок деления с коэффициентом N или $N + 1$.

При этом сигнал на выходе

$$f_{вых} = \left(N + \frac{P}{2^k}\right) f_{ОГ} = Nf_{ОГ} + \frac{P}{2^k} f_{ОГ} \rightarrow$$

$$\rightarrow \Delta f = \frac{P}{2^k} f_{ОГ},$$

где k — разрядность аккумулятора; P — разрядность делителя.

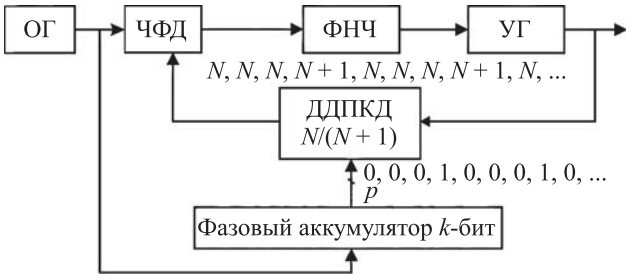


Рис. 2. Структурная схема синтезатора частоты косвенного синтеза с применением фазовой автоподстройки частоты и делителя с дробно-переменным коэффициентом деления

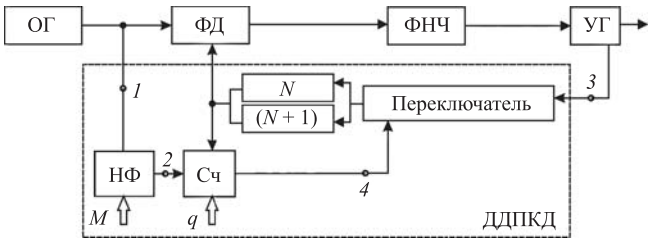


Рис. 3. Схема реализации синтезатора частоты косвенного синтеза с применением фазовой автоподстройки частоты и делителя с дробно-переменным коэффициентом деления

В результате такого способа деления возникает основная проблема ДДПКД — появление нежелательных боковых составляющих в спектре выходного сигнала.

Способ реализации СЧ с ДДПКД представляет собой классическую схему реализации СЧ с ФАПЧ, где в качестве делителя используется ДДПКД (рис. 3).

В состав ДДПКД входят: цифровой накопитель фазы (НФ) с объёмом памяти M, счётчик (Сч) с ограничением q и цифровой делитель частоты на N или $(N + 1)$ в зависимости от значения управляющего сигнала на переключателе (точка *4*).

Узел ДДПКД работает следующим образом: допустим, что в некоторый момент времени в НФ и Сч записаны нули. Каждый импульс с выхода УГ (точка *3*) поступает через управляемый переключатель на делитель частоты $N/(N + 1)$, а затем с его выхода на Сч. Пока число в Сч не превосходит значение q, выходной сигнал Сч (точка *4*) принимает значение логической 1, так что коэффициент деления частоты составляет $(N + 1)$ (переключатель направляет сигнал на блок деления с коэффициентом $(N + 1)$). Для последующих $(M - q)$ импульсов выходной сигнал Сч изменяется на логический 0, поэтому коэффициент деления принимает значение N (переключатель направляет сигнал на блок деления с коэффициентом N). Когда на вход НФ (точка *1*) поступит M импульсов с ОГ, выходной импульс переполнения (точка *2*) сбрасывает Сч в исходное состояние и процесс счёта начинается вновь.

Таким образом, за M периодов импульсов ОГ проходит q периодов сигнала с частотой $f_{вых}/(N + 1)$ и $(M - q)$ периодов сигнала с частотой $f_{вых}/N$.

Выходная частота при этом запишется в виде

$$f_{вых} = \left(N + \frac{q}{M}\right) f_{ОГ}.$$

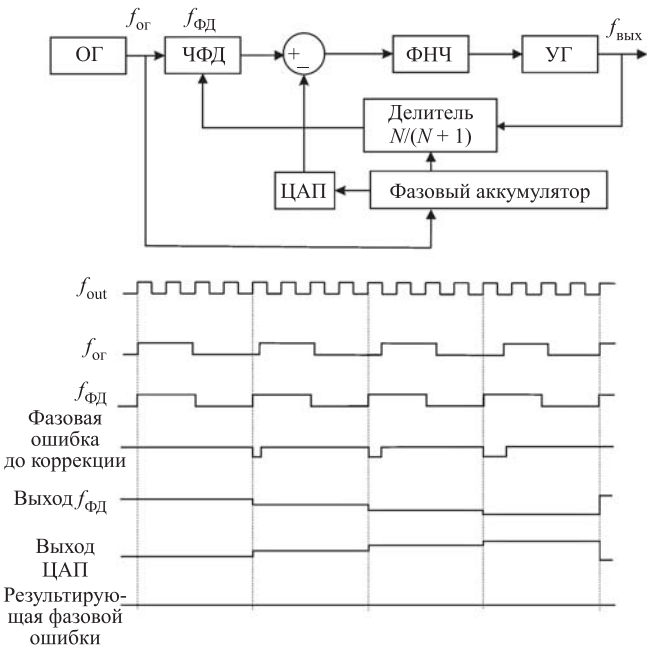


Рис. 4. Структура и принцип работы синтезатора частоты по методу компенсации фазовой ошибки

Сч формирует колебание с заданной средней частотой $f_{вых}$ в виде последовательности отрезков времени с незначительно отличающимся интервалом следования: на одном из них выходная частота составляет $Nf_{ОГ}$, на другом — $(N + 1)f_{ОГ}$.

Моменты перехода выходного напряжения УГ через ноль наблюдаются неравномерно: в группе из q периодов они следуют реже, а в последующей группе из $(M - q)$ периодов чаще, чем для равномерного закона. Соответственно, ошибка по фазе то увеличивается, то уменьшается. В результате нарушается работа системы ФАПЧ, так как на выходе ФД образуется пилообразное напряжение, поступающее на УГ. В итоге на УГ в выходном спектре сигнала формируются дополнительные боковые составляющие.

Ниже рассмотрены методы, с помощью которых возможно подавление нежелательных спектральных составляющих.

Метод компенсации фазовой ошибки позволяет использовать цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) как один из способов борьбы с побочными составляющими [3].

На рис. 4 показаны базовая архитектура и принцип работы системы. Поскольку фазовая ошибка компенсируется в аналоговой области, то этот метод зависит от несовершенства аналоговых элементов, в результате чего компенсация ограничивается, в основном, разрешением ЦАП и его точностью. Этот метод наиболее эффективен, когда используется ЧФД, реализованный на триггерах, а не в виде обычного перемножителя. В этом случае необходимо только совпадение напряжения постоянного тока в течение одного такта.

Метод случайного переключения коэффициента деления. Рандомизируя, т.е. переключая коэффициенты деления ДДПКД случайным образом, возможно уменьшить уровень боковых составляющих в спектре выходного сигнала. В качестве простейшего генератора псевдослучайной последовательности переключения коэффициентов деления можно использовать сигма-дельта-модулятор первого порядка, на вход которого подаётся постоянная величина (дробная часть коэффициента деления). В результате на каждый тактовый сигнал случайным или псевдослучайным образом генерируется новый управляющий сигнал, который регулирует переключение ДДПКД с N на $N + 1$. Данный метод имеет недостаток — дрожание выходной частоты, так как белый шум, проникающий в частотную область, увеличивает фазовые шумы.

Попробуем применить рассмотренные выше методы и для наглядности используем моделирование.

Моделирование СЧ. В программной среде Simulink спроектирована модель СЧ с ДДПКД [4—6], в которой были последовательно применены два метода борьбы с паразитными боковыми составляющими (рис. 5).

Сравним результаты, полученные при моделировании.

На рис. 6 изображены эпюры напряжения сигнала на выходе фильтра нижних частот (ФНЧ). Как видно из рис. 6, *а*, добиться полностью устойчивой работы СЧ с ДДПКД при такой реализации не удалось. Однако, применив метод рандомизации моментов переключения (рис. 6, *б*), удалось добиться снижения уровня биений и стабилизации их в пределах 0,2 В. Совместное же применение метода рандомизации моментов переключения с методом компенсации фазовой ошибки позволяет значительно улучшить стабильность напряжения на выходе ФНЧ (рис 6, *в*).

Чтобы оценить работу методов борьбы с боковыми составляющими, рассмотрим спектры выходного сигнала (рис. 7).

На рис. 7, *а* изображён спектр выходного сигнала СЧ с ДДПКД. Отметим, что уровень шумов порядка −80 ДБм/Гц и ширина спектра на уровне −40 ДБм/Гц составляют порядка

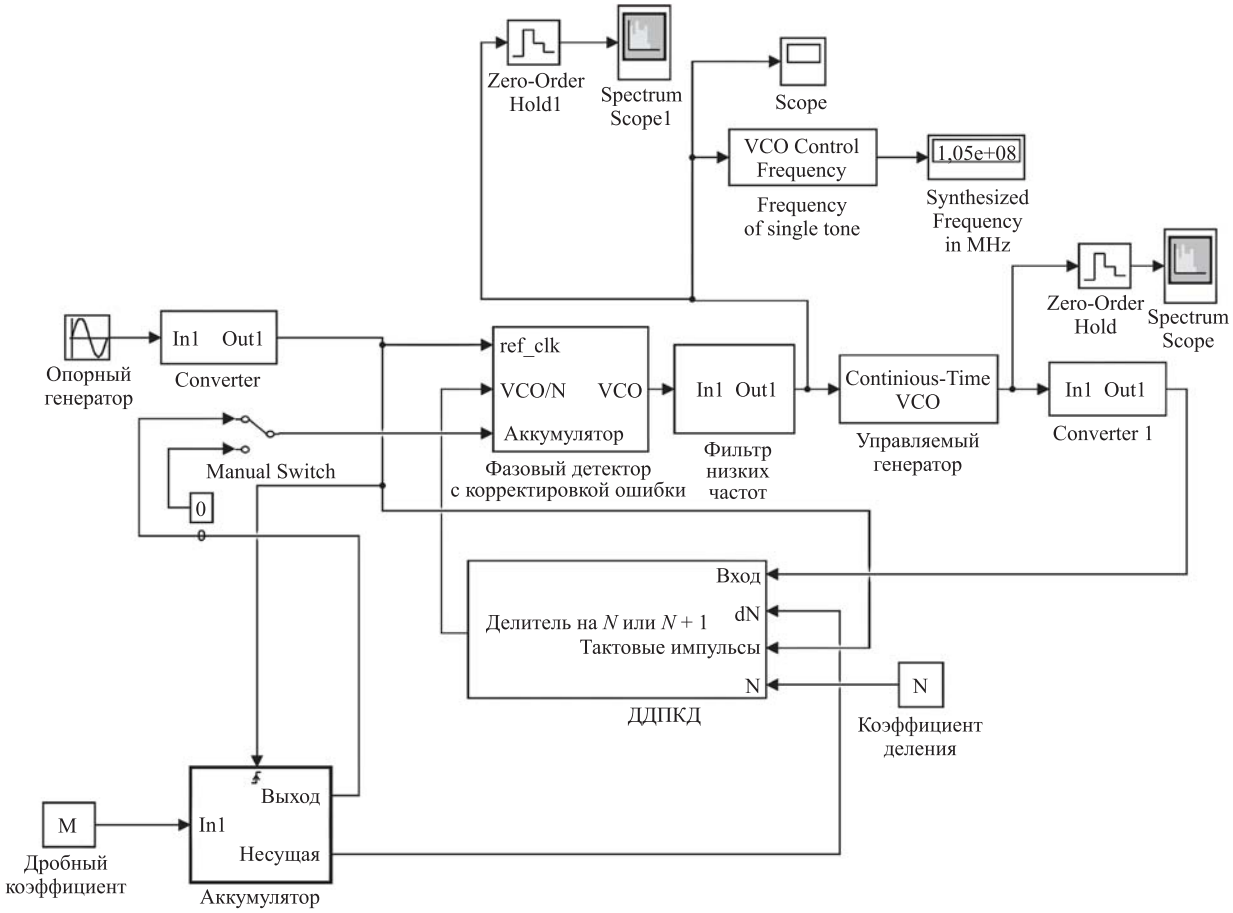
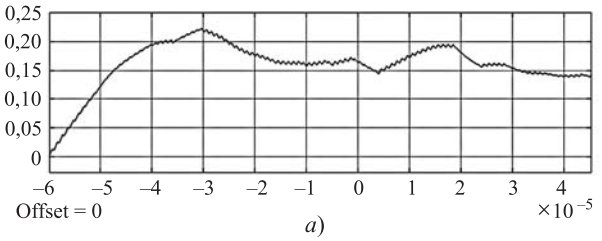
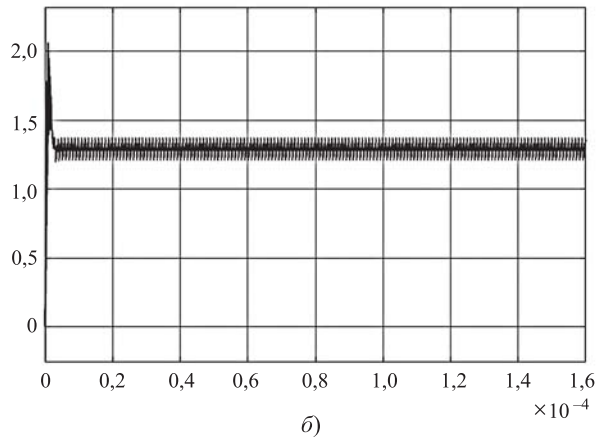


Рис. 5. Общий вид модели синтезатора частоты косвенного синтеза с применением фазовой автоподстройки частоты и делителя с дробно-переменным коэффициентом деления в математическом пакете Matlab Simulink, в котором применён метод рандомизации моментов переключения коэффициентов деления, а также метод компенсации фазовой ошибки

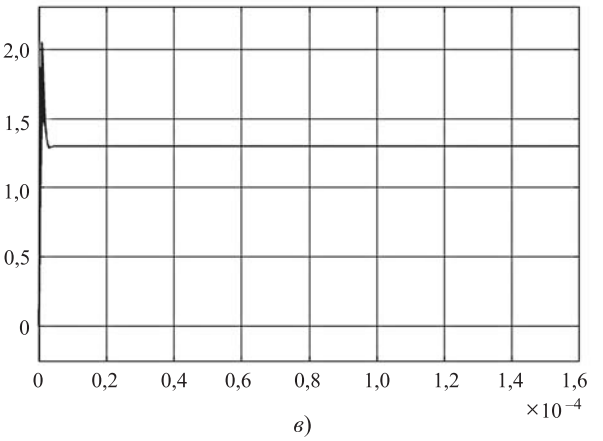


а)

