Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

10
2019

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. – д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. – д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Булдакова Т.И. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., 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
Проталинский О.М. – д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Чистякова Т.Б. – д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
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

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

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Гусейнова М.В. Оптимизация измерения концентрации CO_2 в воздухе жилых и производственных помещений методом оптико-акустической спектрометрии 435

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И., Дюкин А.А. Индустриальный комплекс для очистки воздуха 437

Старостин Н.П., Васильева М.А., Аммосова О.А. Управление нагревом и охлаждением при сварке полиэтиленовых труб в раструб в условиях низких температур 443

Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А. Оценка показателей эффективности функционирования энергообъектов в мультиагентной микроэнергосистеме 449

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Елисеев В.А. Доминанты прогнозирования научно-технологического развития 461

Фанг Ф.С., Хыонг Ч.Н., Чыонг Ф.С. Алгоритмы коррекции навигационных систем летательных аппаратов 467

Ху Ц., Лукьянова Н.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка компактных алгоритмов параметрической идентификации для беспилотных летательных аппаратов 473

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 480

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 10 / 2019

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

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

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

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

Founder:

LLC «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

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

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Guseynova M.V. Optimization of CO_2 concentration measurement in the air of habitable and industrial premises by method of the optical-acoustic spectrometry 435

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boychuk M.I., Dyukin A.A. Industrial complex for air cleaning 437

Starostin N.P., Vasileva M.A., Ammosova O.A. Heating and cooling control during welding of polyethylene pipes to the socket at low temperatures 443

Abd Elrakhim A.K., Shikhin V.A. Evaluation of performance indicators for power facilities in multi-agent microenergy system . . . 449

MODERN TECHNOLOGIES

Eliseev V.A. Forecasting dominants of scientific and technological development 461

Fang F.S., Khyong Ch.N., Chyong F.S. Algorithms for the correction of aircraft navigation systems 467

Khu Tc., Lukyanova N.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of compact parametric identification algorithms for unmanned aircraft 473

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

On the journals pages 480

© «Innovative Mashinostroenie» Publishers, «Automation. Modern technologies», 2019

УДК 621.377

М.В. Гусейнова
(Азербайджанский технический университет)
m.v.huseynova@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 В ВОЗДУХЕ ЖИЛЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Показано, что при проведении оптико-акустических измерений содержания CO_2 в воздухе с использованием множества лазерных источников с разной длиной волны и разной мощностью, когда длина волны излучения уменьшается с 10,253 до 9,569 мкм при росте мощности с 3 до 9 Вт, информативность результатов измерений достигнет максимума при противоположных закономерностях изменения амплитуды сигнала U и числа измерений N с ростом мощности лазера P. На основе результатов эксперимента сделан вывод, что при больших концентрациях углекислого газа в помещениях с увеличением P показатель N должен расти, а при малых — уменьшаться.

Ключевые слова: оптико-акустическая спектрометрия; углекислый газ; лазер; оптимизация; концентрация.

It is shown that at conducting optical-acoustic measurements of CO_2 in the air using a variety of laser sources with different wavelengths and different powers, when the radiation wavelength decreases from 10.253 to 9.569 microns with an increase in power from 3 to 9 W, the information value of the measurement results reaches a maximum at opposite laws of change in the amplitude of the signal U and the number of measurements N with increasing laser power P. Based on the experimental results, it is concluded that at high concentrations of carbon dioxide in premises the N index should increase at P increase, and decrease at small P index.

Keywords: optical-acoustic spectrometry; carbon dioxide; laser; optimization; concentration.

Лазерные методы считаются наиболее перспективными для проведения оперативного контроля газовых загрязнений [1]. Методы оптико-акустической спектрометрии позволяют осуществить оперативный и точный контроль концентрации загрязняющих веществ в атмосфере. Суть оптико-акустического эффекта заключается в том, что излучение нагревает некоторый объём газа в камере, а локальный рост температуры и давления вызывает распространение акустической волны, регистрируемой установленным на стенках камеры микрофоном [2]. Оптико-акустический метод обеспечивает широкий динамический диапазон чувствительности к измеряемой величине, что позволяет детектировать в пробе газы с концентрациями, значения которых могут различаться в десятки тысяч раз [3].

Простейшая блок-схема оптико-акустического измерителя показана на рис. 1 [2].

В измерителе используется перестраиваемый лазер, длина волны которого совпадает с длиной волны поглощения исследуемого газа. Лазерный луч модулируется специально

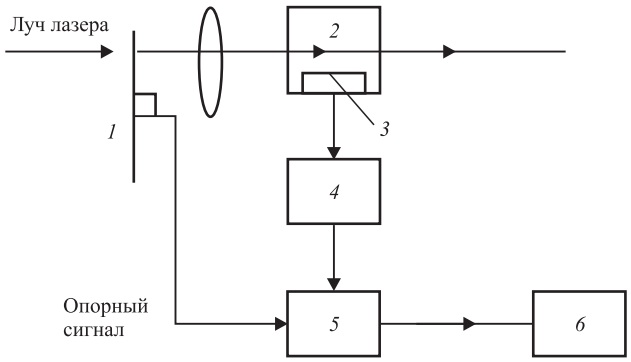


Рис. 1. Блок-схема оптико-акустического измерителя:
1 — механический прерыватель; *2* — кювета с образцом; *3* — микрофон; *4* — предусилитель; *5* — синхронный усилитель; *6* — регистратор

выбранной частотой, которая обеспечивает оптимальное отношение сигнал/шум.

Целью настоящей работы является оптимизация процедуры измерения концентрации углекислого газа в воздухе с использованием оптико-акустического измерителя.

В качестве исходных данных воспользуемся результатами экспериментальных исследований в области измерения концентрации CO_2, приведённых в работе [4]. В этой работе была исследована линейность сигнала оптоакустической ячейки в зависимости от концентрации CO_2. Использовали лазерный источник с длиной волны излучения 10,608 мкм, мощностью излучения 6,5 Вт. Также была исследована зависимость амплитуды сигнала микрофона от мощности воздействующего лазерного излучения при двух концентрациях CO_2: 0,1 и 10 %. При этом использовали три лазерных источника: мощностью 3 Вт с длиной волны излучения λ_1 = 10,253 мкм; мощностью 6 Вт с длиной волны λ_2 = 9,271 мкм; мощностью 9 Вт с длиной волны λ_3 = 9,569 мкм. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Видно, что при увеличении концентрации CO_2 крутизна сигнала измерителя изменяет свой знак от плюса к минусу. Можно ожидать, что при некотором повышении концентрации, например до значений 14...15 %, кривые, приведённые на рис. 2, станут зеркально симметричными относительно горизонтальной линии. Следовательно, для этих кривых можно сформулировать следующее ограничительное условие:

$$\int_{P_{\min}}^{P_{\max}} \lg \frac{U(P)}{\sigma} dP = C_1; \quad C_1 = \text{const}, \qquad (1)$$

где σ — шумы в системе.

Если рассматривать логарифмические значения амплитуды исходного сигнала в качестве информативных величин, то суммарное

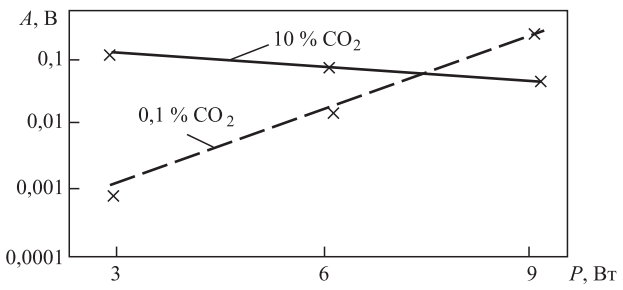


Рис. 2. Зависимость амплитуды *A* сигнала оптико-акустического измерителя от мощности лазерных излучателей разных длин волн

количество извлеченной информации при измерениях можно оценить как

$$\int_{P_{\min}}^{P_{\max}} N(P) \log_2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right) dP, \qquad (2)$$

где $N(P)$ — вновь введённая функциональная зависимость между числом измерений N и мощностью излучения лазера P.

С учётом выражений (1) и (2) сформируем следующий целевой функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$F_1 = \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} N(P) \log_2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right) dP + \eta \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right), \qquad (3)$$

где η — множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера—Лагранжа оптимальная функция $U(P)$, приводящая функционал (3) к его экстремальному значению, должна удовлетворять условию

$$\frac{d\left\{N(P)\log_2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right) + \eta \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right)\right\}}{dU(P)} = 0. \qquad (4)$$

Из условия (4) получим

$$\frac{N(P)\lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right)'_{U(P)}}{\ln 2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right)} + \eta \frac{1}{\lg 2\, U(P)} = 0. \qquad (5)$$

Из выражения (5) получим

$$\frac{N(P)}{\ln 2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right)} + \eta = 0. \qquad (6)$$

Из выражения (6) находим

$$U(P) = \sigma \frac{N(P)}{-\eta \ln 2}. \qquad (7)$$

Таким образом, как следует из выражения (7), функции $U(P)$ и $N(P)$ находятся в обратной функциональной зависимости, т. е. когда $U(P)$ является растущей функцией, функция $N(P)$ должна быть убывающей, или наоборот. Другими словами, при росте P увеличение U должно сопровождаться уменьшением N и наоборот.

Легко показать, что при приведённой выше оптимальной связи функций $U(P)$ и $N(P)$ це-

левой функционал (3) достигает максимальной величины. Для этого достаточно определить знак выражения

$$F_2 = \frac{d^2\left\{N(P)\log_2 \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right) + \eta \lg\left(\frac{U(P)}{\sigma}\right)\right\}}{dU(P)^2} \quad (8)$$

и убедиться, что этот знак отрицательный.

Таким образом, показано, что при проведении оптико-акустических измерений концентрации CO_2 в воздухе с использованием множества лазерных источников с разной длиной волны и разной мощностью, когда с ростом мощности длина волны излучения уменьшается с 10,253 до 9,569 мкм при росте мощности в с 3 до 9 Вт, информативность результатов измерений достигнет максимума при соблюдении противоположных закономерностей изменения U и N с ростом P. С учётом результатов эксперимента, отображённых на рис. 2, можно заключить, что в режиме оптимальных оптико-акустических измерений при больших концентрациях углекислого газа в помещении с увеличением P показатель N должен расти, а при малых — уменьшаться.

Библиографические ссылки

1. **Городничев В.А., Белов М.Л., Федотов Ю.В., Еременко Л.Н.** Лазерный оптико-акустический анализ сложных газовых смесей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 34—48.

2. **Ровинский Р.Е.** Обзор литературных материалов по оптическим методам определения химического состава и концентраций компонентов в газовых средах. URL: http://remrovinsky.com/stat/obzor.pdf (дата обращения 20.02.2019).

3. **Старикова М., Кузнецова И., Костюкова Н.** Лазерный оптико-акустический спектрометр для газоанализа в медицине // Photonics. 2015. № 3 (51). С. 84—93.

4. **Андрианов В.П., Бандуркин К.В., Брехов О.М., Волгин А.Н., Игнатьев Г.Н.** Исследование методов лазерной спектроскопии и разработка высокочувствительных лазерных газоанализаторов // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 5—6. С. 73—77.

Ссылка для цитирования

Гусейнова М.В. Оптимизация измерения концентрации CO_2 в воздухе жилых и производственных помещений методом оптико-акустической спектрометрии // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 435—437.

УДК 62-784.43

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц.,
М.И. Бойчук, А.А. Дюкин
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)
mikaeva@npo.lit.ru

ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Представлен индустриальный комплекс для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ. Приведены технические характеристики, устройство и основные части комплекса.

Ключевые слова: комплекс; воздух; очистка; примеси; технические данные; блок; пульт; шкаф; ультрафиолетовая лампа.

An industrial complex for air cleaning from fine impurities and reduction in air concentrations of reek smell substances is presented. The technical characteristics, the device and the main parts of the complex are adduced.

Keywords: complex; air; cleaning; impurities; technical date; block; panel; cabinet; UV lamp.

Воздух — это жизнь, а чистый воздух — здоровье [1—3]. Комплекс с маркировкой взрывозащиты II Gb c b IIB T3 X предназначен для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ (сероводорода, аммиака, смеси природных меркаптанов и др.). Предельно допустимая концентрация (ПДК) таких веществ на границе санитарно-защитной зоны определяется согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» [4, 5]. Комплекс производится на предприятии ООО Торговый дом «Лабора-

тория импульсной техники», г. Москва. Комплекс работоспособен в следующих условиях: температура окружающего воздуха — от −45 до +40 °С; относительная влажность окружающего воздуха — до 98 % при температуре +25 °С; температура очищаемого воздуха — от +5 до +40 °С. Климатическое исполнение комплекса — У1; категория размещения — уличное по ГОСТ 15150—69.

Технические характеристики комплекса: присоединительные размеры, мм: вход — ∅700, выход — 450 × 450; условное давление внутри камеры — разрежение; транспортные габаритные размеры, длина × ширина × высота, мм, — 12 100 × 2450 × 2890; габаритные размеры с учётом присоединительных устройств, длина × ширина × высота, мм, — 12 192 × 2670 × 3894; число ступеней очистки — две; масса брутто — 14 000 кг; материал — коррозионно-стойкая сталь; температура отключения по перегреву — 50 °С; отключение при отсутствии потока воздуха через комплекс — есть.

Комплекс состоит из следующих основных частей: блок-контейнера, предназначенного для размещения элементов, необходимых для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей, сероводорода, аммиака, меркаптанов, а также других вредных и дурнопахнущих веществ; ультрафиолетового (УФ) модуля, предназначенного для размещения специальных УФ-ламп, имеющих среди длин волн своего излучения длину волны 185 нм; блока каталитической засыпки, предназначенного для размещения сорбционно-каталитической засыпки; блока предварительной очистки воздуха, предназначенного для предварительной очистки воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц; пульта управления, предназначенного для управления комплексом и контроля параметров его работы; шкафа ЭПРА, предназначенного для размещения электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА), запускающих и регулирующих работу УФ-ламп, а также для обработки и передачи сигналов об исправности УФ-ламп, датчиков концентраций метана и сероводорода, датчиков давления и прочей информации в пульт управления, а также для дистанционной передачи данных о работе комплекса; вводного щита, предназначенного для подключения силового питающего кабеля, включения и выключения комплекса, а также для аварийного отключения питания комплекса.

Блок-контейнер (рис. 1) представляет собой контейнер, разделённый внутри герметичной перегородкой *15* на два отсека. В первом отсеке (проточная часть комплекса) происходит очистка обрабатываемого воздуха, во втором отсеке (машинное отделение) установлены ёмкость для промывки УФ-ламп *11*, вентилятор *12*, обеспечивающий прохождение через комплекс воздуха с заданным в проекте расходом, шкаф ЭПРА *14*.

На входе блок-контейнера установлен диффузор *4*, а на выходе — конфузор *5*, предназначенные для распределения и выравнивания потока воздуха. Обрабатываемый воздух поступает в блок-контейнер по воздуховоду через диффузор *4*, затем проходит через блок *21*, где происходят его предварительная очистка от пыли, мелкодисперсных частиц и снижение содержания водяного аэрозоля.

После предварительной очистки воздух через выравнивающую решётку *18*, которая предназначена для равномерного распределения потока обрабатываемого воздуха по поперечному сечению блок-контейнера, поступает на первую стадию очистки.

На первой стадии очистки воздух обрабатывается озоном и различными радикалами, образующимися в процессе работы специальных УФ-ламп, установленных

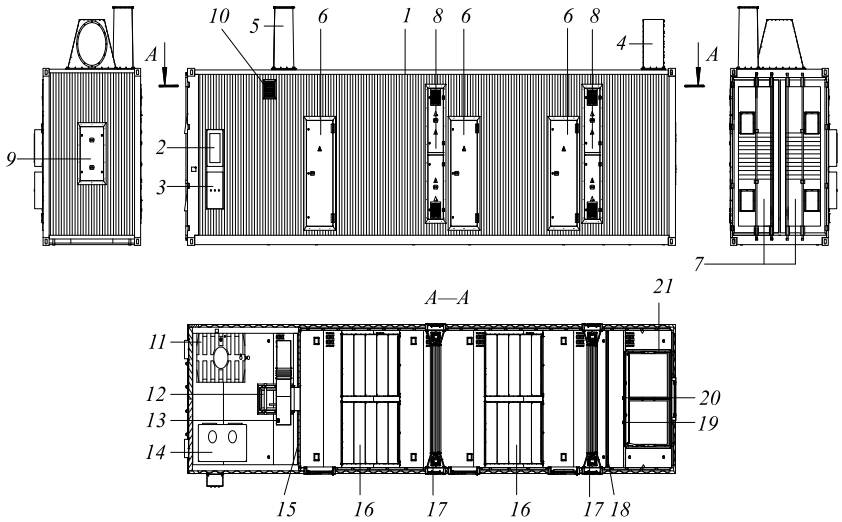


Рис. 1. Комплекс очистки воздуха от примесей:
1 — блок-контейнер; *2* — пульт управления; *3* — вводной щит; *4* — диффузор; *5* — конфузор; *6* — дверь обслуживания блок-контейнера; *7* — дверь обслуживания машинного отделения; *8* — люк обслуживания УФ-модуля; *9* — люк обслуживания блока предварительной очистки воздуха; *10* — вентилятор системы охлаждения шкафа ЭПРА; *11* — ёмкость для промывки УФ-ламп; *12* — вентилятор; *13* — датчик температуры; *14* — шкаф ЭПРА; *15* — перегородка; *16* — блок каталитической засыпки; *17* — УФ-модуль; *18* — выравнивающая решётка; *19* — датчик метана; *20* — датчик сероводорода; *21* — блок предварительной очистки воздуха

в УФ-модуле *17*. Озон и радикалы окисляют вредные и дурнопахнущие вещества, содержащиеся в воздухе, в том числе аммиак, сероводород и меркаптаны. Окисление происходит в два этапа: первичное окисление — осуществляется в объёме блок-контейнера между УФ-лампами и блоком каталитической засыпки *16*; вторичное окисление — происходит непосредственно на поверхности каталитической засыпки. Продуктами реакций окисления являются нейтральные соединения (соли неорганических кислот, углекислый газ и пары воды), оседающие в блоке каталитической засыпки. Пройдя через блок каталитической засыпки *16*, обрабатываемый воздух поступает на вторую стадию очистки, которая по технологии очистки повторяет первую стадию. После этого очищенный воздух через конфузор *5* поступает в атмосферу.

В блок-контейнере установлены датчик температуры *13*, необходимый для контроля температуры выбрасываемого в атмосферу обрабатываемого воздуха, датчик метана *19*, контролирующий концентрацию метана в обрабатываемом воздухе, и датчик сероводорода *20*, контролирующий концентрацию сероводорода. Для определения степени загрязнения фильтров и сеток каплеотделителя блока предварительной очистки воздуха, а также для определения снижения расхода протока воздуха через весь комплекс в шкафу ЭПРА установлены два дифманометра, расположенных в диффузоре *4*. Ламповые кабели, кабели датчиков и питания электродвигателя вентилятора проложены в лотках и герметично отделены от проточной части комплекса.

Комплекс оснащён системой автоматической промывки УФ-ламп. Вода для промывки УФ-ламп поступает из ёмкости *11*, которая заполняется вручную в процессе технологического обслуживания по сигналам соответствующих датчиков.

Для обслуживания блок-контейнера и машинного отделения предусмотрены двери обслуживания *6*, *7* и люки обслуживания *8*, *9*. Во время работы комплекса все двери и люки обслуживания должны быть закрыты.

УФ-модуль (рис. 2) состоит из короба *1*, верхнего порожка *2* и поперечного кабель-канала *3*. В коробе установлены 24 УФ-лампы *4*, предназначенных для генерации окислителей (озона, радикалов OH^- и др.). УФ-лампы защищаются от механического повреждения при их обслуживании с помощью горизонтально расположенных стальных трубок *5* диаметром 30 мм. При необходимости (например, при замене или протирке УФ-ламп) трубки можно извлечь из УФ-модуля. Герметичность лампы обеспечивается уплотнительным кольцом. В верхней части лампового модуля установлена лейка *6*, с помощью которой осуществляется подача воды для промывки ламп.