Рис. 6. Эпюры напряжения сигнала на выходе фильтра нижних частот синтезатора частоты:
а — базовая модель; *б* — после применения метода рандомизации моментов переключения; *в* — применение методов рандомизации момента переключения и метода компенсации фазовой ошибки



б)



в)

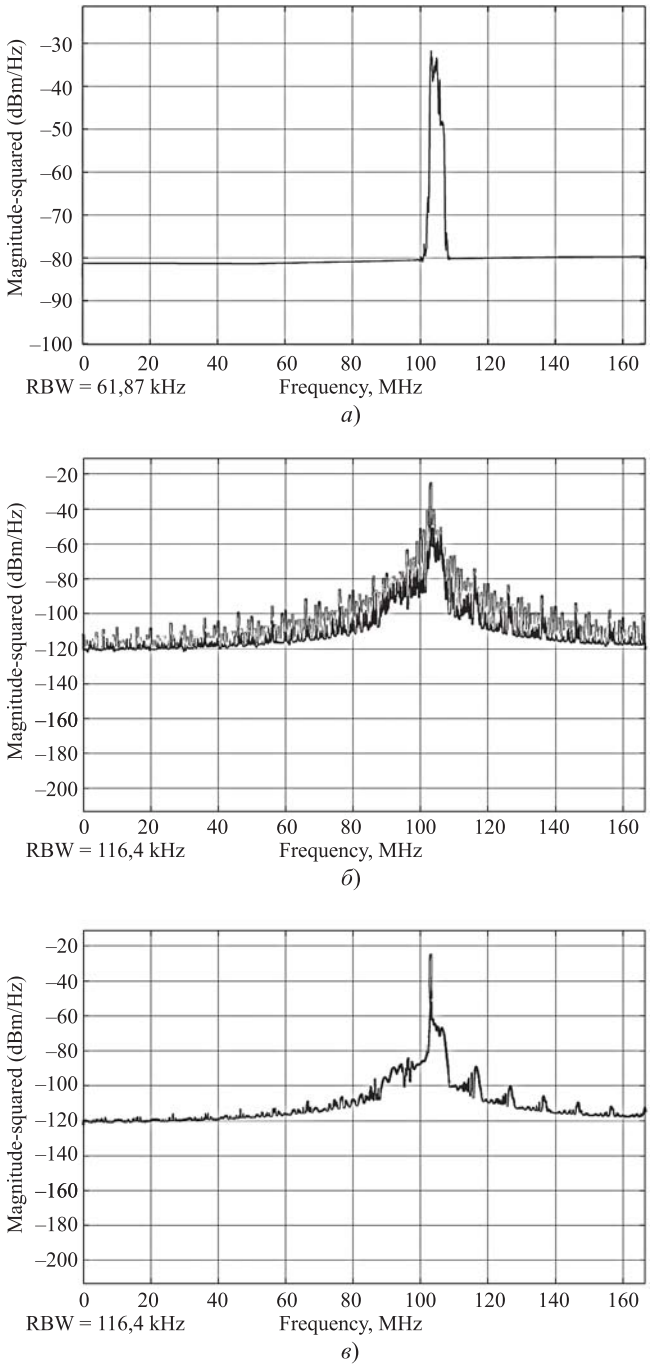


Рис. 7. Спектр сигнала на выходе синтезатора частоты: *а* — базовая модель; *б* — после применения метода рандомизации моментов переключения; *в* — применение методов рандомизации момента переключения и метода компенсации фазовой ошибки

5 МГц. После применения метода рандомизации моментов переключения (рис. 7, *б*) средний уровень шумов снизился до величины −100 ДБм/Гц. При этом спектр стал более ярко выражен, что свидетельствует об улучшении качества выходного сигнала. После применения метода компенсации фазовой ошибки (рис. 7, *в*) уровень шумов в выходном спектре снизился до −110 ДБм/Гц, а ширина спектра выходного сигнала на уровне в −40 ДБм/Гц стала составлять величину порядка 1 МГц.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что применение методов рандомизации моментов переключения и компенсации фазовой ошибки позволяют значительно улучшить качество спектра выходного сигнала СЧ, а также значительно снизить средний уровень шумов на выходе. Однако использование в качестве рандомизатора моментов переключения ДДПКД сигма-дельта-модулятора первого порядка затрудняет создание полностью случайной последовательности, поэтому представляется перспективным использование сигма-дельта-модулятора более высоких порядков.

Библиографические ссылки

1. **Шахтарин Б.И., Иванов А.А.** Сравнительный анализ цифровых систем синхронизации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2007. № 1. С. 24—38.

2. **Шахтарин Б.И., Сизых В.В.,** Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. М.: Горячая линия — Телеком, 2011. С. 118—122.

3. **Woogeun Rhee, Ni Xu, Bo Zhou, Zhihua Wang.** Fractional-N Frequency Synthesis: Overview and Practical Aspects with FIR-Embedded Design // Journal of semiconductor technology and science. Vol. 13. № 2. April, 2013. P. 170—172.

4. **Прохладин Г.Н.** Моделирование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе систем ИФАПЧ // Радиотехника. 2006. № 2. С. 36 — 47.

5. **Манасевич В.** Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979 С. 112—180.

6. **Шахтарин Б.И.** Синтезаторы частот. М.: Горячая линия—Телеком, 2007. С. 112—136.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 681.513

Чжо Зин Хтут, М.С. Селезнёва, А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф.,
К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
neysipin@mail.ru

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрена функциональная схема построения прицельно-навигационного комплекса с магистрально-модульной структурой, используемая в современных маневренных летательных аппаратах. Предложена модульная структура системы контроля прицельно-навигационного комплекса, включающая модуль контроля текущих параметров и модуль прогнозирования, который позволяет прогнозировать погрешности измерительных систем и на основе этой информации принимать решение о реконфигурации комплекса, корректировать системы для сохранения их работоспособности.

Ключевые слова: прицельно-навигационный комплекс; система контроля; магистрально-модульная структура; модель погрешностей; прогноз.

A functional scheme for constructing a sighting and navigation complex with a trunk-modular structure used in modern maneuverable aircraft is considered. A modular structure of the monitoring system for sighting and navigation complex is proposed. This structure includs a module for monitoring current parameters and a forecasting module that allows to predict the errors of measuring systems and on the basis of this information make a decision of the complex reconfiguration, adjust systems to maintain their operability.

Keywords: sighting and navigation complex; control system; backbone-module structure; errors model; forecast.

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

Последние десятилетия преобладающей тенденцией при решении задач по обеспечению соответствующего уровня информационного обеспечения ЛА было объединение бортового оборудования в единые комплексы — бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС). Интеграция бортового оборудования на базе БЦВС привела к появлению на борту ЛА автоматизированных прицельно-навигационных комплексов (ПНК).

Исследованы высокоэффективные ПНК с магистрально-модульной структурой и оригинальными алгоритмами формирования текущей информации, имеющие повышенную помехо- и отказоустойчивость, высокую точность формирования данных и широкий диапазон изменений навигационно-пилотажных параметров ЛА [1—3].

Требования, предъявляемые к точности, помехо- и отказоустойчивости, диапазону применения измерительных систем и ПНК в целом, постоянно возрастают. При этом параллельно также происходит качественный и количественный рост информационно-вычислительных ресурсов БЦВС ПНК. Это позволило обеспечить требуемые характеристики ПНК указанных самолётов алгоритмическими методами и достичь результата за короткое время с минимальными затратами.

Измерительные системы ПНК имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Для компенсации погрешностей используются методы многоуровневой комплексной обработки информации, включающие алгоритмы оценивания и построения прогнозирующих математических моделей погрешностей систем, реконфигурирование структуры [4] и параметрическую адаптацию к внешним условиям и внутреннему состоянию ПНК. Магистрально-модульная структура

ПНК предусматривает реализацию системы контроля измерительных систем в виде программного модуля. Создание высокоэффективного реализуемого в современных БЦВС модуля контроля является важной задачей при обеспечении высокой точности, помехоустойчивости и отказоустойчивости ПНК.

Структурная организация ПНК и методы обработки информации. Состав ПНК для конкретного типа ЛА определяется функциональными требованиями к нему и задачами, решаемыми ЛА. В общем случае в состав ПНК входят:

резервированные инерциальные системы — платформенные инерциальные навигационные системы (ИНС), бесплатформенные системы (БИНС) и курсовертикали (БКВ);

аэрометрические датчики и системы — система воздушных сигналов (СВС), датчики углов атаки и скольжения (ДУАС);

радиотехнические навигационные системы — радиосистема ближней навигации (РСБН), доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС), спутниковая навигационная система (СНС), радиовысотомеры (РВ);

обзорно-прицельные средства — оптико-локационная система (ОЛС), радиолокационная система (РЛС), система управления оружием (СУО);

информационно-управляющее поле кабины (ИУП) — совокупность устройств управления и ввода информации (УВИ) и систем отображения информации (СОИ);

интегрированная вычислительная среда комплекса (ИВС), которая содержит одну или несколько БЦВС, другие специальные системы.

Общая структура ПНК представлена на рис. 1.

В состав ИВС в общем случае входят БГС и резервированные для повышения надёжно-

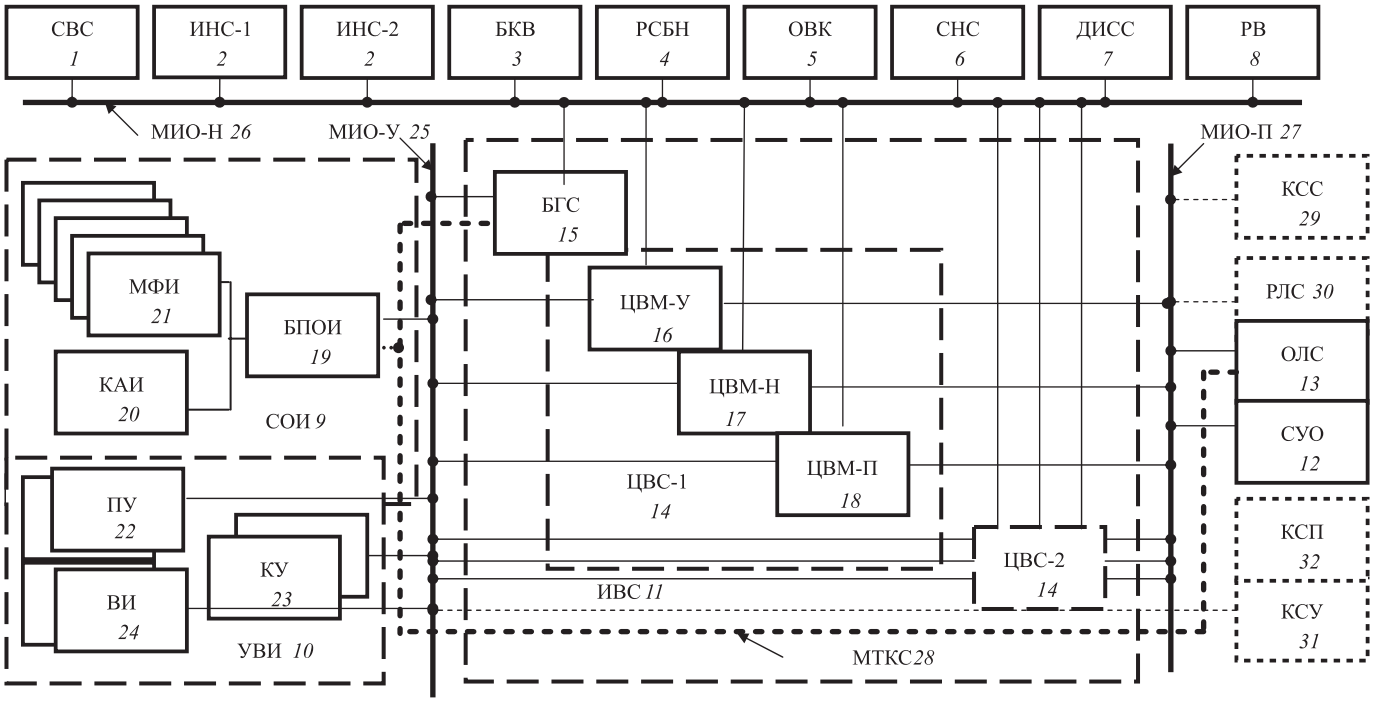


Рис. 1. Общая структура ПНК:

1 — система воздушных сигналов (СВС); *2* — резервированные инерциальные навигационные системы (ИНС-1 и ИНС-2); *3* — инерциальный измерительный блок (ИИБ) или бесплатформенная курсовертикаль (БКВ); *4* — радиосистема ближней навигации (РСБН); *5* — датчики аэродинамических углов атаки и скольжения (ДУАС); *6* — спутниковая навигационная система (СНС); *7* — доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС); *8* — радиовысотомер (РВ); *9* — система отображения информации (СОИ); *10* — устройства управления и ввода информации (УВИ); *11* — интегрированная вычислительная среда (ИВС); *12* — система управления оружием (СУО); *13* — оптико-локационная система (ОЛС); *14* — резервированные цифровые вычислительные системы (ЦВС-1 и ЦВС-2); *15* — бортовая графическая станция (БГС); *16* — вычислитель управления (ЦВМ-У); *17* — вычислитель навигации (ЦВМ-Н); *18* — вычислитель прицеливания (ЦВМ-П); *19* — блок программной обработки информации (БПОИ); *20* — каллиматорный авиационный индикатор (КАИ); *21* — многофункциональные индикаторы (МФИ); *22* — пульт управления (ПУ); *23* — кнюппельные устройства (КУ); *24* — визуализация информации (ВИ); *25* — магистраль информационного обмена управления (МИО-У); *26* — магистраль информационного обмена навигации (МИО-Н); *27* — магистраль информационного обмена прицеливания (МИО-П); *28* — магистраль телекодовой связи (МТКС); *29* — комплекс средств связи (КСС); *30* — радиолокационная система (РЛС); *31* — комплексная система управления (КСУ); *32* — комплект средств поражения (КСП)

сти идентичные цифровые вычислительные системы (ЦВС), выполненные в виде совокупности функциональных подсистем — вычислителей типа БЦВМ-386 или БЦВМ-486.

Информационная интеграция задач ПНК предполагает, что вся информация, полученная от информационных систем комплекса, после предварительной обработки поступает в общее информационное пространство ИВС, где осуществляется её полное преобразование. Информация обрабатывается с помощью программного обеспечения (ПО), которое включает программные модули оценивания, идентификации, комплексирования, управления и др.

Также ПО включает средства контроля за ходом вычислений и восстановления вычислительных процессов при сбоях аппаратуры БЦВС, при наличии ошибок во входных данных и/или в функциональных программах, связанных с некорректной обработкой граничных значений входных данных.