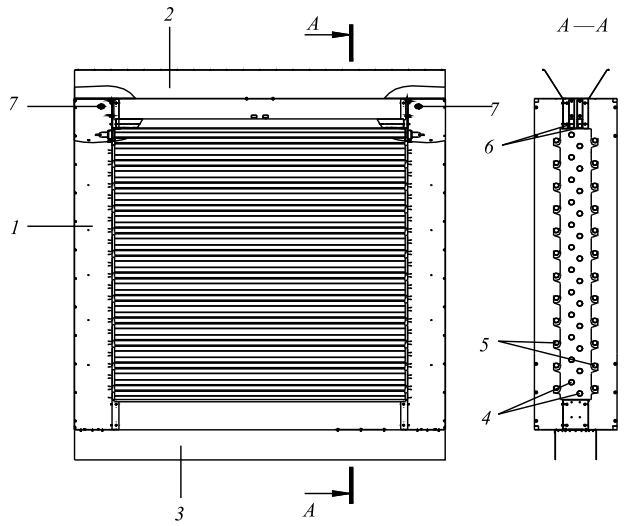


Рис. 2. УФ-модуль

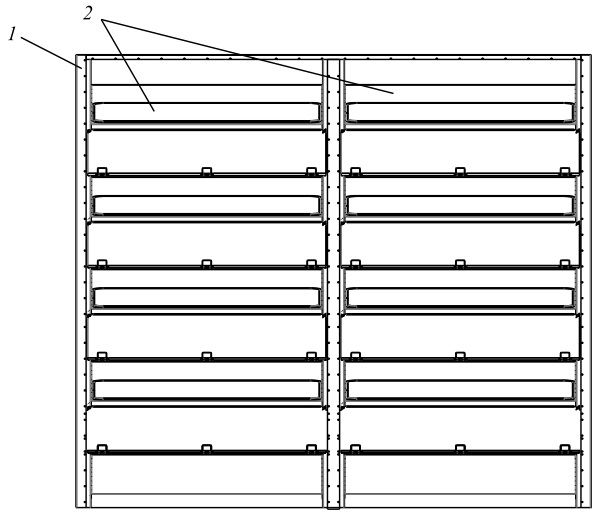


Рис. 3. Блок каталитической засыпки

Для контроля температуры в УФ-модуле в верхней части лампового короба установлены два термостата *7*.

Блок каталитической засыпки (рис. 3) состоит из каркаса *1*, в котором установлены секции *2* с каталитической засыпкой.

Блок предварительной очистки воздуха (рис. 4) состоит из сеток каплеотделителя (класс фильтрации не ниже G3) *2* и фильтров G4/F5 *3*, закреплённых на каркасе *1* с помощью гаек *4*. Обрабатываемый воздух после диффузора проходит через сетки каплеотделителя *2*, затем через фильтр G4/F5 *3*, после чего поступает на первую стадию очистки.

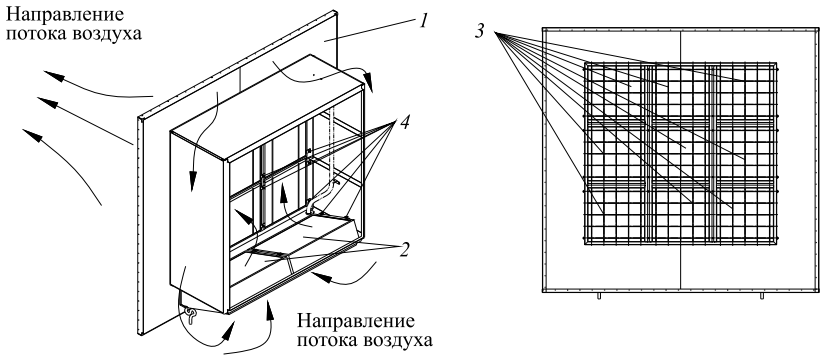


Рис. 4. Блок предварительной очистки воздуха

Внутри пластиковой ёмкости *1* для промывки ламп (рис. 5) установлен погружной насос. Нагрев воды осуществляется при помощи ТЭНа *2*, установленного в нижней части ёмкости. Контроль температуры воды в ёмкости осуществляется при помощи датчика температуры *3*. В верхней части ёмкости установлен кондуктометрический датчик *4*, который предназначен для контроля уровня воды в ёмкости. С помощью этого датчика при низком уровне воды в ёмкости формируется аварийный сигнал о необходимости срочного долива воды в ёмкость. Технические характеристики датчика уровня воды: тип датчика — LNK-R нормально замкнутый; рабочая температура — −10...+125 °С; напряжение питания — 10...28 В.

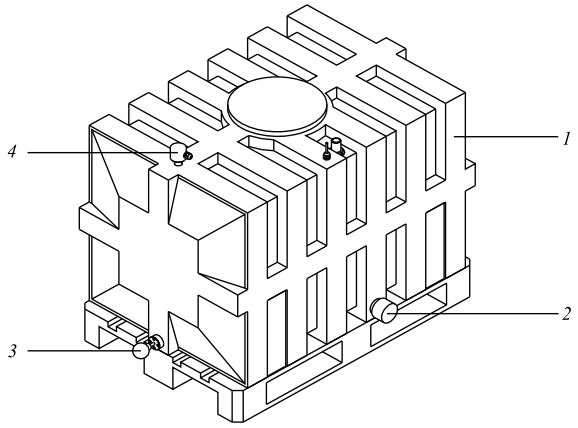


Рис. 5. Ёмкость для промывки УФ-ламп

Пульт управления (рис. 6) состоит из корпуса *1*, на двери *2* которого располагается панель управления комплексом *3*. Внутри пульта управления на монтажной панели *4* установлены термостат *6*, нагреватель *8*, автоматический выключатель *5* и блок клеммных зажимов *7*.

На панели пульта управления расположены следующие элементы управления и сигнализации (рис. 7): сигнальная лампа «СЕТЬ» (зелёная) *1*, сигнализирующая о подаче сетевого питания на пульт управления; сигнальная лампа «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ» (жёлтая) *2*, сигнализирующая о том, что значения некоторых технологических параметров комплекса не соответствуют номинальным, но комплекс функционирует в полном объёме; сигнальная лампа «АВАРИЯ» (красная) *3*, сигнали-

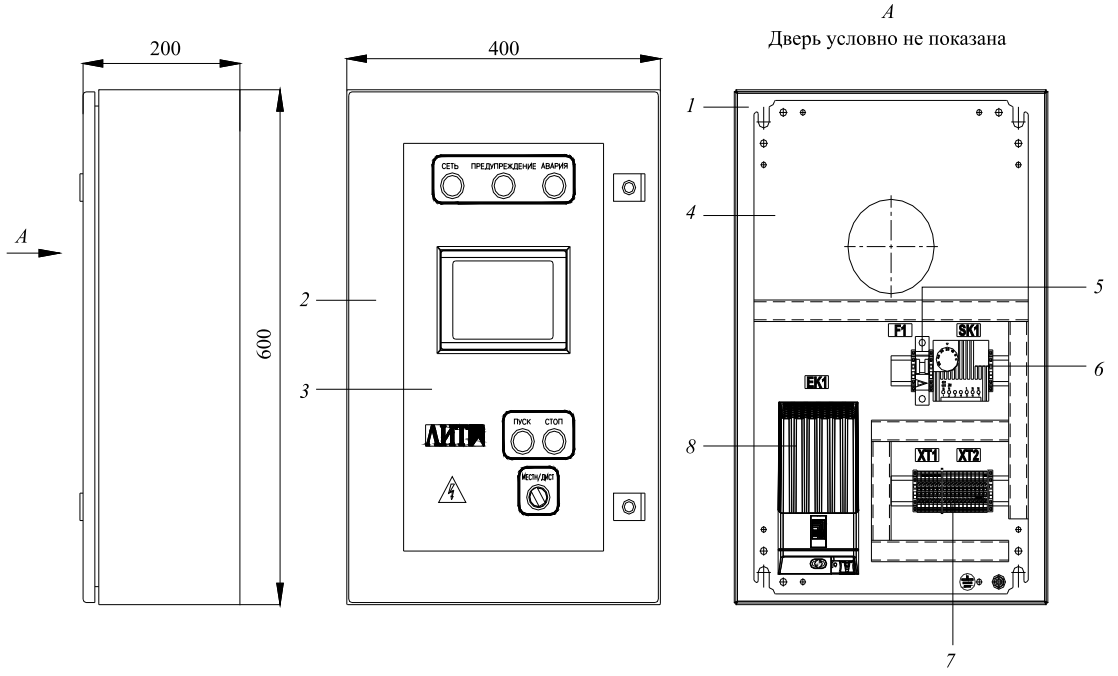


Рис. 6. Пульт управления

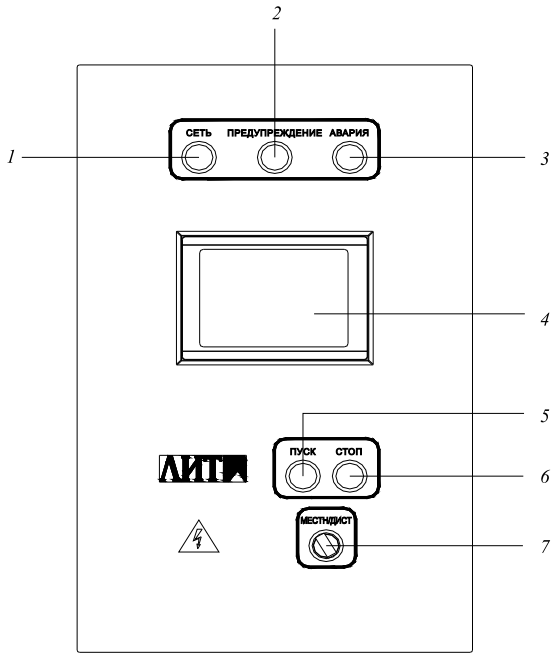


Рис. 7. Панель управления пульта управления

зирующая об аварийном состоянии комплекса; кнопка включения комплекса «ПУСК» *5*; кнопка выключения комплекса «СТОП» *6*; переключатель «МЕСТН/ДИСТ» *7* для выбора режима управления комплексом, с помощью этого переключателя осуществляется выбор режима управления работой комплекса — местный или дистанционный. Переключатель «МЕСТН/ДИСТ» можно переводить из одного положения в другое при работающем комплексе. Панель оператора *4* служит для индикации состояния комплекса, настройки технологических параметров комплекса, управления отдельными компонентами комплекса.