Вычисления восстанавливаются повторным запуском с точки старта. При невосстановлении нормального выполнения задач ПО повторно загружает соответствующую функциональную программу и запускает её с формированием признака восстановления. При возникновении сбоев, приводящих к необратимым нарушениям структур данных и/или функциональных программ, обеспечивается перезапуск программ с точки старта БЦВС.

В целях снижения сложности, повышения качества и надёжности разработки осуществлена структуризация ПО БЦВС ПНК, т.е. его представление как иерархически организованной информационно-управляющей структуры, состоящей из функциональных комплексов и унифицированных программных модулей, интерфейс которых спроектирован по стандартным правилам обмена информационными модулями и реализуется посредством стандартных каналов обмена.

Состав ПО на уровне программных модулей полностью совпадает с ПО на уровне функциональных модулей так, что основной структурной программной единицей ПО является программный модуль, который является программным эквивалентом функционального модуля.

Структурное и функциональное построение ПО системы контроля ПНК. На рис. 2 представлена иерархическая функционально-ориентированная структура системы контроля.

В рамках функционального комплекса сгруппированы модули, обеспечивающие решение следующих задач: управление режимами подготовки и работы систем комплекса; расширенный предполётный контроль систем

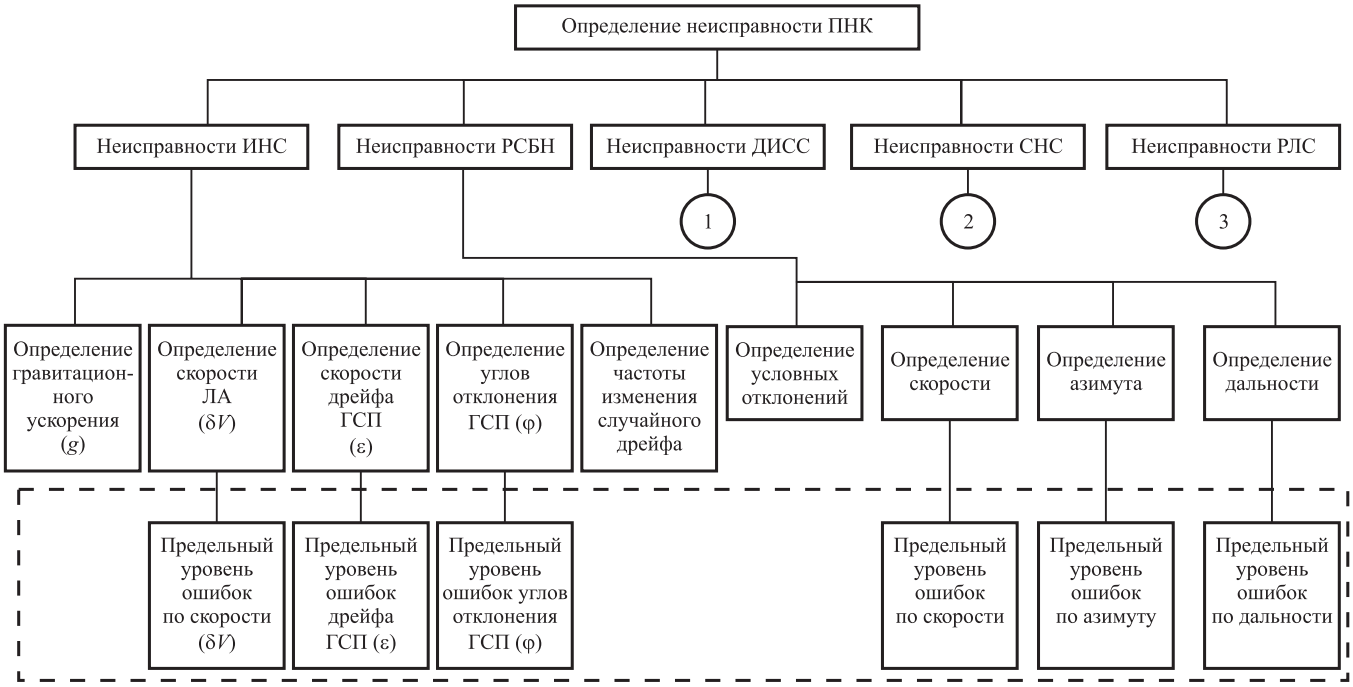


Рис. 2. Система контроля текущего состояния ПНК:
ПНК — прицельно-навигационный комплекс; ИНС — инерциальные навигационные системы; РСБН — радиосистемы ближней навигации; ДИСС — доплеровские измерители скорости и угла сноса; СНС — спутниковые навигационные системы; РЛС — радиолокационные системы; ГСП — гиростабилизированная платформа

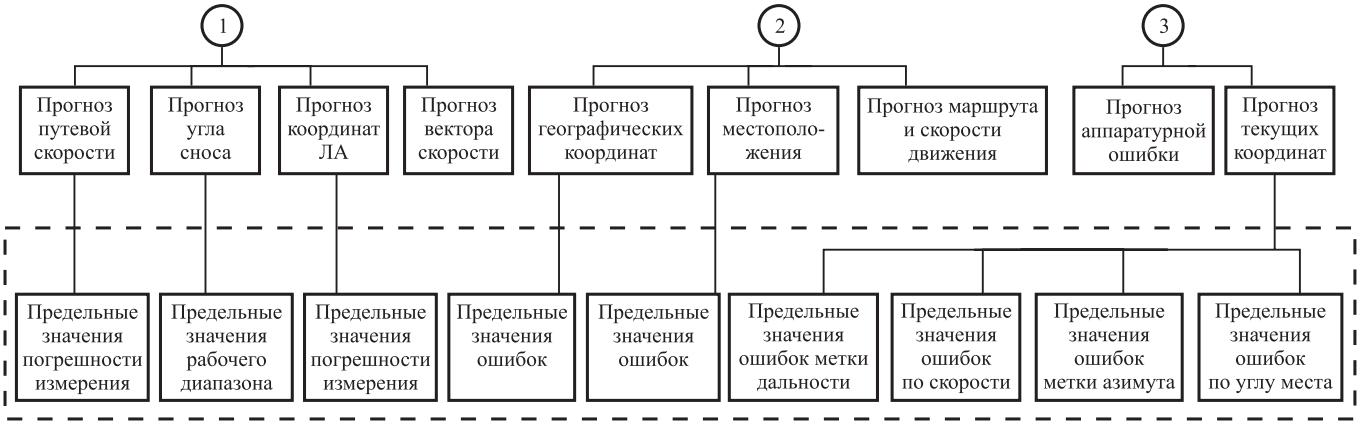


Рис. 3. Схема системы контроля по прогнозным значениям состояния ПНК

комплекса; контроль исправности систем комплекса; реконфигурация информационной структуры комплекса; автоматизированный функциональный контроль комплекса (тренаж); вывод информации на контрольно-записывающую аппаратуру (КЗА).

В рамках функционального комплекса КОИ решаются задачи коррекции навигационных параметров, определяемых в комплексе. Для решения задачи коррекции определяются оценки погрешностей навигационных данных с помощью адаптивного алгоритма оценивания, являющегося модификацией фильтра Калмана [5].

В фильтре Калмана используется уравнение погрешностей ИНС, которое имеет вид

$$\boldsymbol{x}_k = \Phi x_{k-1} + w_{k-1};$$

$$\boldsymbol{x}_k = [\delta V_{xk}\ \delta V_{yk}\ \alpha_k\ \beta_k\ \psi_k\ \varepsilon_{xk}\ \varepsilon_{yk}\ \varepsilon_{zk}]^T;$$

$$w_{k-1} = [B_x\ B_y\ 0\ 0\ 0\ w_{xk-1}\ w_{yk-1}\ w_{zk-1}]^T;$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & f_yT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & -f_xT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ \dfrac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \dfrac{T}{R}\operatorname{tg}\phi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\Phi}$ — матрица системы; $\boldsymbol{x}_k$ — вектор состояния; δV_{xk}, δV_{yk} — ошибки ИНС в определении скорости; α_k, β_k, ψ_k — углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника; ε_{xk}, ε_{yk}, ε_{zk} — скорости дрейфов ГСП; φ — широта местоположения; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести; f_x, f_y — горизонтальные ускорения ЛА, на котором установлена ИНС; B_x, B_y — смещение нулей акселерометров; T — период дискретизации; w_{xk-1}, w_{yk-1}, w_{zk-1} — возмущающие внешние воздействия; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа гироскопов.

В системе контроля (см. рис. 2) контролируется текущее состояние ПНК. Выделены доминирующие параметры, подлежащие контролю. Эти же параметры использованы в схеме системы контроля (рис. 3) для прогнозирования — контролю подвергаются прогнозные значения. Построение прогнозирующих моделей в схеме (см. рис. 3) проводится с помощью эволюционных алгоритмов [6, 7].

Использование системы, показанной на рис. 3, позволяет предсказать выход параметров ПНК в зону критических значений (граница работоспособности) и принять меры по предотвращению потери работоспособности ПНК и использования недостоверной информации в системах ЛА.

Сохранение работоспособности ПНК ЛА осуществляется комплексированием наиболее точных измерительных систем. Для этого анализу подвергаются прогнозные значения погрешностей измерительных систем ПНК. В качестве критерия, по которому осуществляется селекция измерительных систем

ПНК, использован численный критерий степени наблюдаемости [8, 9].

Другой подход заключается в использовании алгоритмической коррекции в структуре измерительных систем с помощью алгоритмов управления [10]. В устойчивом режиме работы измерительных систем вмешиваться в структуру систем нежелательно, так как может произойти изменение настройки динамических параметров.

В случае прогнозирования выхода погрешностей в критическую зону и за допуск, указанный в паспорте прибора, реализуется алгоритм коррекции в структуре системы. Например, при увеличении прогноза погрешностей ИНС до критических значений включается цепь коррекции в структуре системы: управляющие сигналы, пропорциональные погрешностям, поступают на вход первого интегратора и вход датчика момента [8]. Тем самым уменьшаются значения погрешностей ИНС и сохраняется работоспособность ПНК без принудительного изменения рабочей структуры комплекса.

Уравнение, моделирующее погрешности ИНС, демпфированной с изменением собственной частоты, имеет следующий вид:

$$\boldsymbol{x}_k = \widehat{O}\boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{W}_{k-1} + k_{k-1}\boldsymbol{z}_k, \qquad (2)$$

где k — матрица коэффициентов демпфирования;

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Сигнал подаётся на первый интегратор для демпфирования свободных колебаний системы и на датчик момента для сокращения периода колебаний. Обычно коэффициенты имеют следующие значения:

$$k_1 = 0{,}99\,\frac{1}{c};\ k_2 = 2{,}5\cdot 10^{-6}R;$$

$$R = 6\ 370\ 000 \text{ м}.$$

Для более точной компенсации погрешностей в структуре ИНС используется оптимальный регулятор [8]. Уравнение ошибок ИНС с регулятором имеет вид

$$\boldsymbol{x}_k = A\boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{u}_{k-1} + \omega_{k-1}, \qquad (3)$$

где u_{k-1} — вектор управления.

Вектор управления имеет следующий вид:

$$\boldsymbol{u}_{k-1} = -K_{k-1}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}, \qquad (4)$$

где $\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$ — оценка вектора состояния; K_{k-1} — матрица регулятора; $K_{k-1} = \boldsymbol{\Phi}$.

Выводы. Разработаны структуры систем контроля работоспособности ПНК. Система контроля текущих параметров ПНК отличается простотой реализации, а по прогнозируемым параметрам ПНК позволяет предотвратить потерю работоспособности ПНК на предварительной стадии с помощью изменения структуры комплекса или коррекции измерительных систем ПНК алгоритмами управления.

Библиографические ссылки

1. **Бабиченко А.В., Орехов М.И., Рогалев А.П.** Основы построения системы комплексной обработки информации в интегрированных комплексах бортового оборудования перспективных многофункциональных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 2. С. 43—49.

2. **Джанджгава Г.И., Рогалев А.П., Бабиченко А.В.** Интегрированная адаптивно-робастная система обработки информации с переменной управляемой структурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 8. С. 73—77.

3. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма построения моделей для коррекции навигационных систем в автономном режиме // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 8. С. 30—38.

4. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Шэнь Кай.** Модификация селективного навигационного комплекса // Наука и современность. 2014. № 29. С. 196—200.

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

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

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

8. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: изд-во МГОУ, 2009. 500 с.

9. **Неусыпин К.А., Логинова И.В.** Вопросы теории и реализации интеллектуальных систем. М.: Сигналъ, МПУ, 1999. 220 с.

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

УДК 629.7.05

В.Д. Елисеев, канд. техн. наук, **А.В. Котельникова,**
В.Б. Чемоданов, канд. техн. наук, **Н.М. Парфёнов,** канд. техн. наук
(Московский авиационный институт, национальный исследовательский университет)
chemvb@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ ОТКЛОНЕНИЯ ШТУРВАЛА И ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

Рассмотрена возможность повышения качества директорного управления динамическим объектом при наличии помех и возмущающих воздействий, существенно усложняющих управление. Эффект повышения качества управления достигается за счёт устранения влияния на показания директорного прибора возмущений, действующих на объект управления, и измерительных шумов датчиков сигналов координат объекта.

Приведён пример формирования директорного управления высотой полёта гипотетического самолёта, в качестве которого может быть дистанционно управляемый беспилотный летательный аппарат (ЛА). Приведены алгоритмы и результаты математического и полунатурного (стендового) моделирования с реальным штурвалом лёгкого самолёта и реальным участием человека-оператора.

Ключевые слова: директорное управление; штурвал; человек-оператор; модель движения объекта; эталонный контур; контур стабилизации; математическое и полунатурное моделирование.

The possibility of improving the quality of the dynamic object directorate control in the presence of interference and disturbing influences significantly complicating control is considered. The effect of improving the control quality is achieved by eliminating the influence on the indications of the director instrument of disturbances acting on the control object and the measuring noises of the object coordinate signal sensors. A formation example of a directorate control for the flight altitude of a hypothetical aircraft, which can be a remotely controlled unmanned aerial vehicle (AV) is given. Algorithms and results of mathematical and semi-detailed (bench) modeling with the real steering wheel of a light airplane and the real participation of the human operator are given.

Keywords: directorate control; steering wheel; human operator; model of object movement; reference loop; stabilization contour; mathematical and semi-detailed modeling.

Введение. Директорное (командное) управление относится к полуавтоматическому управлению, при котором командный сигнал, формируемый вычислителем на основе информации о заданном и текущем состояниях объекта, вызывает пропорциональное отклонение подвижной планки на директорном приборе или марки на экранном индикаторе. Задача человека-оператора в процессе ручного управления объектом состоит в сведении этого отклонения к нулю или заданному значению [1—4].

В авиации директорное управление применяется на ряде этапов полёта, например, при выводе на заданную высоту, полёте по маршруту или заходе на посадку [4]. В качестве директорного прибора используется командно-пилотажный прибор. При аналоговом исполнении этого прибора используются две подвижные планки — горизонтальная и вертикальная. Горизонтальная планка позволяет устранять ошибки продольного движения (по высоте полёта), а вертикальная — бокового. В современных цифровых системах функции указанных планок выполняют горизонтальные и вертикальные линии или другие метки на экране. В дальнейшем для единообразия изложения используется термин «планка».

В работах [5—7] показана возможность повышения качества директорного управления при использовании дополнительной информации об отклонении штурвала или об усилии, прикладываемом к штурвалу человеком-оператором. Эта информация позволяет свести инерционность внутреннего контура практически к инерционности только самого человека-оператора и даёт возможность минимизировать время смещения планки в нулевое положение, чего не было в традиционных системах директорного управления. Вопросы алгоритмического обеспечения процессов полуавтоматического управления беспилотными ЛА и анализ недостатков существующих подходов рассмотрены в работах [8, 9].

Недостатком известных способов директорного управления является сложность управления при наличии возмущений, действующих на объект, а также помех (измерительных шумов) в сигналах датчиков измерений координат объекта, которые приводят к значительным колебаниям и дрожанию планок директорного прибора. Это крайне неприятно для восприятия полезной составляющей человеком-оператором, что приводит к напряжённой работе, неточности управления и вызывает у лётчиков отрицательное отношение к директорному управлению. Фильтрация помех и борьба с возмущениями традиционными методами (установка фильтров) оказывается малоэффективной, так как их инерционность ухудшает динамику контура управления, имеющего в своём составе человека-оператора. Один из возможных путей снижения влияния помех базируется на использовании оценки состояния подвижного объекта, полученной на основе его модели [10].

В связи с отмеченными недостатками традиционных систем директорного управления актуальной является задача уменьшения или устранения влияния возмущений и помех на показания директорного прибора.

Далее обоснована возможность повышения качества директорного управления в условиях наличия возмущений, действующих на объект, а также наличия измерительных шумов в сигналах датчиков измерений координат объекта.

Задача заключается в формировании такой структуры системы директорного управления, в которой сигналы датчиков координат объекта или их оценки не должны непосредственно использоваться в формировании командного сигнала, подаваемого на директорный прибор. Эти сигналы должны быть заменены сигналами, не содержащими помех и тех составляющих координат объекта, которые вызваны внешними возмущающими воздействиями на движение объекта.

Формирование структуры системы директорного управления с использованием эталонной модели. Задача формирования директорного управления без использования сигналов датчиков координат объекта для формирования командного сигнала, подаваемого на директорный прибор, практически означает, что сигналы датчиков необходимо заменить эталонными сигналами модели движения объекта [11], используя её как виртуальный объект управления, не имеющий ни возмущений, ни помех. Получаемое при этом директорное управление эталонной моделью, как виртуальным объектом, будет одновременно представлять собой разомкнутое управление самим объектом, так как отклоняемый человеком-оператором штурвал одновременно должен управлять как объектом, так и моделью.

Чтобы обеспечить замкнутое управление объектом, необходимо формировать разностные сигналы отклонений сигналов координат объекта (или их оценок) от соответствующих эталонных сигналов модели и на их основе формировать сигналы стабилизации координат объекта относительно соответствующих эталонных сигналов модели. Суммировав сигналы стабилизации с сигналами управления объектом от штурвала, отклоняемого человеком-оператором, при приведении планок в заданные положения, получим замкнутую систему директорного управления [12].

Общая схема предлагаемой структуры системы директорного управления показана на рис. 1.

На рис. 1 блоки *3—5* образуют подсистему отслеживания человеком-оператором (ЧО) *4* заданных отклонений $X_з$ штурвала (Ш) *3* по рассогласованию $U_{дп}$, пропорциональному разности $(X_з - X_ш)$, наблюдаемой на директорном приборе (ДП) *5* в виде отклонения планки от нулевого положения.

Коэффициенты усиления входных сигналов вычислителя (В) *2* выбирают из требова-

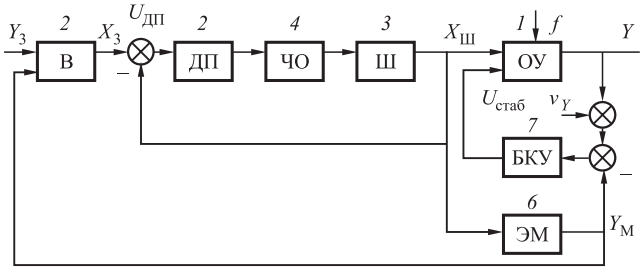


Рис. 1. Общая схема директорного управления с сигналами отклонения штурвала и эталонной модели:

1 — объект управления (ОУ) с исполнительными устройствами или подсистемами; *2* — вычислитель (В) заданных сигналов отклонений штурвала $X_з$; *3* — штурвал (Ш); *4* — человек-оператор (ЧО); *5* — директорный прибор (ДП); *6* — эталонная модель (ЭМ) движения объекта (виртуальный объект); *7* — блок корректирующих устройств (БКУ); $Y_з$ — заданные значения выходной координаты ОУ; Y — вектор координат ОУ; $X_ш$ — отклонения штурвала; $X_з$ — заданные значения отклонений штурвала; $U_{дп}$ — входной сигнал ДП, пропорциональный разности $(X_з - X_ш)$; $U_{стаб}$ — сигнал стабилизации ОУ относительно ЭМ; $Y_м$ — вектор эталонных сигналов координат ЭМ; f — возмущающие воздействия; ν_y — помехи (шумы) измерений координат ОУ

ний к управлению эталонной моделью (ЭМ) *6* как виртуальным объектом.

Указанные устройства *2—5* совместно с ЭМ *6* образуют контур эталонного управления ЭМ, в котором отсутствуют помехи, возмущения и инерционности измерителей, что значительно облегчает работу человека-оператора и позволяет повысить быстродействие и точность директорного управления.

При управлении по ДП отклонения штурвала $X_ш$ осуществляют управление не только моделью, но и самим объектом, однако только по разомкнутому принципу.

Для обеспечения управления объектом по замкнутому принципу (что необходимо из-за помех и возмущений) формируются разностные сигналы отклонений координат объекта от соответствующих координат ЭМ. На основе разностных сигналов с помощью блока корректирующих устройств (БКУ) формируется сигнал стабилизации $U_{стаб}$, который, суммируясь с сигналом отклонения штурвала $X_ш$, обеспечивает стабилизацию координат объекта относительно координат модели как эталонных, создаваемых человеком-оператором при удержании планок ДП в нулевом положении. БКУ выбирают исходя из необходимости обеспечения требуемой динамики и запасов устойчивости системы стабилизации. Принципиально целесообразна также предварительная фильтрация помех датчиков координат объекта, например, с помощью наблюдающих устройств или оптимальных фильтров.

Такое формирование системы директорного управления объектом позволяет исключить попадание помех ν_Y и составляющих координат объекта от возмущающих воздействий f на ДП, фактически обеспечивая для человека-оператора эталонное директорное управление виртуальным объектом (его моделью) без помех и возмущений. Стабилизация возмущённых координат объекта относительно эталонного движения, задаваемого человеком-оператором, осуществляется автоматически за счёт разностных сигналов.

В результате происходит разделение функций человека-оператора и автоматики: человек-оператор задаёт командный (эталонный) вектор требуемого текущего состояния объекта, а автоматика отрабатывает эту команду.

Следует отметить, что в общем случае при включении директорного управления необходимо согласование начальных условий модели и объекта, для чего может быть предусмотрен блок согласования.

Рассмотрим предлагаемый метод на примере формирования системы директорного управления высотой полёта самолёта.

Система директорного управления высотой полёта самолёта. Линеаризованные уравнения продольного движения самолёта (в отклонениях координат от их невозмущённых значений в горизонтальном полёте) при постоянной скорости полёта приближённо запишем в следующем виде:

$$d\omega_z/dt = -2\omega_z - 4{,}25(\alpha_к + \alpha_w) - 5\delta + M_{z\,возм}/J_z; \quad (1)$$

$$d\theta/dt = 0{,}5(\alpha_к + \alpha_w); \quad (2)$$

$$d\alpha_к/dt = \omega_z - d\theta/dt; \quad (3)$$

$$n_y = 0{,}1(\alpha_к + \alpha_w); \quad (4)$$

$$dV_y/dt = 9{,}81 n_y; \quad (5)$$

$$dH/dt = V_y, \quad (6)$$

где ω_z — угловая скорость тангажа; $(\alpha_к + \alpha_w)$ — угол атаки самолёта, $\alpha = \alpha_к + \alpha_w$; α_w — возмущающая составляющая угла атаки от вертикального ветра; $M_{z\,возм}/J_z$ — угловое ускорение самолёта от возмущающего момента, например при выпуске шасси или изменении тяги двигателя; J_z — момент инерции самолёта относительно поперечной оси z; θ — угол наклона траектории; n_y — нормальная перегрузка самолёта; V_y — вертикальная скорость самолёта; H — высота полёта самолёта.

Сформируем систему штурвального управления (СШУ) самолётом с помощью закона отклонения руля высоты:

$$\delta = 1{,}1\omega_z + (8/5)(X_ш + U_{стаб}), \quad (7)$$

предполагая, что датчик угловой скорости и рулевой привод достаточно быстродействующие.

Уравнения (1), (4) и (7) приближённо описывают СШУ, которая является подсистемой в системе директорного управления лётчиком высотой полёта.

На рис. 2 представлена схема моделирования СШУ с учётом возможного возмущающего момента $M_{z\,возм}$, приводящего к соответствующему угловому ускорению $M_{z\,возм}/J_z$, и ветрового воздействия в виде ветровой составляющей угла атаки α_w.

Передаточная функция СШУ от сигналов $X_ш$ или $U_{стаб}$ до перегрузки n_y согласно уравнениям (1), (4) и (7) имеет вид

$$W_{СШУ}(s) = -0{,}8/(s^2 + 8s + 8). \quad (8)$$

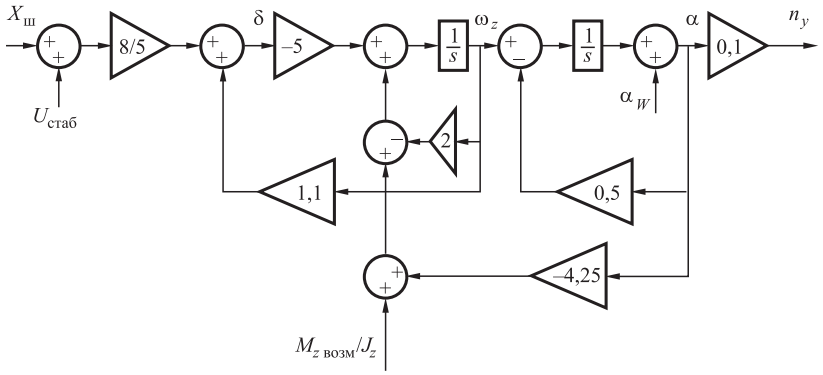


Рис. 2. Схема моделирования СШУ

На рис. 3 в соответствии со схемой (см. рис. 1) представлена предлагаемая конкретизированная схема системы директорного управления высотой полёта, где использованы дополнительно обозначения: $H_з$ — заданное значение высоты полёта самолёта; $H_м$ — эталонный сигнал высоты полёта; $V_{ум}$ — эталонный сигнал вертикальной скорости; $n_{ум}$ — эталонный сигнал нормальной перегрузки; ν_n, ν_v, ν_H — помехи в сигналах координат самолёта; $W_{КУ8}$, $W_{КУ9}$, $W_{КУ10}$ — передаточные функции корректирующих устройств *8—10* БКУ *7* для каждого из разностных сигналов ($n_y - n_{ум}$), ($V_y - V_{ум}$), ($H - H_м$) соответственно; *11* — СШУ; *12* — передаточная функция самолёта от нормальной перегрузки до вертикальной скорости $W_0(s) = V_y(s)/n_y(s) = g/s$ (g — ускорение свободного падения); *13* — передаточная функция самолёта от вертикальной скорости до высоты $W_1(s) = 1/s$; *14* — модель системы штурвального управления (МСШУ); *15*, *16* — блоки ЭМ, аналогичные блокам *12* и *13* ОУ.

На схеме (см. рис. 3) передаточная функция МСШУ *14* принята в упрощённом виде. Для ускорения переходных процессов эталонного контура она принята в виде апериодического звена с небольшой постоянной времени и тем же коэффициентом передачи:

$$W_{МСШУ}(s) = -1/(s + 10).$$

Аналитический расчёт передаточных чисел эталонного контура. Эталонный контур директорного управления моделью движения самолёта (см. рис. 3) содержит две обратные связи по сигналам вертикальной скорости $V_{ум}$ и высоты полёта $H_м$ модели движения самолёта (виртуального объекта). Расчётная схема эталонного контура приведена на рис. 4, *а*.