В машинном отделении блок-контейнера размещён шкаф ЭПРА (рис. 8), состоящий из корпуса *1*, установленного на цоколе *4*. Вентиляция шкафа ЭПРА осуществляется при помощи выходных фильтров *3*, установленных на дверях шкафа ЭПРА, и внешнего вентилятора, установленного в блок-контейнере. Для контроля температуры воздуха внутри шка-

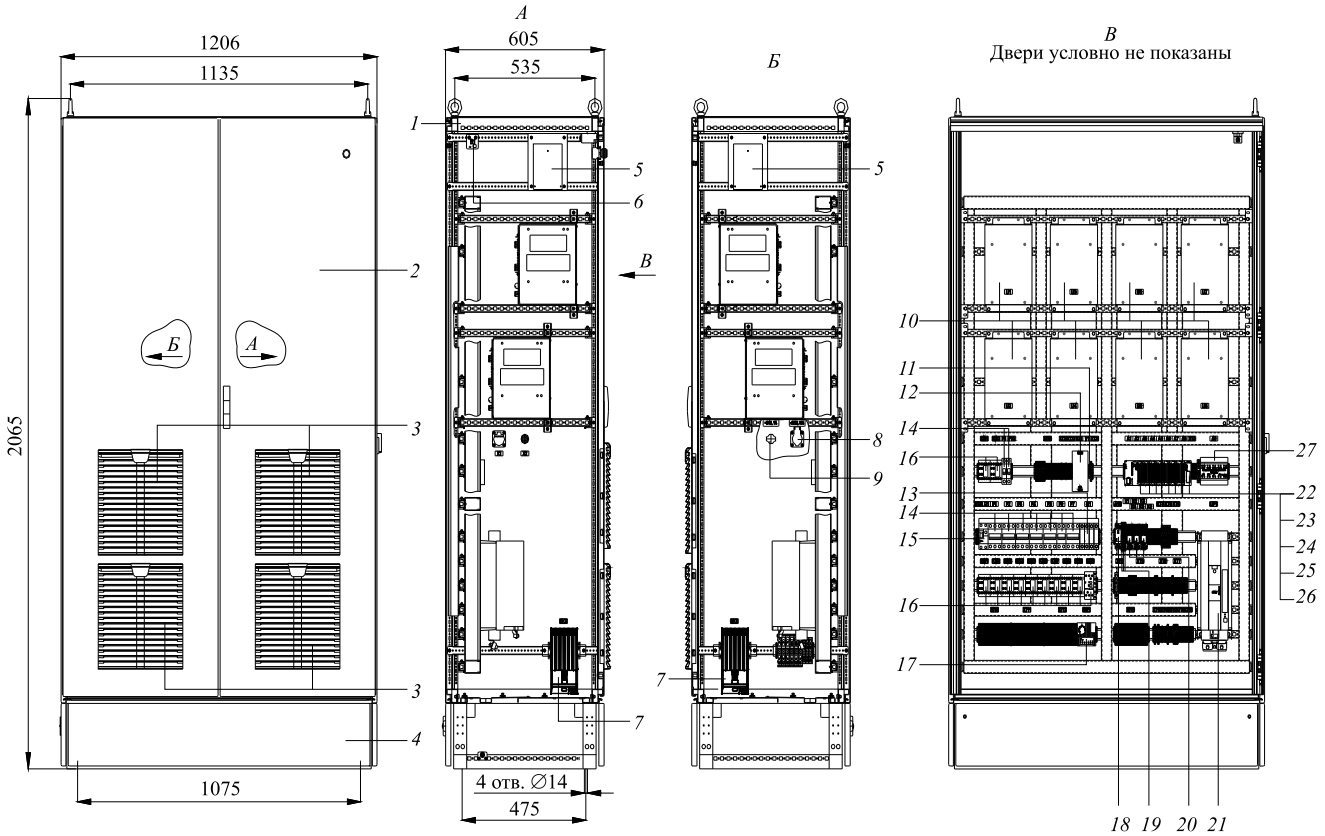


Рис. 8. Шкаф ЭПРА:

1 — корпус; *2* — дверь; *3* — выходной фильтр; *4* — цоколь; *5* — дифманометр; *6* — датчик температуры; *7* — нагреватель; *8* — розетка (~220В, 16А); *9* — разъём (24В, 1А); *10* — групповой ЭПРА; *11* — защита от перенапряжения; *12* — источник питания; *13* — ограничитель перенапряжения (класс С); *14* — автоматический выключатель; *15* — дифференциальный выключатель; *16* — контактор; *17* — термостат; *18* — реле контроля фаз; *19* — модуль релейного интерфейса; *20* — реле; *21* — частотный преобразователь; *22* — процессорный модуль; *23* — модуль дискретного вывода; *24* — модуль дискретного ввода; *25* — аналоговый модуль; *26* — коммуникационный процессор; *27* — контроллер управления мощностью ламп

фа установлены датчик температуры *6* и термостат *17*. В шкафу ЭПРА размещены восемь групповых ЭПРА *10*, а также элементы управления и контроля работы УФ-ламп и силовой коммутации. *В* нижней части шкафа ЭПРА находятся нагреватели *7*. Подвод ламповых кабелей и кабелей датчиков осуществляется через кабельные вводы и гермовводы, установленные на задней панели цоколя *4*. На боковой панели шкафа ЭПРА установлены розетка *8*, предназначенная для питания внешних устройств, и разъём *9*, предназначенный для питания переносного светодиодного светильника, необходимого для обслуживания шкафа ЭПРА.

ЭПРА предназначен для включения и обеспечения нормальной работы шести УФ-ламп. Он обеспечивает предварительный прогрев электродов, поджиг и рабочий режим УФ-ламп. ЭПРА состоит из корпуса, в который вставлены четыре платы и вентилятор. Одна из плат — плата питания (ИП), остальные платы — двухканальные ламповые платы (ДК). Ламповая плата осуществляет контроль работы двух УФ-ламп. На ней установлены два светодиода, которые могут индицировать длинный или короткий импульс. При выключенной лампе светодиод не светится. Если лампа работает нормально, то светодиод светится постоянно. В случае неисправности светодиод мигает. Последовательность импульсов светодиодов отражает состояние ЭПРА (этапы работы) или характеристику неисправности (код ошибки).

Если УФ-лампа не горит, то необходимо проверить и при необходимости заменить платы (ИП и/или ДК), входящие в состав ЭПРА. Также необходимо проверить работу соответствующей УФ-лампы и при необходимости заменить её. В случае выхода из строя вентилятора ЭПРА необходимо заменить вентилятор. При выходе из строя других элементов корпуса ЭПРА необходимо заменить корпус ЭПРА.

Вводной щит (рис. 9) состоит из корпуса *1*, на боковой панели которого установлен главный выключатель *5*, предназначенный для включения или выключения комплекса. На двери *6* вводного щита установлена лампа *7* зелёного цвета, сигнализирующая о подаче питания на комплекс. Внутри вводного щита установлена монтажная панель *2*, на которой размещены держатель-разъединитель плавкой вставки *3* и блок клеммных зажимов *4*. В нижней части вводного щита находится гермоввод *8* для подвода кабеля питания комплекса. Отвод кабелей из вводного щита осуществляется через кабельные вводы *9*, расположенные на его задней панели.

Комплекс может работать в двух режимах: местного управления и контроля; дистанционного управления и контроля.

К функциям пульта управления относятся контроль исправности каждой УФ-лампы и ЭПРА; подсчёт времени наработки и числа включений УФ-ламп; включение/выключение УФ-ламп; аварийное отключение комплекса при перегреве шкафа ЭПРА или блок-контейнера; контроль наличия потока воздуха в блок-контейнере; управление работой двигателя вентилятора с помощью частотного преобразователя *21* (см. рис. 8), установленного в шкафу ЭПРА; контроль концентраций сероводорода и метана в потоке обрабатываемого воздуха; контроль загрязнения фильтров G4/F5 и сеток каплеотделителя.

Местный режим работы комплекса позволяет контролировать состояние комплекса, настраивать технологические параметры его работы, управлять отдельными компонентами комплекса с панели оператора пульта управления.

В случае отклонения работы комплекса от нормального режима, не влияющего на ход процесса очистки воздуха, на передней панели пульта управления загорается световой индикатор «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ». Для по-

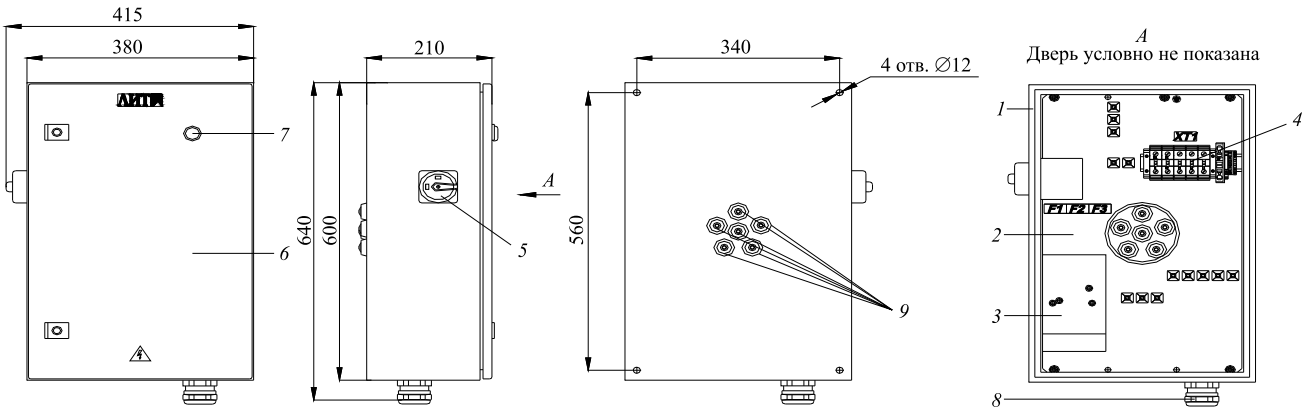


Рис. 9. Вводной щит

лучения информации о неисправности необходимо нажать соответствующую кнопку на панели оператора.

Отключение комплекса происходит через определённый промежуток времени после появления сигнала «АВАРИЯ». При этом на панели пульта управления продолжает гореть световой индикатор «АВАРИЯ», исполнительные элементы (УФ-лампы и вентилятор) выключаются. Для получения информации об аварийной ситуации необходимо нажать соответствующую кнопку на панели оператора.