Расчёт передаточных чисел этого контура проведём приближённо, полагая, что лётчик мгновенно отрабатывает заданное отклоне-

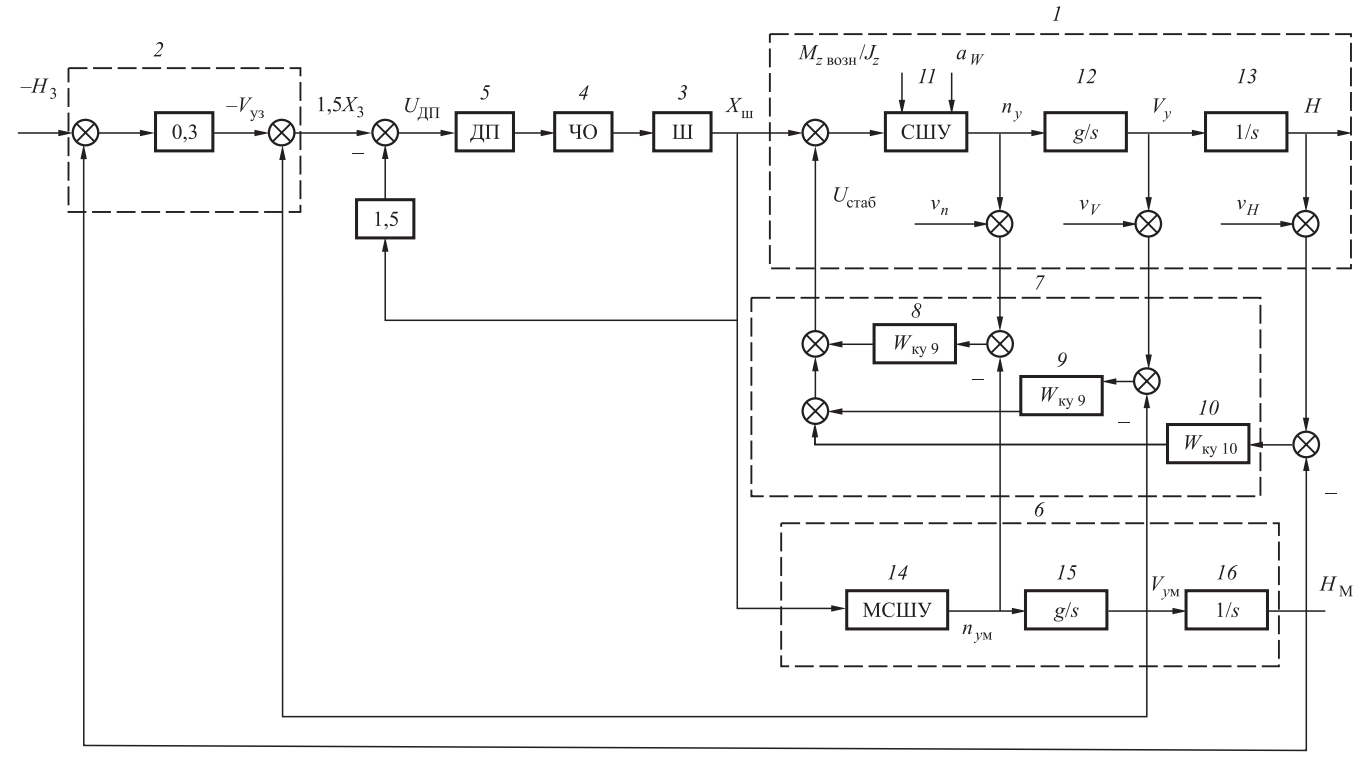


Рис. 3. Схема директорного управления высотой полёта самолёта

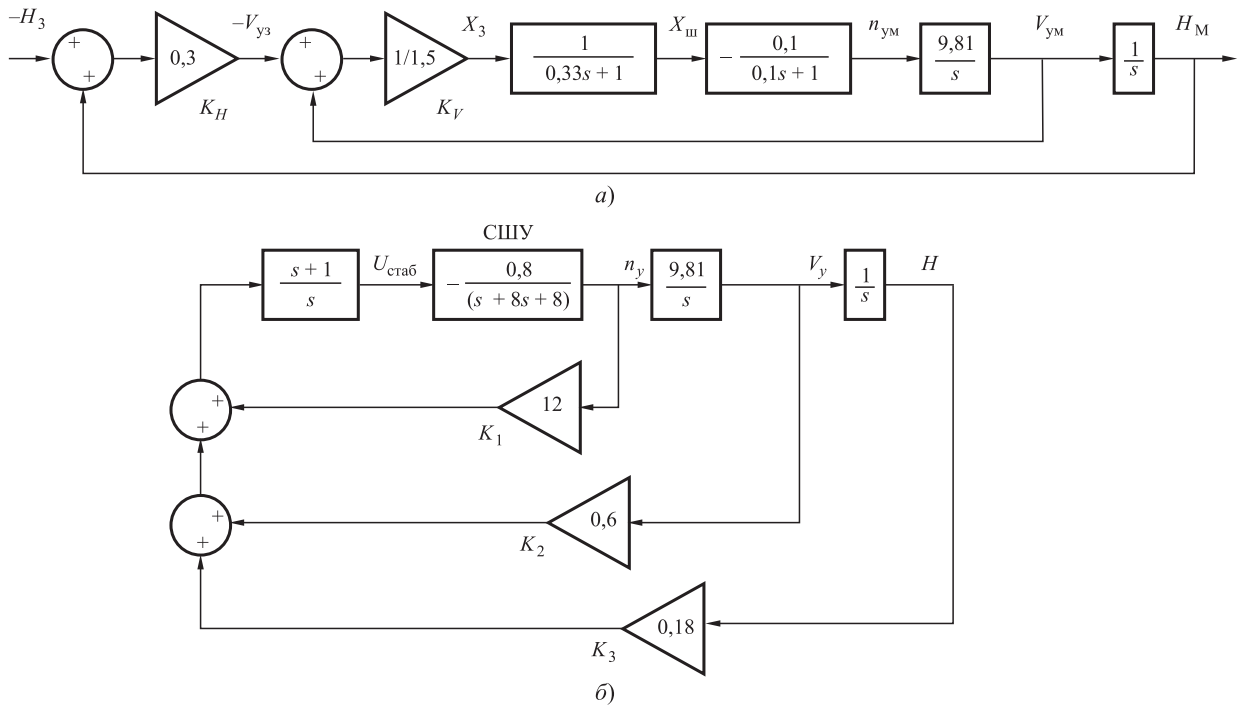


Рис. 4. Расчётные схемы:
а — эталонного контура; *б* — контура стабилизации самолёта относительно эталонного движения

ние штурвала, т.е. $X_ш = X_з$. Реально это не так. Однако быстродействие лётчика достаточно высоко в рамках траекторного управления самолётом. В частности, отработка ступенчатого сигнала $X_з$ человеком-оператором со штурвалом лёгкого самолёта происходит приближённо за 1 с [13], что соответствует апериодическому звену (см. рис. 4, *а*) $W(s) = 1/(0{,}33s + 1)$, приближённо аппроксимирующему контур отслеживания требуемых отклонений штурвала $X_з$. Допустимость такой аппроксимации возможна по результатам сравнения математического и полунатурного моделирования с участием человека-оператора.

Кроме того, принятая МСШУ в эталонном контуре практически безынерционна, что позволяет записать приближённое характеристическое уравнение эталонного контура в виде

$$\lambda^2 + K_V\lambda + K_V K_H = 0,$$

где K_H — коэффициент усиления разности ($H_з - H_м$); K_V — коэффициент усиления разности ($V_y - V_{ум}$).

Данному уравнению, как для колебательного звена, соответствуют следующие выражения:

$$K_v = 2\xi\omega;\ K_v K_н = \omega^2. \qquad (9)$$

Многократное полунатурное моделирование с участием нескольких операторов позволило определить минимальное время переходного процесса эталонного контура: $t_{п.п} = 7$ с. Тогда при перерегулировании $\sigma = 3$ % получим $\omega = 0{,}45$, $\xi = 0{,}74$ и значения передаточных чисел:

$$K_v = 0{,}666 = 1/1{,}5,\ K_v K_н = 0{,}2,\ K_н = 0{,}3.$$

Аналитический расчёт корректирующих устройств контура стабилизации самолёта относительно эталонной модели. Расчёт передаточных функций корректирующих устройств блока *7* (см. рис. 3) для получения сигнала стабилизации $U_{стаб}$ проведём на основе схемы (рис. 4, *б*). Контур стабилизации определяет устойчивость и динамику системы стабилизации движения самолёта относительно эталонного движения.

На рис. 4, *б* интегрирующее звено в корректирующем устройстве $(s + a)/s$ введено для получения астатизма по отношению к возмущающему моменту $M_{z\ возм}$, а форсирующее звено — для ускорения переходного процесса астатического контура перегрузки с коэффициентом обратной связи k_1.

Свободный член форсирующего звена выберем близким к модулю наибольшего корня характеристического уравнения системы штурвального управления:

$$\lambda^2 + 8\lambda + 8 = 0$$

или

$$(\lambda + 1{,}17)(\lambda + 6{,}83) = 0. \qquad (10)$$

Корень этого уравнения равен −1,17, поэтому приближённо примем $a = 1$.

Расчёт передаточных чисел всех контуров схемы (см. рис. 4, *б*) проведём последовательно, начиная с внутреннего контура, с изменяющимися требованиями к частотам среза. Для внутреннего перегрузочного контура частоту среза возьмём примерно в 5 раз меньше ближайшей сопрягающей частоты, для среднего контура вертикальной скорости — в 4 раза меньше и для внешнего контура высоты — в 3 раза меньше ближайшей сопрягающей частоты. Такой выбор целесообразен в связи с возможными разбросами динамических коэффициентов самолёта, находящихся во внутреннем контуре, где требуются большие запасы устойчивости.

Получим выражение для нахождения требуемого значения коэффициента k_1 и его приближённое значение:

$$(0{,}8/6{,}83)k_1 = 6{,}83/5 \text{ и } k_1 = 12.$$

Передаточная функция замкнутого контура перегрузки

$$W_{пз}(s) = -0{,}8/(s^2 + 6{,}83s + 9{,}6) = \\ = -0{,}8/[(s + 1{,}98)(s + 4{,}85)].$$

Передаточная функция разомкнутого контура по вертикальной скорости V_y с коэффициентом k_2 имеет вид

$$W_{Vур}(s) = -9{,}8k_2 0{,}8/[(s + 1{,}98)(s + 4{,}85)]s = \\ = -7{,}84k_2/[(s + 1{,}98)(s + 4{,}85)]s.$$

Так как частота среза должна быть 1,98/4, то коэффициент

$$k_2 = [(1{,}98)(4{,}85)/7{,}84)](1{,}98/4) = 0{,}6.$$

Передаточная функция разомкнутого внешнего контура управления по высоте с коэффициентом k_3 имеет вид

$$W_{Hр}(s) = -7{,}84k_3/(s^3 + 6{,}83s^2 + 9{,}6s + 4{,}7)s = \\ = -7{,}84k_3/[(s^2 + 1{,}69s + 0{,}91)(s + 5{,}14)]s.$$

При частоте среза в этом контуре в 3 раза меньше ближайшей сопрягающей частоты, равной 0,95, получим значение коэффициента k_3:

$$k_3 = (4{,}7/7{,}84)0{,}3 = 0{,}18.$$

В результате передаточные функции корректирующих устройств блока *7* будут иметь вид

$$W_{КУ8}(s) = (12s + 12)/s;$$

$$W_{КУ9}(s) = 0{,}6\ (s + 1)/s;$$

$$W_{КУ10}(s) = 0{,}18\ (s + 1)/s.$$

Входной сигнал ДП согласно схеме на рис. 3 составит

$$U_{дп} = 0{,}3(H_м - H_з) + V_{ум} - 1{,}5\ X_ш$$

или

$$U_{дп} = 1{,}5(X_з - X_ш),$$

где $1{,}5X_з = 0{,}3(H_м - H_з) + V_{ум}$.

Достоинствами приведённых методик расчёта эталонного контура и контура стабилизации являются приведённые предварительные рекомендации по расчёту параметров алгоритмов управления, обеспечивающих высокое динамическое качество директорного управления. Эти рекомендации, как предварительные, могут быть пригодны для различных режимов полёта и различных ЛА.

Математическое и полунатурное моделирование директорного управления высотой полёта самолёта. Математическое моделирование сформированной системы директорного управления высотой полёта самолёта было проведено согласно схеме моделирования, представленной на рис. 5.

Данная схема моделирования практически совпадает со схемой, приведённой на рис. 3. В ней конкретизировано: МСШУ в виде звена с передаточной функцией $-1/(s + 10)$; блок СШУ с входами $X_ш$ и $U_{стаб}$ и выходом n_y; блок *Subsystem* содержит интегрирующее звено $2/s$ с входом $U_{ДП}$, которое приближённо представляет общую передаточную функцию директорного прибора, лётчика, штурвала и вместе с обратной связью с коэффициентом 1,5 даёт передаточную от $X_з$ до $X_ш$, равную $1/(0{,}33s + 1)$; заданные случайные значения высоты полёта поступают с блока генерации случайных чисел с периодом 30 с.

Математическое и полунатурное моделирование позволили несколько скорректировать передаточную функцию $W_{КУ8}(s)$ перегрузочного контура, которая в скорректированном виде показана на рис. 5, так как переходные процессы оказались несколько лучше, а пере-

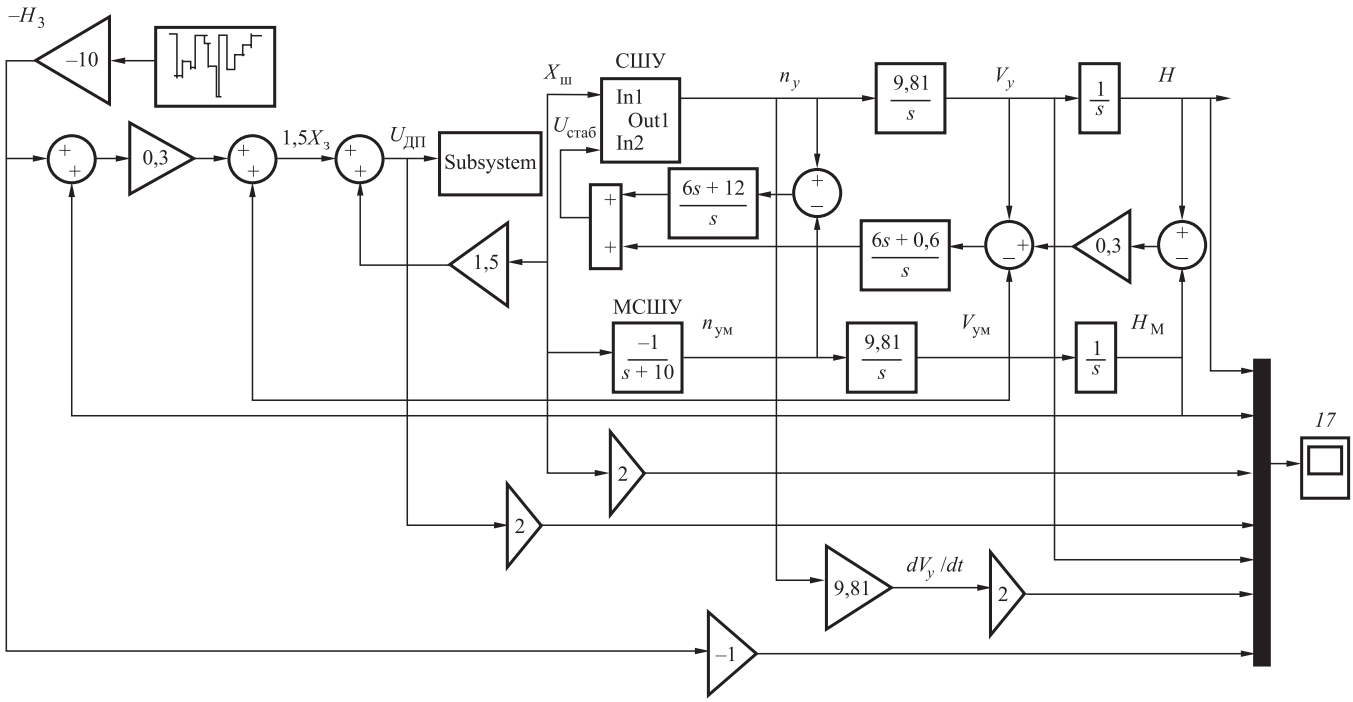


Рис. 5. Схема математического моделирования системы директорного управления высотой полёта самолёта

даточное число в самом внутреннем контуре в 2 раза меньше.

На рис. 6 представлены переходные процессы, полученные в результате математического моделирования директорного управления высотой полёта самолёта в соответствии со схемой на рис. 5. Графики переходных процессов показывают изменения приращений основных координат самолёта: высоты H, модельной высоты $H_м$, вертикальной скорости V_y, вертикального ускорения $gn_y = dV_y/dt$, отклонения штурвала $X_ш$, входного сигнала ДП $U_{ДП}$ при случайных скачкообразных приращениях заданной высоты полёта, а также при возникновении ступенчатого возмущающего

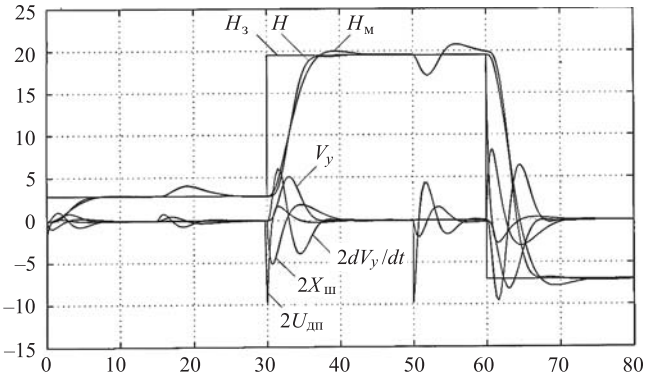


Рис. 6. Переходные процессы математического моделирования директорного управления высотой полёта самолёта

углового ускорения $M_{z\ возм}/J_z$ = 8 град./с^2 на 15-й секунде и ступенчатого ветрового воздействия с α_w = 5 град. на 50-й секунде.

Полунатурное моделирование состояло в том, что сигнал $U_{ДП}$ поступал на монитор, на котором имитировалась планка ДП, которую человек-оператор приводил в нулевое положение отклонением штурвала. Цифровой сигнал датчика отклонения штурвала поступал в ПК, где моделировалось движение самолёта и его модели (виртуального объекта) и формировался входной сигнал ДП. В целом использовалось два монитора и два ПК для моделирования и записи переходных процессов и имитации ДП.

На рис. 7 представлены переходные процессы полунатурного (стендового) моделирования директорного управления высотой полёта с реальным штурвалом лёгкого самолёта и реальным участием человека-оператора в соответствии со схемами на рис. 3 и 5. На рис. 5 подсистема *Subsystem* представляла имитатор ДП, реального ЧО и реальный Ш.

Графики на рис. 6 и 7 показывают изменения тех же координат: H, $H_м$, V_y, $gn_y = dV_y/dt$, $X_ш$, $U_{ДП}$ при тех же скачкообразных приращениях заданной высоты полёта, а также при возникновении возмущающего углового ускорения $M_{z\ возм}/J_z$ = 8 град./с^2 на 15-й секунде и ветрового воздействия с α_w = 5 град. на 50-й секунде эксперимента.

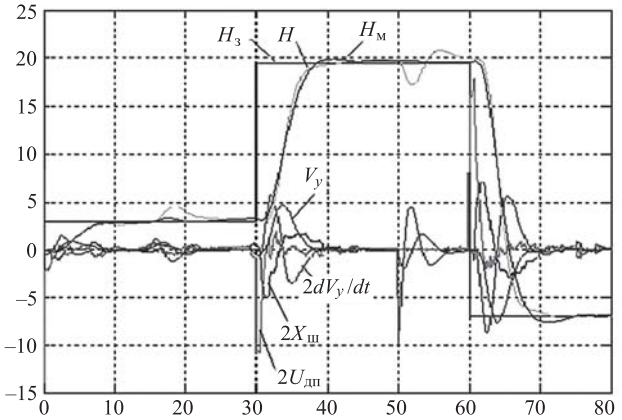


Рис. 7. Переходные процессы полунатурного моделирования директорного управления высотой полёта самолёта

Графики переходных процессов математического и полунатурного моделирования показывают их значительное сходство. При математическом моделировании переходные процессы протекают несколько быстрее, чем при полунатурном. Это связано с приближённым моделированием человека-оператора, в частности, без учёта его запаздывания в реакции на неожиданно возникающие случайные скачки планки ДП, связанные со скачками заданной высоты полёта.

Математическое и полунатурное моделирования показывают, что возмущающие воздействия не влияют на сигнал $U_{дп}$ и, соответственно, на поведение планки ДП, что облегчает человеку-оператору (лётчику) директорное управление и позволяет получать быстрые переходные процессы длительностью менее 10 с.

Аналогично помехи датчиков нормальных перегрузок, вертикальной скорости и высоты также не влияют на поведение планки ДП, так как эти сигналы не используются при формировании вычислителем сигнала $U_{дп}$. При этом существенно повышаются быстродействие, точность и лёгкость управления для человека-оператора, так как устраняется вредное влияние помех и возмущений на качество директорного управления. Полунатурные эксперименты также показывают, что получаемые процессы директорного управления мало зависят от конкретного человека-оператора, что связано с лёгкостью отработки заданных отклонений штурвала вследствие использования сигнала отклонения штурвала для формирования ошибки его отклонения.

Выводы. Приведённый метод формирования директорного управления с использованием сигналов отклонений штурвала и эталонных сигналов координат модели движения объекта (виртуального объекта) показывает возможность существенного повышения быстродействия, точности управления и облегчения действий человека-оператора (лётчика) при наличии возмущений, действующих на объект, и наличии помех в сигналах датчиков координат объекта.

Следует отметить возможность применения этого метода для ручного управления по приборам при выдерживании заданного значения соответствующей координаты объекта.

Стендовые исследования процессов директорного управления несколькими операторами с различной степенью подготовки подтверждают эффективность предложенного метода к построению системы директорного управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания по проекту № 813 2014.

Библиографические ссылки

1. **Красовский А.А.** Системы автоматического управления полётом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 560 с.

2. **Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чикулаев М.С.** Системы автоматической посадки. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.

3. **Практическая** аэродинамика маневренных самолётов. Учебник для лётного состава / Под общ. ред. Н.М. Лысенко. М.: Воениздат, 1977. 439 с.

4. **Сильвестров М.М., Бегичев Ю.И., Варочко А.Г., Козиоров Л.М., Луканичев В.Ю., Наумов А.И., Чернышов В.А.** Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов / Под ред. М.М. Сильвестрова. М.: Филиал Воениздата, 2007. 510 с.

5. **Елисеев В.Д., Похваленский В.Л., Клюев Е.Д.** О способах директорного управления динамическим объектом // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Тр. XVIII Междунар. научн.-техн. семинара. Алушта. 2009. 14—20 сент. 306 с.

6. **Елисеев В.Д., Клюев Е.Д.** Директорное управление продольным движением самолёта с астатической системой управления нормальной перегрузкой // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Тр. XIX Междунар. научн.-техн. семинара. Алушта. 2010. 14—20 сент. 320 с.

7. **Елисеев В.Д., Клюев Е.Д., Петрин К.В., Теряев Е.Д.** Повышение качества директорного управления динамическим объектом // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 14—18.

8. **Bondarets A.** Investigation on the Alternative Way of Aircraft Flight Semi-Automatic Control; 2-nd IFAC Workshop on Recearch, Education and Development of Unmanned Aerial Systems: 2013.V. 2; part 1; pp. 112—119.

9. **Бондарец А.Я.** Полуавтоматическое командное управление полётом самолёта как альтернатива директорной системе. Т. 9. М.: Научтехиздат, 2010. С. 41—51.

10. **Pearson J.T., Goodall R.M., Eastham M.** Aircraft air data estimation using a model-based approach Automatic Control in Aerospace. 17-th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, 2013. V. 17, part 1, pp. 557—562.

11. **Елисеев В.Д., Комаров А.К.** Модально-инвариантные системы управления. М.: Изд-во МАИ, 1983. 69 с.

12. **Елисеев В.Д., Клюев Е.Д., Котельникова А.В., Петрин К.В., Теряев Е.Д.** Способ формирования деректорного управления по эталонным сигналам модели объекта // Патент России № 2454693. 2012. Бюл. № 18.

13. **Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Теряев Е.Д., Якубович М.М.** Разработка и исследование модели действий лётчика при позиционировании ручки управления самолётом // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2004. № 5. 77 с.

УДК 620.179.12

Б.Н. Стихановский, д-р техн. наук, проф., **Е.С. Чернова**
(Омский автобронетанковый инженерный институт)

ilineilli@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА УДАРНОЙ СКОРОСТИ В МАШИНАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрена конструкция датчика ударной скорости в машинах ударного действия. Датчик разработан для машин ударного действия и испытан в лаборатории по сертификации пластмассовых изделий и контролю качества соединений предприятия ОАО «Запсибгазпром» (г. Омск). На основании полученных испытаний построены графики зависимости скорости удара от напряжения, рассчитана абсолютная погрешность датчика и сделан вывод о целесообразности его применения в машинах ударного действия.

Ключевые слова: датчик ударной скорости; скорость удара; ударное действие; боёк; упругое взаимодействие.

The design of the shock velocity sensor in impact machines is considered. The sensor is designed for impact machines and tested in the laboratory for the certification of plastic products and quality control of joints of enterprise OJSC «Zapsibgazprom» (Omsk). On the basis of the obtained tests, the dependence diagram of the shock velocity from the voltage is plotted, the absolute error of the sensor is calculated, and a conclusion is made about its application expediency in impact machines.

Keywords: shock velocity sensor; speed of impact; shock action; fighting; elastic interaction.

Машины и механизмы ударного действия, известные в настоящее время, широко используются для контроля веществ и материалов при дефектоскопии. При исследовании материалов с применением машин ударного действия одним из важнейших параметров является величина скорости удара бойка по испытуемому образцу. Зная данный параметр, можно судить о силе удара, на основании которой анализируются механические свойства материалов. В качестве средств измерений параметров удара можно использовать датчики ударных скоростей.

Анализ известных средств контроля параметров удара показывает, что предпочтительными к применению для машин и механизмов ударного действия являются индукционные датчики, имеющие магнитную систему с цилиндрическим магнитопроводом, так как это гарантирует высокую однородность поля в рабочем зазоре и помехозащищённость датчика от внешних переменных полей за счёт естественного экранирования измерительной обмотки [1].

Ближайшие аналоги датчиков ударных скоростей имели существенные недостатки, выражающиеся, например, в кабельном эффекте и смещении витков катушки; элементы конструкции были спроектированы нерационально, что приводило к ударным перегрузкам [2]; при небольших амплитудах вследствие удара сигнал мог отсутствовать [3]; возникали

сложности с расположением датчиков, если в корпусе устройства размещался боёк. В связи с этим основными целями исследования являлись разработка конструкции датчика ударной скорости, лишённой указанных выше недостатков, обеспечивающей высокое качество сигнала, стабильность и повторяемость результатов, а также эксперимент по определению параметров удара с использованием датчика.

На рис. 1 представлена конструкция датчика ударной скорости, позволяющего определять скорости и энергию деталей машин при ударах [4].

Отличие представленной на рис. 1 конструкции от ближайших аналогов заключается в том, что крышка упирается в неподвижный корпус, внутри которого расположен шток с возможностью перемещения через отверстия в крышке с верхней стороны и в корпусе с нижней стороны. На штоке жёстко закреплена консоль, перемещающаяся вместе с ним через сквозной паз в крышке. Также в крышке закреплены электромагнитная катушка и кольцеобразный магнит.

Устройство состоит из крышки, корпуса, внутри которых соосно расположены шток, электромагнитная катушка с обмоткой и кольцеобразным магнитом; через отверстие в крышке и корпусе выполнен изолированный провод, протянутый к регистрирующему прибору; в штоке закреплена консоль, шток подпружинен упругим элементом. Консоль свободным концом входит в паз испытуемой машины ударного действия [4].

Машина ударного действия, на которой закрепляется датчик, имеет боёк, который ударяет по консоли датчика. При ударе за счёт

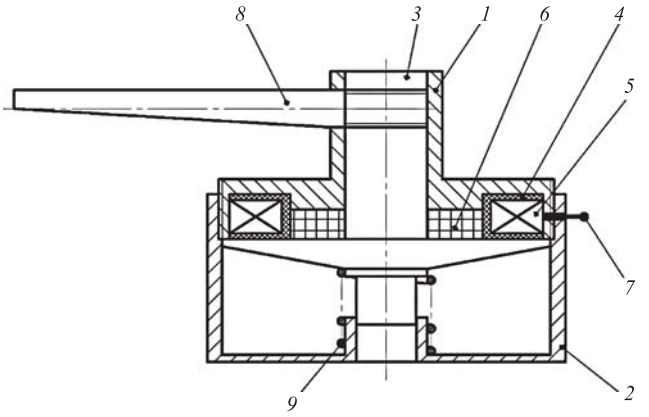


Рис. 1. Датчик ударной скорости машин:
1 — крышка; *2* — корпус; *3* — шток; *4* — катушка; *5* — обмотка катушки; *6* — кольцеобразный магнит; *7* — регистрирующий прибор; *8* — консоль; *9* — упругий элемент

движения при отделении тарелки штока происходит разрыв магнитопровода. При этом скачкообразное изменение магнитного потока пропорционально скорости удара. Кольцеобразный магнит и катушка с обмоткой остаются в состоянии покоя за счёт корпуса при отскоке штока. Упругий элемент внутри корпуса устройства практически сразу же возвращает систему в исходное состояние. В момент отрыва тарелки штока от крышки возникает сигнал, который пропорционален скорости отрыва. Этот сигнал регистрируется подключенным к датчику прибором.

При движении штока сила трения скольжения при соприкосновении с отверстием днища корпуса уменьшается за счёт размещения на максимально дальние расстояния опорных реакций. Крышка датчика ударной скорости с кольцеобразным магнитом и катушкой закреплена неподвижно, а следовательно, разрыв магнитопровода происходит и при очень малых ударных импульсах.