В случае аварийного отключения необходимо устранить причины возникновения аварийной ситуации, произвести сброс сигнала аварии нажатием кнопки «СТОП» и включить комплекс нажатием кнопки «ПУСК».

Индустриальный комплекс очистки воздуха может применяться в различных областях: пищевой промышленности, медицине, фармацевтическом производстве, сельском хозяйстве, на транспорте, объектах социальной сферы и др. Его основная задача — создать лучшие условия для людей и экологии.

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания ультрафиолетовым излучением // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 11. С. 59—64.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка ламп в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302—307.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 136 с.

4. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: Московский технологический ун-т (МИРЭА), 2017. 150 с.

5. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И., Дюкин А.А. Индустриальный комплекс для очистки воздуха // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 437—443.

УДК 621.791.461

Н.П. Старостин, д-р техн. наук, проф., **М.А. Васильева,** канд. физ.-мат. наук,
О.А. Аммосова, канд. техн. наук
(Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск)

ammosova_o@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ НАГРЕВОМ И ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРИ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ В РАСТРУБ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Предложена математическая модель теплового процесса сварки полиэтиленовых труб в раструб, учитывающая изменение во времени степени кристаллизации полимерного материала и теплоты фазового превращения в определённом интервале температур. Расчётами показано, что при сварке в условиях низких температур управлением тепловым процессом путём предварительного подогрева до допустимой для сварки температуры, оплавлением в регламентированном режиме и охлаждением в теплоизоляционной камере можно обеспечить динамику температурного поля в соединении, свойственную сварке в условиях допустимых температур воздуха.

Ключевые слова: полиэтиленовые трубы; сварка в раструб; предварительный подогрев; теплоизоляционная камера; теплота фазового перехода.

A mathematical model of the thermal process for polyethylene pipes welding into a socket, taking into account the crystallization degree change of the polymer material and the heat of phase transformation in a certain temperature range, is proposed. Calculations show that when welding at low temperatures it is possible to ensure the dynamics of the temperature field in the joint that is characteristic of welding at acceptable air temperatures through the use of a controlling the heat process by preheating to the temperature allowed for welding, flashing in a regulated mode and cooling in the heat-insulating chamber.

Keywords: polyethylene pipes; socket welding; preheating; heat insulation chamber; phase transition heat.

Введение. Сварка полиэтиленовых труб в раструб не получила такого широкого распространения, как раструбная сварка труб из полипропилена. Такое положение связано с тем, что полиэтиленовые трубы используются в основном для прокладки наружных трубопроводов с малым числом поворотов. Раструбная сварка считается удобной и эффективной при монтаже внутренних трубопроводов с большим количеством поворотов. Тем не менее раструбная сварка полиэтиленовых труб как технологичный и надёжный способ соединения имеет перспективы широкого применения. В то же время сварку полиэтиленовых труб рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха от −15 до +45 °С [1]. В случае необходимости проведения сварки при других температурах воздуха работы выполняются в укрытиях (палатки, шатры и т. п.) с обеспечением заданного температурного интервала. При этом свариваемые концы труб на определённую длину вылета и соединительные детали должны иметь температуру интервала, допустимого для проведения сварочных работ. Такая сварка связана с большими энергетическими затратами и длительной подготовкой, что недопустимо при аварийных ситуациях. Актуальной проблемой является разработка технологии оперативной раструбной сварки полиэтиленовых труб при температурах воздуха ниже допустимых без использования укрытий.

Установление ограничения по температуре наружного воздуха, при котором допускается проведение сварочных работ, связано с повышением скорости охлаждения. В полиэтиленовых трубах и соединительных деталях, термостатированных при низкой температуре, при нагреве (оплавлении) периферийные области не прогреваются, что способствует повышению темпа охлаждения наряду с интенсивным конвективным теплообменом с окружающим воздухом. Известно, что при повышенных темпах охлаждения процесс формирования надмолекулярной структуры прерывается на ранней стадии и образуется мелкокристаллическая структура материала сварочного шва, обусловливающая низкую прочность сварного соединения [2]. Технология сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах без предварительного подогрева была предложена в работе [3]. Для повышения длительной прочности сварных соединений, полученных при низких температурах, была разработана технология сварки с предварительным подогревом [4].

В данной работе предлагается технология сварки полиэтиленовых труб в раструб при низких температурах, включающая следующие основные операции: предварительный подогрев свариваемых участков труб и соединительных деталей (муфт) с помощью серийно выпускаемого сварочного аппарата, оплавление в регламентированном режиме для допустимых температур воздуха, охлаждение соединения с использованием теплоизоляции. В качестве управляющих параметров служат продолжительность подогрева и выравнивания температур, а также параметры теплоизоляции, которые определяются расчётным путём на основе моделирования динамики температурных полей.

Моделирование предварительного подогрева. При раструбной сварке полиэтиленовых труб соединение осуществляется по внешней поверхности трубы и внутренней поверхности муфты на длину раструба. Расчёты теплового процесса раструбной сварки, включая предварительный подогрев, проводились для полиэтиленовых труб ПЭ 100 SDR 11 63×5,8 и муфты с длиной раструба 26 мм. Температура окружающего воздуха принималась равной − 40 °С. Значения теплофизических характеристик материалов, использованные в расчётах, приведены в табл. 1 и 2.

Тепловые процессы подогрева свариваемых участков трубы и муфты аналогичны.

Таблица 1

Свойства свариваемых материалов и насадки

Материал трубы и муфты						Материал насадки подогрева		
Полиэтилен (жидкая фаза)			Полиэтилен (твёрдая фаза)			Сталь		
c^+, Дж/(кг·°С)	ρ^+, кг/м^3	λ^+, Вт/(м·°С)	c^-, Дж/(кг·°С)	ρ^-, кг/м^3	λ^-, Вт/(м·°С)	c^s, Дж/(кг·°С)	ρ^s, кг/м^3	λ^s, Вт/(м·°С)
1900	700	0,29	1900	954	0,38	483	7859	53

Таблица 2

Свойства теплоизоляции и воздуха

Материал теплоизоляции			Свойства воздуха при − 40 °С			Свойства воздуха в камере при 20 °С		
Пенофол								
c^{iz}, Дж/(кг·°С)	ρ^{iz}, кг/м^3	λ^{iz}, Вт/(м·°С)	c^{v}, Дж/(кг·°С)	ρ^{v}, кг/м^3	λ^{v}, Вт/(м·°С)	c^{kam}, Дж/(кг·°С)	ρ^{kam}, кг/м^3	λ^{kam}, Вт/(м·°С)
1900	25,39	0,0883	1013	1,51	0,0212	1005	1,20	0,0259

Отличия заключаются только в диаметрах и длине вылета, на которую подогреваются труба и муфта. По конструктивным особенностям муфта может быть подогрета сменной насадкой на длину раструба. Глубина паза l_p сменной насадки для подогрева трубы определяется по формуле

$$l_p = 1{,}66 l_{ras},$$

где l_{ras} — длина раструба [5].

Расчётная схема стенки трубы (муфты) и нагревательного устройства со сменной насадкой для подогрева представлена на рис. 1.

Предположим, что конец свариваемой трубы (муфты) имеет температуру окружающего воздуха ниже допустимой для сварки. Для сокращения продолжительности подогрева сменная насадка предварительно разогрета с помощью нагревательной пластины с температурой T_{Nagr} в течение определённого времени (его температурное поле $T_{Nas}(r, z)$ известно).

Нестационарное температурное поле в стенке трубы (муфты) при подогреве сменной насадкой, в воздухе внутри трубы и в сменной насадке с теплоизоляцией описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c^{-}\rho^{-}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda^{-}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda^{-}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (r, z) \in D,\ 0 < t \leqslant t_p, \qquad (1)$$

с начальными условиями для стенки трубы

$$T(r, z, 0) = T_0, \qquad (2)$$

и для насадки

$$T(r, z, 0) = T_{Nas}. \qquad (3)$$

На торцах насадки и теплоизоляции при $z = 0$ задаётся условие

$$T(r, 0, t) = T_{Nagr}. \qquad (4)$$

На свободных поверхностях G — условие конвективного теплообмена:

$$\lambda^{-}\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_G = -\alpha(T|_G - T_0). \qquad (5)$$

При выравнивании температур путём свободного охлаждения на внутренней и внешней поверхностях, а также на торце трубы задаётся условие (5). Задача решалась численно методом конечных разностей.

В течение всего процесса подогрева на торце сменной насадки нагревательной пластиной поддерживается постоянная температура T_{Nagr} = 35 °С. Вследствие низкой теплопроводности полиэтилена при подогреве участка трубы (муфты) сменной насадкой распределение температуры в стенке по радиальной переменной неоднородно и имеет максимумы на внешних поверхностях. Для получения распределения температуры, близкого к однородному, после подогрева производится выравнивание температур путём свободного охлаждения.

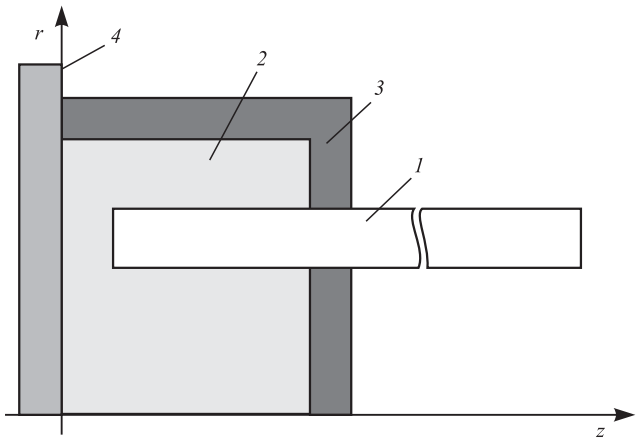


Рис. 1. Расчётная схема подогрева стенки трубы:
1 — стенка трубы (муфты); *2* — сменная насадка для подогрева; *3* — слой теплоизоляции; *4* — нагревательная пластина

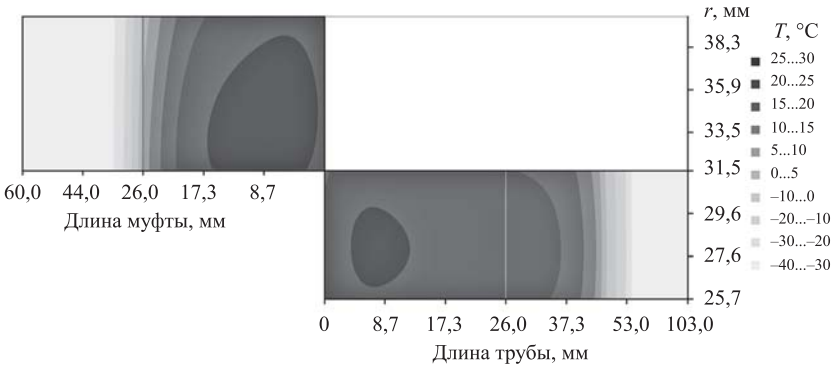


Рис. 2. Распределение температуры в стенках муфты и трубы после предварительного подогрева и охлаждения при температуре окружающего воздуха − 40 °С

На рис. 2 представлено распределение температуры в стенках муфты и трубы в конце подогрева продолжительностью 90 с для муфты и 60 с для трубы и последующего выравнивания температур продолжительностью 60 с. Таким образом, при температуре окружающего воздуха −40 °С в результате подогрева и последующего охлаждения на открытом воздухе в свариваемых участках трубы и муфты получили распределение температуры в допустимом для сварки интервале. Оплавление свариваемых поверхностей можно произвести в регламентированном режиме для допустимых температур.