Тарировка датчика проводилась на вертикальном ударном стенде. В нижней части стенда закреплён держатель, в который вставлен боёк с ножом, удерживающийся в начальном положении системой фиксации. Датчик ударной скорости закреплён в нижней части стенда таким образом, чтобы боёк при падении попадал на консоль датчика. Второй боёк поднимается на заданную высоту, после чего свободно сбрасывается, ударяя по находящемуся в состоянии покоя бойку в держателе. После удара срабатывает система фиксации, и боёк с ножом ударяет по консоли датчика. Величина напряжения при ударе фиксируется регистрирующим прибором.

В качестве свободно падающего бойка использовался стальной боёк массой 5 кг. Высоты, с которых сбрасывался боек, составили 0,5 и 1,0 м. Величина напряжения фиксировалась аналоговым осциллографом мод. С1-68.

При ударе бойка по консоли в катушке датчика возникает ЭДС, которая пропорциональна скорости отскока бойка. Таким образом, по результатам серии испытаний было определено расчётное значение скорости удара бойка для высоты 0,5 и 1,0 м, на основании которого вычислен коэффициент преобразования прибора. Используя коэффициент преобразования прибора, можно рассчитать скорость удара бойка для всех напряжений в серии.

На основании полученных испытаний были построены графики зависимости величины скорости удара от напряжения: высота

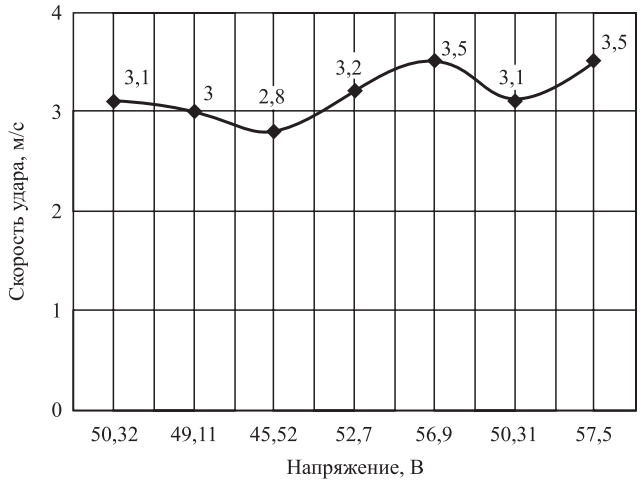


Рис. 2. График зависимости величины скорости удара от напряжения (постоянная высота 0,5 м)

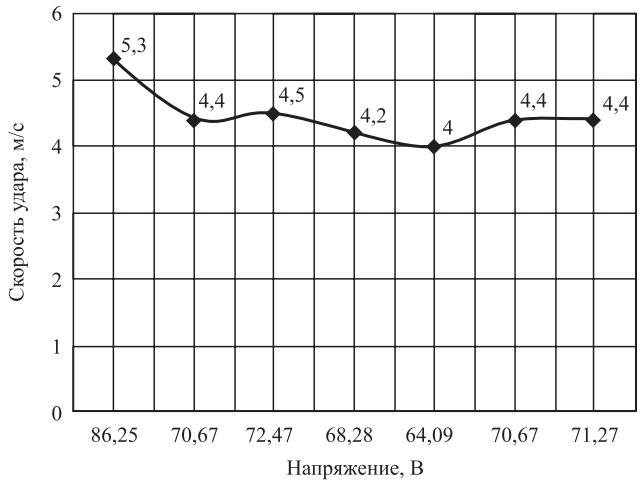


Рис. 3. График зависимости величины скорости удара от напряжения (постоянная высота 1,0 м)

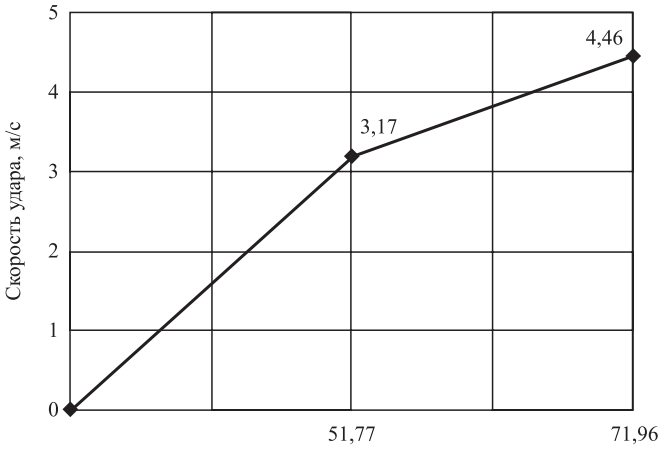


Рис. 4. Итоговая зависимость величины скорости удара от напряжения по двум сериям измерений

0,5 м (рис. 2), высота 1,0 м (рис. 3), суммарный график по сериям измерений (рис. 4).

Скорость удара рассчитывается по формуле

$$v = \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; H — высота сброса бойка.

Коэффициент преобразования прибора определяется по формуле

$$k = v/E, \quad (2)$$

где E — среднее значение напряжений в серии.

Используя коэффициент преобразования прибора, можно рассчитать скорость удара по каждому напряжению в серии испытаний:

$$v = kU_i, \quad (3)$$

где U_i — величина напряжения в серии испытаний.

Таким образом, при высоте 0,5 м расчётное значение скорости удара $v_р$ = 3,15 м/с, а среднее значение скорости удара при коэффициенте преобразования прибора Δv = 3,2 м/с.

При высоте 1,0 м расчётное значение скорости удара $v_р$ = 4,43 м/с, а среднее значение скорости удара при коэффициенте преобразования прибора Δv = 4,6 м/с.

На основании полученных данных была рассчитана абсолютная погрешность датчика: в первой серии измерений с высоты сброса бойка 0,5 м Δ = 1,6 %, во второй серии измерений с высоты сброса бойка 1,0 м Δ = 3,8 %. Принимая во внимание максимально допустимую погрешность для испытательного стенда, равную 10 %, был сделан вывод о том, что датчик ударной скорости машин выполняет функции по определению параметров удара и может быть использован в машинах ударного действия.

Библиографические ссылки

1. **Стихановский Б.Н., Байбарацкая М.Ю., Чернова Е.С.** Ударные явления в технологических процессах: монография / Б.Н. Стихановский, М.Ю. Байбарацкая, Е.С. Чернова. Омск: изд-во ОАБИИ, 2015. 241 с.

2. **Стихановский Б.Н.** Индукционный датчик ударной скорости машин // Патент России № 2110072. 1998. Бюл. № 12.

3. **Стихановский Б.Н., Пастухова Е.И.** Датчик ударной скорости машин // Патент России № 46104. 2005.

4. **Стихановский Б.Н., Чернова Е.С.** Датчик ударной скорости машин // Патент России № 161298. 2016.

УДК 004.031.42

М.С. Тимофеева, канд. экон. наук, доц., **Д.В. Глазунов,** канд. техн. наук, **Г.С. Мизюков**
(Ростовский государственный университет путей сообщения)

mara1512@yandex.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКОВ

Рассмотрены технологии независимой оценки качества подготовки выпускников, описаны процедура и механизм оценки уровня подготовки бакалавров, а также алгоритм отбора дисциплин и формирования комплекта заданий. Рассмотрены результаты независимой внешней оценки качества подготовки выпускников образовательных организаций в сравнении с другими образовательными организациями, принявшими участие в ФИЭБ. Определено, что система внутреннего мониторинга и оценки качества высшего образования даёт образовательной организации мощный инструмент, который позволяет руководству убедиться в том, что различные структурные подразделения придерживаются общих поставленных целей и задач национальной безопасности в области науки, технологий и образования, принимая решения по распределению ресурсов на стратегическом уровне.

Ключевые слова: технология ФИЭБ; технология ЦМКО; система внутреннего мониторинга; оценка качества высшего образования; вид профессиональной деятельности; уровень сформированности профессиональных компетенций; алгоритм отбора дисциплин; кейсовые задания.

The technologies of the quality independent assessment of graduates' training are considered. The procedure and mechanism for assessing the level of bachelor's training, as well as the algorithm for selecting disciplines and forming a set of tasks are described. The results of an independent external evaluation of the educational organizations training graduates quality in comparison with other educational organizations that took part in the Federal internet exam for bachelor's graduates (FIEB) are considered. It is determined that the system of internal monitoring and evaluation of the higher education quality gives the educational organization a powerful tool that allows management to verify that the various structural units adhere to the common assigned tasks and objectives of national security in science area, technology and education, making decisions over the resources distribution on strategic level.

Keywords: FIEB technology; Center for Monitoring the Quality of Education (CMQE); technology; internal monitoring system; quality assessment of higher education; type of professional activity; level of professional competence formation; algorithm for disciplines selection; case task.

Перед образовательными организациями железнодорожной отрасли стоит насущная задача на фоне новых угроз национальной безопасности, имеющих комплексный взаимосвязанный характер, осуществлять качественную подготовку обучающихся с учётом базовых ценностей, встроенных в современные модели образовательных услуг. Система государственного заказа на подготовку высококвалифицированных специалистов в рамках целевой подготовки для ОАО РЖД без системы мониторинга качества образования не позволила бы создать эффективный механизм интеграции науки, образования и промышленности для системных исследований в интересах решения стратегических задач транспортной безопасности, а также сформировать научно-технические заделы на перспективу в области высоких технологий (робототехника, информационные и коммуникационные, когнитивные технологии, нанотехнологии и др.) [1].

Гарантом качества предоставления образовательных услуг, ориентированного на потребителя, заинтересованного в получении высококвалифицированных молодых выпускников для транспортной отрасли, в Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) более 10 лет является независимое структурное подразделение «Центр мониторинга качества образования» (ЦМКО), которое разрабатывает и использует методики, средства и технологии контроля уровня подготовки обучающихся [2, 3]. В целях подтверждения эффективности использо-

вания технологии ЦМКО в рамках текущего контроля, промежуточной аттестации и фиксации результатов освоения программ бакалавриата, а также повышения имиджа РГУПС стал базовой площадкой Южного федерального округа в рамках проекта «Федеральный Интернет-экзамен для выпускников бакалавриата» (ФИЭБ), разработанного НИИ мониторинга качества образования (г. Йошкар-Ола) [4], что позволило провести сравнительный анализ результатов освоения обучающимися основных профессиональных образовательных программ высшего образования.

В 2015 г. в РГУПС состоялся первый массовый выпуск бакалавров, обучающихся по направлениям подготовки в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО): 040400.62 «Социальная работа», 43.03.02 «Туризм», 43.03.01 «Сервис», 38.03.03 «Управление персоналом», 034700.62 «Документоведение и архивоведение», 21.03.02 «Землеустройство и кадастры», 08.03.01 «Строительство», 38.03.02 «Менеджмент», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 40.03.01 «Юриспруденция», 38.03.02 «Экономика», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 15.03.03 «Прикладная механика», 23.05.04 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов». Согласно ФГОС ВО по направлению подготовки обучающийся готовится к решению профессиональных задач по виду профессиональной деятельности, за которым закреплён перечень профессиональных компетенций [3].

Сравнительный анализ эффективности данных методов оценки результатов освоения основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) обучающимися на соответствие требованиям ФГОС ВО и их готовности к решению профессиональных задач и уровня сформированности профессиональных компетенций представлен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ критериев и технологии оценки качества подготовки обучающихся ФИЭБ и ЦМКО

Наименование	ФИЭБ	ЦМКО
Критерии оценки качества подготовки обучающихся		
Основная цель	Получение информации о поведенческих реакциях (компетенциях)	
Задачи	Оценить эффективность освоения программ обучения в образовательных организациях России по направлениям подготовки	Оценить эффективность освоения программ обучения в РГУПС по направлениям подготовки
Дополнительные задачи	Открытая обратная информация, формирование мотивации к саморазвитию	Возможность получить двойной результат, оценку и рекомендации по развитию компетенций одновременно
Инструменты	Компьютерное дистанционное тестирование	Компьютерное тестирование
Процедуры	Индикаторы компетенций (шкала ранжирования)	Индикаторы компетенций (шкала абсолютная)
Что оценивается	Выполнение тестовых, кейсовых заданий	
Ресурсы	Автоматизированная программа оценки. Педагогические измерительные материалы (ПИМ)	Подсистема «Тестирование». Фонды оценочных средств (ФОС) (РГУПС), психодиагностическая методика «Профкарьера», (Центр тестирования и развития МГУ «Гуманитарные технологии»)
Технология оценки качества подготовки обучающихся		
Часть 1	Полидисциплинарное тестирование (обучающимся выбирается не менее четырёх дисциплин профессионального цикла). ПолиПИМ включает задания, проверяющие знания по дисциплине, и умения пользоваться ими при решении стандартных, типовых задач	Полидисциплинарное тестирование состоит из междисциплинарного комплекса, включающего четыре дисциплины общекультурного цикла, и трёх дисциплин общепрофессионального и профессионального циклов в соответствии с программой экзамена по направлению подготовки

Окончание табл. 1

Наименование	ФИЭБ	ЦМКО
Часть 2	ПИМ включает междисциплинарные кейс-задания, содержащие описание квазиреальных профессиональных ситуаций и подзадач к ним. Кейс-задания проверяют способности обучающегося анализировать, обобщать, систематизировать и структурировать основную и дополнительную к кейсу информацию, устанавливать причинно-следственные связи и зависимости между выявленными проблемами, осуществлять поиск и использовать эффективные средства, технику, методы для их решения	ПолиПИМ состоит из заданий, проверяющих знания по дисциплине и умения пользоваться ими при решении стандартных, типовых задач. Выполнение обучающимся кейс-задания свидетельствует о готовности решать профессиональные задачи по виду профессиональной деятельности. «Профкарьера» позволяет проводить комплексное тестирование и оценку, выявляя потенциал и ведущую направленность человека в профессиональной сфере
Баллы	Максимальное количество баллов за правильное выполнение подзадачи кейса устанавливается с учётом его сложности. Правильно выполненные кейс-задания части 2 ПИМ составляют 70 баллов (60 баллов)	Процент правильно отвеченных тестовых и кейсовых заданий междисциплинарного экзамена. Порог для аттестации устанавливается руководством университета (40 % правильно отвеченных заданий)
Результат	Оцениваются результаты освоения ОПОП обучающегося на соответствие требованиям ФГОС	
	Готовность к решению профессиональных задач и уровень форсированности профессиональных компетенций	

Технология ФИЭБ по сравнению с технологией ЦМКО строится на эффективном использовании полиПИМ, разработанных ведущими специалистами из профессиональных областей деятельности, и имеет многоуровневую структуру педагогического анализа результатов обучающихся об уровне сформированности компетенций и их готовности к решению профессиональных задач. Технология ЦМКО — это образовательный продукт, который может адаптироваться в условиях конкретной образовательной организации для поддержания эффективного образовательного процесса в рамках отраслевого обучения, например транспортной отрасли. Таким образом, представленные технологии могут легко использоваться и взаимно дополняться при условии, если они чётко сосредоточены в своих нишах образовательного пространства.