Моделирование нагрева и охлаждения. При сварке полиэтиленовых труб в раструб свариваемые поверхности трубы и муфты оплавляются штатными сменными насадками сварочного аппарата. Внешняя свариваемая поверхность трубы оплавляется гильзой, а внутренняя поверхность муфты — дорном, устанавливаемыми на нагревательную пластину сварочного аппарата. При моделировании теплового процесса сварки полиэтиленовых труб в раструб можно исключить математическое описание теплового состояния сменных насадок, на рабочих поверхностях которых поддерживается неизменное распределение температуры независимо от температуры окружающей среды [6]. На рис. 3 приведена схема для расчёта температурного поля раструбного сварного соединения трубы с муфтой.

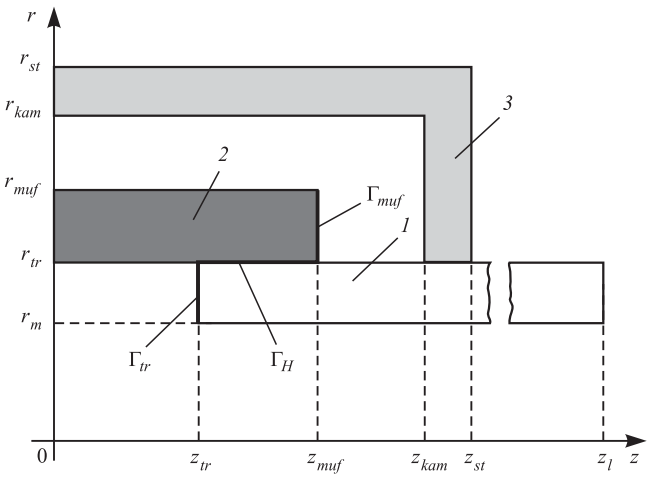


Рис. 3. Схема для расчёта температурного поля соединения полиэтиленовой трубы и муфты в раструб:
1 — стенка трубы; *2* — муфта; *3* — теплоизоляционная камера

При оплавлении и технологической паузе расчёт для муфты и трубы ведётся раздельно, задавая на свободных поверхностях условия конвективного теплообмена с окружающим воздухом и температуры сменных насадок в зонах оплавления. Нестационарное температурное поле при сварке полиэтиленовых труб в раструб описывается уравнением теплопроводности с учётом двухфазной зоны при плавлении и кристаллизации полимерного материала [7]:

$$\left(c(T) - \rho^{-} L^{100\,\%} \frac{dX_C}{dT}\right)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (r, z) \in D,\ 0 < t \leqslant t_m, \qquad (6)$$

где $L^{100\,\%}$ — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; X_C — степень кристалличности; $c(T) = \rho^{+}c^{+} + X_C(T)(\rho^{-}c^{-} - \rho^{+}c^{+})$, $\lambda(T) = \lambda^{+} + X_C(T)(\lambda^{-} - \lambda^{+})$; c^{-}, ρ^{-}, λ^{-} и c^{+}, ρ^{+}, λ^{+} — удельная теплоёмкость, плотность и теплопроводность для твёрдой и жидкой фазы материала трубы соответственно;

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^{\infty},\ T \leqslant T_1; \\ X_C^{\infty} - \dfrac{\int_{T_1}^{T} q(u)du}{L^{100\,\%} v_T},\ T_1 < T < T_2; \\ 0,\ T \geqslant T_2. \end{cases} \qquad (7)$$

Здесь $q(T)$ — зависимость теплового потока от температуры, отнесённая к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); T_1, T_2 — температура солидуса и ликвидуса соответственно; X_C^{∞} — максимальная степень кристалличности исследуемого полимерного материала; v_T — скорость изменения температуры.

Дифференцируя в функции (7) интеграл по переменному верхнему пределу, получим

$$L^{100\%}\frac{dX_C}{dT}=\begin{cases}0,\ T\leqslant T_1;\\ -\dfrac{q(T)}{v_T},\ \ T_1<T<T_2;\\ 0,\ T\geqslant T_2.\end{cases}\qquad(8)$$

Таким образом, зависимость эффективного коэффициента теплоёмкости от температуры, учитывающая теплоту фазового превращения полимерного материала, определяется по данным ДСК.

Распределение температуры в трубе и муфте в начальный момент времени известно:

$$T(r,\ z,\ t_p)=T_p(r,\ z).\qquad(9)$$

В режиме нагрева на оплавляемых поверхностях и торцах трубы и муфты задаются условия первого рода с температурой T_H:

$$T(r,z,t)=T_H,\ (r,z)\in\Gamma_{tr}\cup\Gamma_H\cup\Gamma_{muf}.\qquad(10)$$

В режиме технологической паузы на всех внешних поверхностях трубы и муфты $G=\partial D$ задаётся условие конвективного теплообмена:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_G=-\alpha(T|_G-T_0).\qquad(11)$$

В режиме охлаждения в зоне контакта внешней стенки трубы и внутренней поверхности муфты задаётся условие идеального теплового контакта:

$$\begin{gathered}\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{\Gamma_H}=\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{\Gamma_H},\ \ z_{tr}<z<z_{muf};\\ T(r_{tr}-0,\ z,\ t)=T(r_{tr}+0,\ z,\ t),\ z_{tr}<z<z_{muf}.\end{gathered}\qquad(12)$$

Учитывая низкую теплопроводность полиэтилена, примем, что на некотором удалении от зоны сварки температура трубы не изменяется на протяжении всего времени протекания процесса. Таким образом, на торце трубы задаётся условие

$$T(r,\ l,\ t)=T_0,\qquad(13)$$

на торце муфты —

$$T(r,\ 0,\ t)=T_0.\qquad(14)$$

На внутренней поверхности трубы при нагреве, паузе и охлаждении задаётся условие идеального теплового контакта с воздухом:

$$\begin{gathered}\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_1-0}=\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_1+0};\\ T(r_1-0,\ z,\ t)=T(r_1+0,\ z,\ t),\end{gathered}\qquad(15)$$

при $r=0$ условие ограниченности решения выглядит следующим образом:

$$\lim_{r\to 0}\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}=0.\qquad(16)$$

При всех режимах на неконтактирующей внутренней поверхности муфты задаётся условие конвективного теплообмена:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_{tr}}=-\alpha(T|_{r=r_{tr}}-T_0),\ 0<z<z_{tr}.\qquad(17)$$

На внешних неконтактирующих поверхностях трубы и муфты $G_1=\partial D/\Gamma_H$ происходит конвективный теплообмен с окружающим воздухом:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{G_1}=-\alpha(T|_{G_1}-T_0).\qquad(18)$$

Оплавление, технологическая пауза и приведение в контакт свариваемых поверхностей проводятся согласно регламентируемым нормативными документами временным параметрам [8].

Расчёты проводились при следующих данных: $r_m=25{,}7$; $r_{tr}=31{,}5$; $r_{muf}=40{,}0$; $z_{tr}=34{,}0$; $z_{muf}=60{,}0$; $z_l=134{,}0$ мм.

Охлаждение сварных соединений проводилось в теплоизоляционной камере. На рис. 4 приведено распределение температуры в сечении вертикальной плоскостью сварного раструбного соединения трубы и муфты, полученное в конце оплавления при температуре окружающего воздуха +20, −40 °С без и с предварительным подогревом. Как видно из расчётов, глубина оплавления муфты в середине раструба составила 2 и 1,2 мм при температуре окружающего воздуха +20 и −40 °С соответственно. После проведения предварительного подогрева и выравнивания глубина оплавления при нагреве становится одинаковой и составляет 2 мм.

Исследование динамики температурного поля при охлаждении сварного раструбного соединения показало значительное увеличение темпа охлаждения при температурах воздуха ниже нормативных (рис. 5, *б*). Для управления динамикой температурного поля на стадии охлаждения сварного соединения предлагается использование теплоизоляционной камеры с воздушной прослойкой.

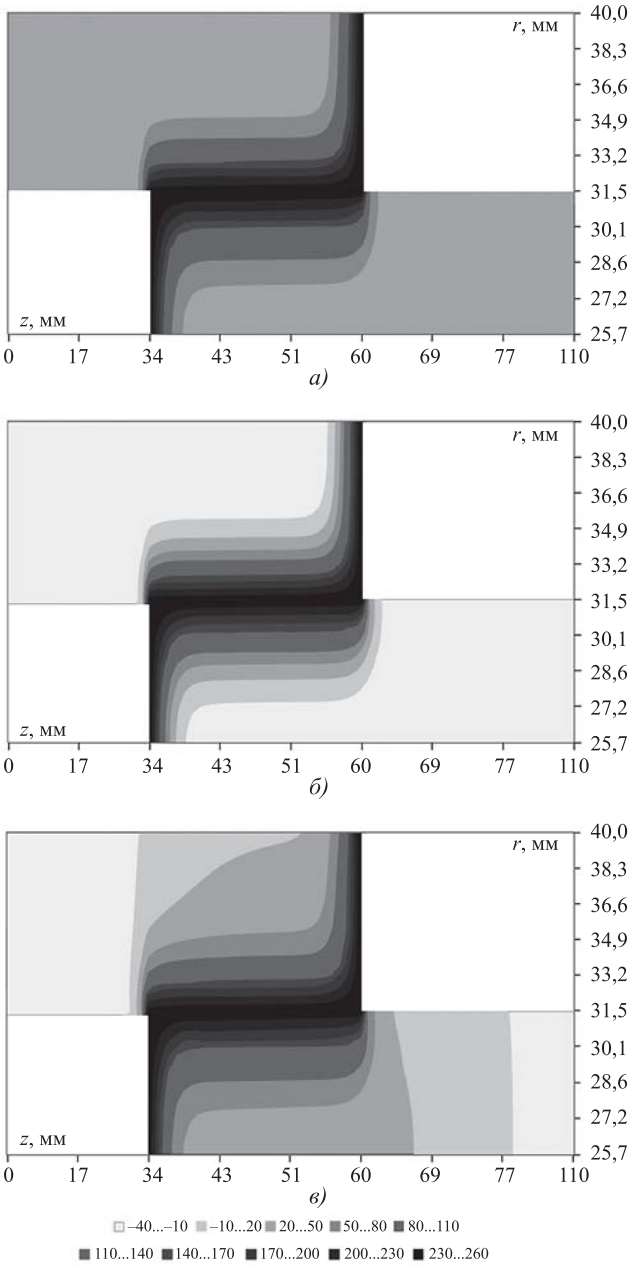


Рис. 4. Распределение температуры в стенках муфты и трубы при различных температурах окружающего воздуха:
а — 20 °С после оплавления по регламентированному режиму; *б* — − 40 °С после оплавления по регламентированному режиму; *в* — − 40 °С после предварительного подогрева, охлаждения и оплавления

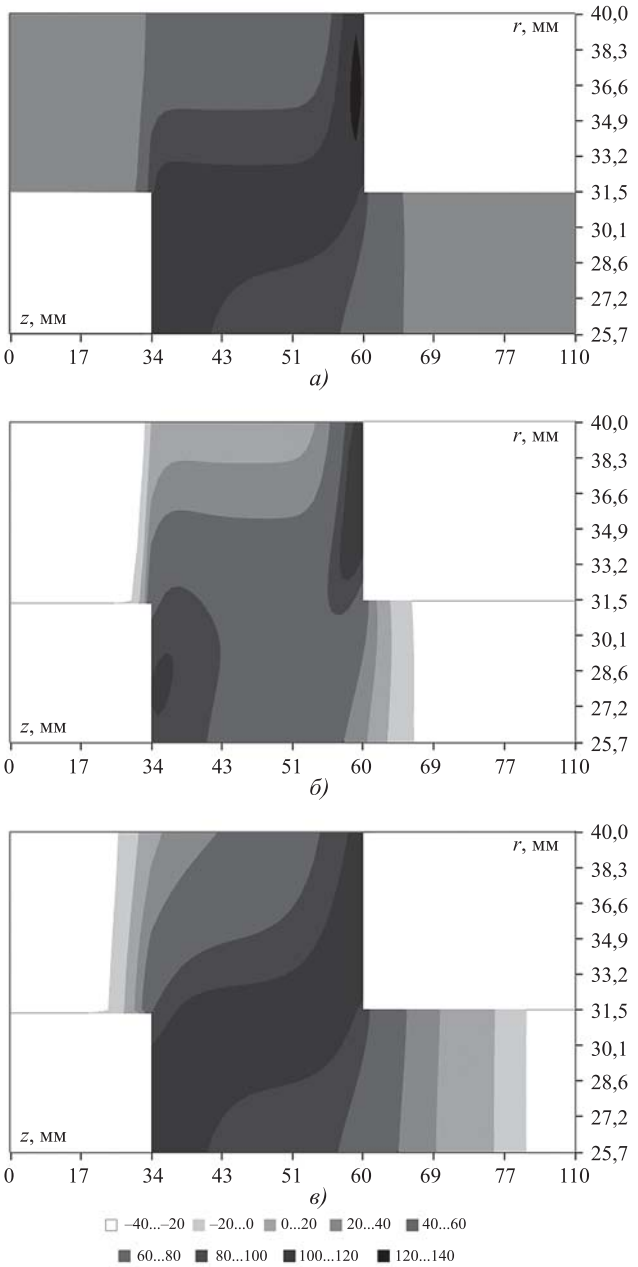


Рис. 5. Распределение температуры в стенках муфты и трубы при различных температурах окружающего воздуха:
а — 20 °С после оплавления по регламентированному режиму и охлаждения в течение 2 мин; *б* — −40 °С после оплавления по регламентированному режиму и охлаждения в течение 2 мин; *в* — −40 °С после предварительного подогрева, охлаждения, оплавления и охлаждения в теплоизоляционной камере в течение 2 мин

При охлаждении сварного соединения в теплоизоляционной камере с расчётной толщиной воздушной прослойки 2 см и стенкой камеры 1 см тепловой процесс протекает по закономерностям, близким к динамике температурного поля раструбной сварки при допустимых температурах (рис. 5, *в*). При такой динамике температурного поля будет сформирована структура материала сварного шва, обеспечивающая необходимую прочность соединения.

Выводы. Предложена методика расчёта продолжительности подогрева и выравнивания температур при сварке полимерных труб в раструб при низких температурах воздуха. Показана возможность регулирования скорости охлаждения раструбного сварного соеди-

нения путём варьирования размерами теплоизоляционной камеры.

Предлагаемые способы управления тепловым процессом при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур приводят к динамике температурного поля, при которой будет сформирована структура материала сварного шва, свойственная при сварке при допустимых температурах.

Работа выполнена в рамках государственного заказа Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 0377-2018-0001).

Библиографические ссылки

1. **СП 42-103—2003.** Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. 86 с.

2. **Кайгородов Г.К., Каргин В.Ю.** Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. 2001. № 2. С. 13—14.

3. **Старостин Н.П., Аммосова О.А.** Регулирование теплового процесса при сварке полиэтиленовых труб для газопроводов при низких климатических температурах // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 5. С. 21—27.

4. **Старостин Н.П., Аммосова О.А.** Моделирование теплового процесса сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 706—713.

5. **Старостин Н.П., Васильева М.А.** Оптимальная глубина паза сменной насадки для подогрева полипропиленовых труб в условиях низких температур // Новая наука: состояние и пути развития: междунар. науч. период. изд. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. Стерлитамак: АМИ, 2016. С. 165—167.

6. **Тихонов Р.С., Ботвин Г.В.** Изменение термограмм рабочих поверхностей сменных насадок для сварки полимерных труб в раструб при различных температурах воздуха: сборник статей по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак: АМИ, 2019. С. 105—108.

7. **Авдонин Н.А.** Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980. 180 с.

8. **СП 40-102—2000.** Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. М.: ФГУП ЦПП, 2001. 34 с.

Ссылка для цитирования

Старостин Н.П., Васильева М.А., Аммосова О.А. Управление нагревом и охлаждением при сварке полиэтиленовых труб в раструб в условиях низких температур // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 443—449.

УДК 621.311.001.57:681.51

А.К. Абд Эльрахим, В.А. Шихин, канд. техн. наук, доц.
(Национальный исследовательский университет «МЭИ»)

AAmin@mpei.ru

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Предлагается подход для оценки показателей эффективности функционирования микроэнергосистемы (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы (МАС). Введено унифицированное представление агентов, применимое к классу динамических систем, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей. Предложен подход к оценке эффективности функционирования как системы микрогрид в целом, так и отдельных её субъектов (агентов). Разработанная схема оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы является основой для оптимизации работы микрогрид в реальном времени. Схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определённым типам, а также с учётом оценок эффективности функционирования отдельных агентов во взаимосвязанной системе. В качестве типовых критериев эффективности рассмотрены технические, экономические и экологические критерии. Схема алгоритма оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной теплоэлектроснабжающей системы арктического анклава.

Ключевые слова: мультиагентная система; микрогрид; арктический анклав; эффективность микроэнергосистемы.

The approach for evaluation the performance indicators for a microenergy system (microgrid), represented as a multi-agent system (MAS) is proposed. A unified representation of agents is introduced, applicable to the class of dynamic systems formalized in the form of continuous, discrete, and discrete-event models. An approach to evaluation of performance indicators of the microgrid system as a whole and its individual subjects (agents) is proposed. The developed scheme for evaluating the performance of the micro-energy system is the basis for optimizing the microgrid operation in real time. The scheme allows you to formalize the integration process of the heterogeneous objective functions into uniform criteria for certain types, as well as taking into account the performance ratings of individual agents in an interconnected system. Technical, economic, and environmental criteria as typical performance criteria are considered. The scheme of the algorithm for the performance evaluation of the micro-energy system is based on the example of designing a hybrid-generating and environmentally safe heat and power supply system of the Arctic enclave.

Keywords: multi-agent system; microgrid; Arctic enclave; microenergy efficiency.

Введение. В последние годы мультиагентная форма представления многокомпонентных динамических систем находит всё большее применение [1—3], в том числе для исследования микроэнергосистем [4—6, 21], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п. Применение МАС-технологии в приложении к рассмотрению микроэнергосистем позволяет по-новому подойти к решению задачи создания систем с комбинированным централизованным и децентрализованным управлением.

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы можно связать с мультиагентным представлением исходной системы и предложить эффективные методы решения по оптимизации её функционирования.

Как известно, решение задач управления в сложных динамических системах, под которыми обычно понимаются системы высокой размерности, с наличием разветвлённой структуры с перекрёстными связями, наличием неопределённости различных типов, нелинейностей и др., связано с подходами на основе декомпозиции систем такого рода. В этом смысле МАС-технология предлагает именно такую декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов. Итак, применение мультиагентных подходов является перспективной технологией для управления и принятия решений в системах, где существуют распределённое управление и неопределённость, связанная с реализуемым каждым агентом законом управления, слабопредсказуемым поведением внешней среды, возможными потерями в полной наблюдаемости и управляемости объектами.

Следует отметить, что применение мультиагентного подхода позволяет более полно отразить наличие данных по отдельным субъектам (агентам) системы, что обусловливает возможность получения более обоснованных решений, ведущих к повышению эффективности функционирования как системы в целом, так и каждого агента в отдельности.