Алгоритм отбора дисциплин и формирования комплекта заданий части 1 ПИМ экзаменационного билета представлен на рис. 1.

РГУПС являлся базовой площадкой для организации и проведения ФИЭБ. РГУПС организовал участие в проведении ФИЭБ для 47 выпускников бакалавриата, обучающихся по 6 направлениям подготовки, реализующимся в Южном федеральном университете, РГУПС и Ростовском социально-экономическом институте. Данные участники планиро-

Рис. 1. Алгоритм отбора дисциплин и формирования комплекта заданий части 1 ПИМ экзаменационного билета

вали продолжить своё обучение и повысить уровень образования по направлениям подготовки магистратуры.

Рассмотрим результаты освоения ОПОП выпускниками РГУПС, принявшими участие в ФИЭБ на соответствие требованиям ФГОС ВПО направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» в сравнении с другими образовательными организациями, а также принявшими участие в независимой внешней оценке по данному направлению подготовки. Для прохождения первой части ФИЭБ выпускники РГУПС выбрали следующий перечень дисциплин: Базы данных; Безопасность жизнедеятельности; Программирование; ЭВМ и периферийные устройства. Результаты решения кейс-заданий выпускников РГУПС и участников ФИЭБ представлены на рис. 2.

Под кейсовыми заданиями будем понимать профессионально ориентированные задания, описывающие конкретную проблему, максимально приближенную к реальной ситуации, которая потребует от обучающегося применения полученных знаний и навыков в период его обучения. Данные задания сгруппированы таким образом, что результат решения текущего задания необходим для правильного решения следующего задания. Таким образом, кейсовые задания представляют собой сложную многоуровневую структуру решения и оценки. Рассматривая результаты решения кейс-заданий выпускниками РГУПС и участниками по различным видам профессиональной деятельности, можно заключить, что процент баллов, набранных за выполнение кейс-заданий выпускниками РГУПС, выше по сравнению с другими участниками по проектно-технологической (на 12 %), монтажно-наладочной (на 14 %) и сервисно-эксплуатационной (на 22 %) специальностям. Это связано, прежде всего, с квалификацией профессорско-преподавательского состава, а также систематическим текущим контролем и промежуточной аттестацией обучающихся с помощью компьютерного тестирования в подсистеме «Тестирование» по технологии ЦМКО. Одинаковые результаты (41 %) показали обучающиеся РГУПС и другие

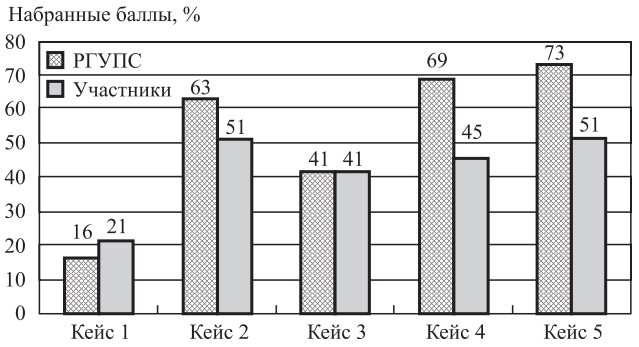
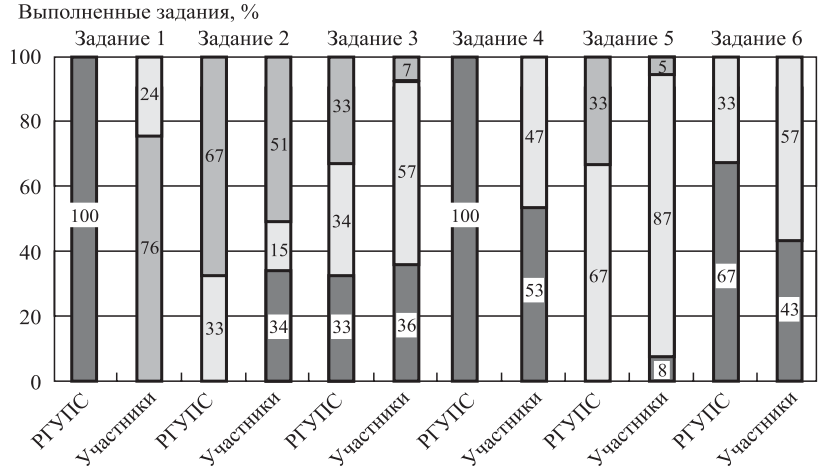


Рис. 2. Результаты решения кейс-заданий выпускников РГУПС и участников ФИЭБ

участники по научно-исследовательской деятельности. Ниже среднего процента баллов участников показали обучающиеся РГУПС по проектно-конструкторской деятельности (на 5 %). Очевидно, такой неоднозначный результат связан с использованием методического материала в РГУПС, отличного от используемых тестов при проведении ФИЭБ.

Это позволило пересмотреть методическую базу библиотечного фонда РГУПС и расширить возможности доступа к различным информационно-библиотечным ресурсам.

На рис. 3 рассмотрена решаемость заданий на примере проектно-технологической деятельности как одного из основных видов профессиональной деятельности для направления подготовки 09.03.01 «Информатика и



Вид профессиональной деятельности	Профессиональные компетенции в соответствии с видом профессиональной деятельности
Проектно-технологическая деятельность	Разрабатывать компоненты программных комплексов и баз данных, использовать современные инструментальные средства и технологии программирования (ПК-5)

Рис. 3. Процентное соотношение решаемости заданий на примере проектно-технологической деятельности

вычислительная техника», предусматривающая разработку компонентов программных комплексов и баз данных на основе современных инструментальных средств и технологий программирования.

Абсолютные результаты при решении заданий 1 и 4 по проектно-технологической деятельности показали обучающиеся РГУПС, что выше на 24 и 47 % соответственно результатов вузов-участников. Рассматривая результаты обучающихся РГУПС и вузов-участников по решению задания 5, можно сделать вывод, что данное задание является невалидным, так как у обучающихся РГУПС и у обучающихся вузов-участников возникли определённые трудности при решении данного задания (33 % обучающихся РГУПС частично выполнили задания, 8 % обучающихся образовательных организаций России ответили правильно). Такой результат возможен на основании трёх критериев: частичными знаниями обучающихся тематики данного задания; повышенной сложностью задания; некорректно составленным заданием.

Продемонстрированные обучающимися результаты ФИЭБ позволяют сформулировать предположение об уровне сформированности профессиональных компетенций выпускников (табл. 2).

Уровень сформированности профессиональных компетенций обучающихся (выпускников) РГУПС и образовательных организаций России по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» классифицируется следующим образом: высокий по виду профессиональной деятельности, если процент набранных баллов за выполнение соответствующего кейс-задания составляет не менее 70 % от максимального балла за данный кейс; базовый уровень, если процент набранных баллов за выполнение соответствующего кейс-задания составляет не менее 50 % баллов от максимального балла за данный кейс; низкий, если процент набранных баллов за выполнение соответствующего кейс-задания составляет менее 50 % от максимального балла за данный кейс.

Таким образом, рассмотрены процедура оценки уровня подготовки выпускников, а также алгоритм отбора дисциплин и формирования комплекта заданий, позволяющие выявлять способности обучающегося, анализировать, обобщать, систематизировать и структурировать основную и дополнительную к кейсу информацию, устанавливать причинно-следственные связи и зависимости между выявленными проблемами, осуществлять поиск и использовать эффективные средства, технику, методы для их решения;

проведён сравнительный анализ эффективности технологий ФИЭБ и ЦМКО, в результате которого пересмотрена методическая

Таблица 2

Уровень сформированности профессиональных компетенций обучающихся (выпускников) РГУПС и общеобразовательных организаций России по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

Вид профессиональной деятельности (компетенции)	Уровень компетенций обучающихся, %						Базовый уровень обучающихся, %	
	Высокий		Базовый		Низкий			
	РГУПС	ОО РФ	РГУПС	ОО РФ	РГУПС	ОО РФ	РГУПС	ОО РФ
Проектно-конструкторская деятельность (ПК-1 — ПК-4)	0	1	0	3	100	96	0	4
Проектно-технологическая деятельность (ПК-5)	33	21	67	34	0	44	100	56
Научно-исследовательская деятельность (ПК-6 — ПК-7)	0	2	33	21	66	77	33	23
Монтажно-наладочная деятельность (ПК-9 — ПК-10)	33	13	67	31	0	56	100	45
Сервисно-эксплуатационная деятельность (ПК-11)	67	15	33	51	0	34	100	66

база библиотечного фонда РГУПС и расширены возможности доступа к различным информационно-библиотечным ресурсам;

проанализированы результаты независимой внешней оценки качества подготовки выпускников РГУПС в сравнении с другими образовательными организациями, принявшими участие в ФИЭБ, на примере направления подготовки 09.03.01 (230100.62) «Информатика и вычислительная техника», на основании которых определено, что уровень подготовки обучающихся РГУПС соответствует и даже превышает средний показатель готовности обучающихся вузов-участников по проектно-технологической (на 12 %), монтажно-наладочной (на 14 %) и сервисно-эксплуатационной (на 22 %) специальностям;

при проведении независимой внешней оценки качества подготовки обучающихся определены уровни сформированности профессиональных компетенций обучающихся РГУПС и участников, при которой высокий уровень составляет не менее 70 %, базовый — не менее 50 % баллов и низкий — меньше 50 % от максимального балла за данный кейс.

Образовательные организации высшего образования, в первую очередь, заинтересованы в том, чтобы их выпускники были востребованы, работали по специальности, перед ними открывались большие карьерные возможности, следовательно, постоянное повышение конкурентоспособности выпускников отрасли железнодорожного транспорта — главная задача, стоящая перед рыночно-ориентированными образовательными организациями, а добиться этого можно только при использовании всех имеющихся современных инструментов управления. Совокупный анализ результатов ФИЭБ и результатов текущего контроля, промежуточной аттестации и государственной итоговой аттестации выпускников в форме компьютерного тестирования по технологии ЦМКО подтверждает эффективность использования подсистемы «Тестирование», объективность оценки приобретаемых компетенций, интенсивность и результативность учебного процесса, основной профессиональной образовательной программы, степень их адекватности условиям будущей трудовой деятельности на предприятиях транспортной отрасли. Система внутреннего мониторинга и оценки качества высшего образования даёт образовательному учреждению мощный инструмент, который позволит руководству убедиться в том, что различные структурные подразделения придерживаются общих поставленных целей и задач национальной безопасности в области науки, технологий и образования, а также поможет в принятии решений по распределению ресурсов на стратегическом уровне.

Библиографические ссылки

1. **Указ** Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».

2. **Тимофеева М.С., Глазунов Д.В.** Новый подход к проведению итоговой государственной аттестации выпускников. В сб.: Преподаватель высшей школы в XXI веке. Тр. Междунар. научн.-практ. Интернет-конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. 2015. С. 11—21.

3. **Тимофеева М.С., Кирсанова Л.М.** Преемственность федеральных государственных образовательных стандартов в сфере высшего образования // Инновации в образовании. № 1. 2016. С. 5—15.

4. **Модель** педагогических измерительных материалов (ПИМ). URL: http://bakalavr.i-exam.ru/node/344 (дата обращения: 14.03.2016).

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

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Метод пространства состояний при исследовании и анализе крутильных колебаний привода вращения. *Вестник машиностроения.* 2017. № 2.

Представлен анализ крутильных колебаний привода вращения шлифовального круга станка 3М151 при принятой методике расчёта собственных частот и форм колебаний и предлагаемой методике описания крутильной системы уравнениями пространства состояний, которые позволяют учесть деформирующие свойства системы, динамические свойства приводного движения и оценить амплитуду вынужденных колебаний любого элемента системы по её амплитудно-частотной характеристике.

Уточнение механики масс и среды на основе характеров корректирующих масс. *Вестник машиностроения.* 2017. № 2.

Предложено фиксировать и описывать характеры масс, отделяющихся при формообразовании деталей, в виде эквивалентных шаровых масс в пространстве всего состава, движущихся в эквивалентном центробежном механизме, который также перемещается в этом пространстве.

Комплексная автоматизация производства заготовок лопаток компрессоров ГТД. *Вестник машиностроения.* 2017. № 2.

Выполнен анализ существующих технологических процессов изготовления точных заготовок лопаток компрессоров ГТД. Предложены способы полной автоматизации штамповки лопаток на базе разработанного роботизированного комплекса.

Компьютерная модель для исследования газового режима пресс-формы при литье термопластов под давлением. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 2.

Приведены архитектура компьютерной модели для исследования газового режима пресс-формы и результаты расчёта устранения поверхностного дефекта «пригар» на примере отливки «головка датчика температуры», полученной из термопласта методом литья под давлением.

Структура и свойства титанового сплава ВТ6ч после линейной сварки трением и последующего отжига. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 2.

Исследовано влияние процесса линейной сварки трением и последующего отжига на структуру и распределение микротвёрдости в сварном соединении промышленного титанового сплава ВТ6ч. Проведение последующей термической обработки позволило получить равноосную мелкозернистую структуру и стабилизировать значения твёрдости. Испытания на растяжение показали, что прочность сварного шва после термической обработки превышает прочность основного металла.

Современные технологии получения заготовок из изношенных деталей. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 2.

Показано развитие технологий восстановления изношенных при эксплуатации, отбракованных деталей до состояния заготовок и деталей, пригодных для вторичного использования.

Учёт упрочнения материала поверхностного слоя детали, обрабатываемой точением, при расчёте остаточных напряжений, обусловленных тепловым фактором. *Упрочняющие технологии и покрытия.* Том 13. 2017. № 2.

Предложена методика расчёта остаточных напряжений в поверхностном слое детали от действия теплового фактора при принятии линейного закона упрочнения материала детали. При расчёте учитываются физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, режим обработки, геометрические параметры режущей части инструмента.

Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия. *Упрочняющие технологии и покрытия.* Том 13. 2017. № 2.

Представлены результаты исследований влияния состава многоэлементных покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия на их параметры структуры и механические свойства. Установлена эффективность режущего инструмента с разработанными покрытиями.

К вопросу определения размера пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке. *Упрочняющие технологии и покрытия.* Том 13. 2017. № 2.

Рассмотрена методика определения размера пятна нагрева плазменного источника при поверхностной обработке и выявлена зависимость радиуса пятна нагрева от мощности дуги. Приведены экспериментальные данные проверки теоретических положений.