Микрогрид [5, 7] является разновидностью смартгрид, которой присущи следующие особенности:

объединение разнородных распределённых и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии (ВИЭ), накопителей энергии и разнотипных потребителей;

функционирование при гибридном энергоснабжении, обеспечение надёжного снабжения потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т. е. в автономном режиме;

комбинирование управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности в микроэнергосистеме, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети;

специфическое сочетание технологических, экономических, социологических и экологических показателей эффективности функционирования;

разнонаправленность и нестабильность потока энергии в сети микроэнергосистемы, что усложняет управление системой [8];

возможность совместной работы с системами внешнего энергоснабжения и автономность [4, 7, 9].

Формализация микрогрид в виде МАС. Автоматизация и оптимальное управление МАС является актуальной задачей не только в России, но и за рубежом. При этом используется термин «смартгрид» или «микрогрид». Мультиагентное представление может рассматриваться применительно к микроэнергосистемам в качестве удобного подхода к исследованию процессов взаимодействия субъектов (например, взаимодействие и связь процессов в технологической части системы с процессами на оптовом и розничных рынках электроэнергии). Агентами при этом являются такие субъекты, как разнотипные генераторы, накопители, управляющие центры, разнородные потребители и др., имеющие определённые степени автономии и взаимодействующие с другими субъектами системы в процессе функционирования. Примером таких микроэнергосистем являются обособленные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных районах (например, высокогорье), в районах Крайнего Севера и Арктики, островные системы, бортовые системы крупных судов и др.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, принятое в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность.

Предлагается набор агентов, отражающих основные субъекты микрогрид (табл. 1). Однако перечень агентов может быть расширен

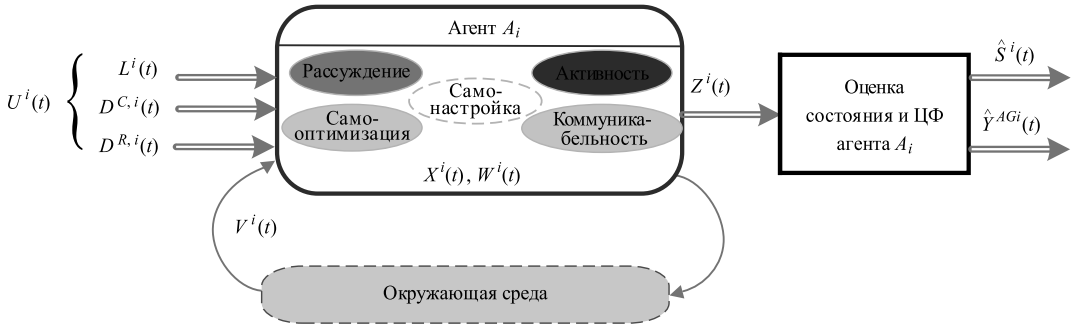


Рис. 1. Формализованное представление агента МАС:
$U^i(t)$ — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L — технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ — вектор входных команд; $D^{R,i}$— вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ — вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S(t)$ — вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность», а также показатели качества его функционирования Y^{AG}; $X(t)$ — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант); $W(t)$ — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»

Таблица 1

Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС микрогрид

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij1}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микрогрид, агент A_1	$F_{1,1}$ — ответственность за управление микрогрид; $F_{1,2}$ — отслеживание и планирование режимов распределённых и возобновляемых источников энергии; $F_{1,3}$ — прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ — прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ — стабилизация частоты в микрогрид; $F_{1,6}$ — обеспечение динамической устойчивости микрогрид	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ — ответственность за генерацию соответствующей СЭС
		6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ — ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Накопители энергии (НЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ — участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ — участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ — участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ — повышение динамической устойчивости микрогрид

Окончание табл. 1

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij1}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ — ответственность за внешнее по отношению к микрогрид электроснабжение; $F_{2,2}$ — приём излишков электроэнергии от микрогрид во внешнюю электросеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ — целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ — целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ — участие в регулировании мощности
3. Распределённые дизельгенераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ — ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ — сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределённые газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ — ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ — моделирование, тестирование режимов функционирования микрогрид

для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы. Например, для нано-грид (малая микроэнергосистема) необходимо учитывать инвертеры в качестве отдельного субъекта системы, поскольку они оказывают более значимое влияние на устойчивость и качество процессов [10].

На рис. 2 показаны основные агенты типовой микроэнергосистемы и их взаимосвязь в процессе функционирования системы. Термин «окружающая среда» при этом имеет рас-

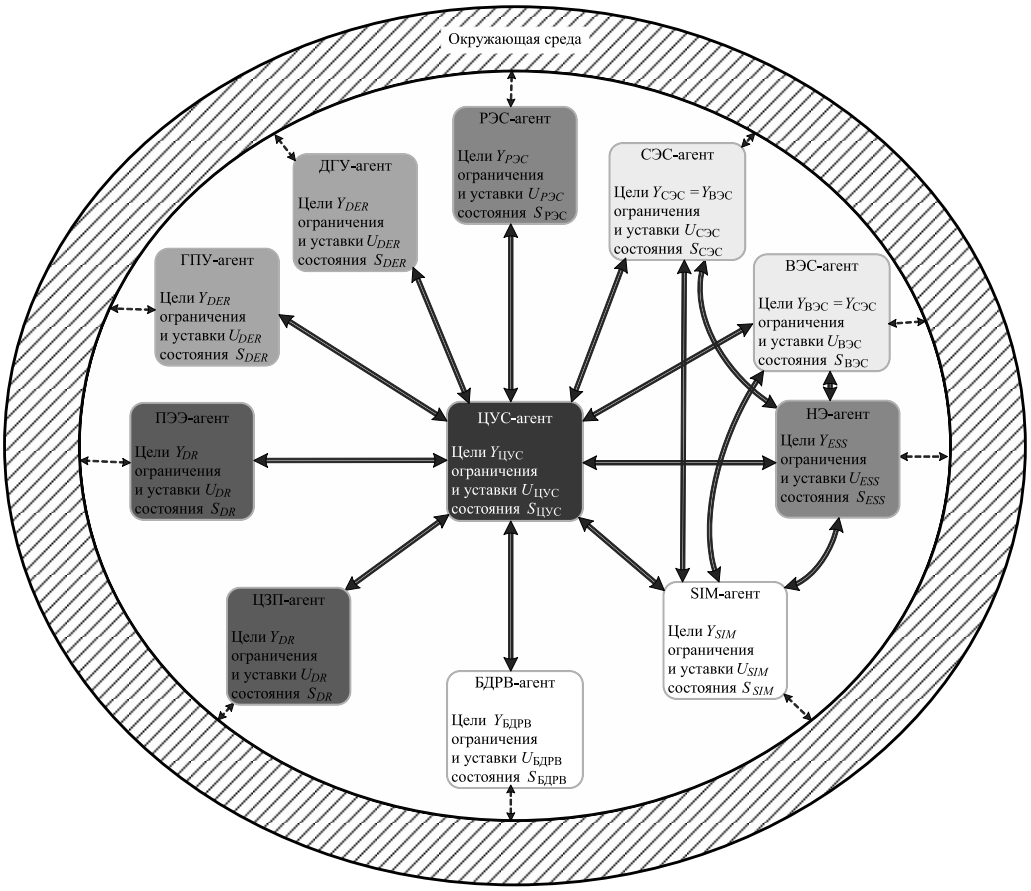


Рис. 2. Общая структура МАС микрогрид

ширенное толкование, включая взаимодействие микрогрид с внешними, в том числе техническими системами.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования микрогрид. Хотя большинство известных из литературы [11—14] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микрогрид формулируется в рамках однокритериальной постановки, а именно на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь, имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [15, 16]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства специалистов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, недопустимо [17]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Соответственно, особенностью данной работы является то, что с учётом мнения отраслевых экспертов предлагается подход к формулированию оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы и введением раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности. В то же время предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы представлены в табл. 2. На основе этих критериев были сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы (см. табл. 2).

Рассмотрим подробнее приведённые в табл. 2 критерии эффективности.

1. *Качество электроэнергии (КЭ).* Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144—2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы

Таблица 2

Критерии и показатели эффективности функционирования микроэнергосистемы

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на min или max	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
1. Качество электроэнергии (КЭ), Y_1^{SYS}	1.1. Отклонение частоты, $y_1^{SYS} \triangleq \Delta f$	Поддержание в заданных пределах Δf^+, Δf^-	1.1.1. f_{nom} — номинальная частота; 1.1.2. f — текущее значение основной частоты напряжения; 1.1.3. Δf^+, $\Delta f^- = \pm 0{,}2$ Гц	± 0,03 Гц
	1.2. Отклонение напряжения, $y_2^{SYS} \triangleq \Delta U$	Min	1.2.1. U_{nom} — номинальное напряжение; 1.2.2. U — текущее значение напряжения; 1.2.3. ΔU^+, $\Delta U^- = \pm 10$ %	Погрешность измерения длительности не должна превышать ±0,01 с
2. Экономический критерий (ЭК), Y_2^{SYS}	2.1. Стоимость генерируемой электроэнергии, $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Min	2.1.1. Стоимость топлива, C^F; 2.1.2. Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание, C^{OM}; 2.1.3. Плата/штрафы за выброс загрязняющих веществ, C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя, $y_4^{SYS} \triangleq PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3. Прибыль владельца микроэнергосистемы, $y_5^{SYS} \triangleq REV$	Max	2.3.1. Цена продажи электроэнергии, Pr^C; 2.3.2. Объём проданной электроэнергии, P^{MG}	5 %

Окончание табл. 2

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на min или max	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
3. Надёжность процесса электроснабжения, Y_3^{SYS}	3.1. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_6^{SYS} \triangleq$ CAIDI	Min	3.1.1. Суммарное время отключения потребителей, T_Σ; 3.1.2. Общее число отключений, OUT_Σ	1 %
	3.2. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_7^{SYS} \triangleq$ SAIDI	Min	3.2.1. Суммарное время отключения потребителей, T_Σ; 3.2.2. Общее количество потребителей, N_Σ	1 %
	3.3. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей, $y_8^{SYS} \triangleq$ SAIFI	Min	3.3.1. Общее число отключений, OUT_Σ; 3.3.2. Общее количество потребителей, N_Σ	1 %
4. Экологичность, Y_4^{SYS}	4.1. Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ), $y_9^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	4.1.1. Фактическое потребление топлива, M^{fuel}; 4.1.2. Количество выбросов углекислого газа от источников энергии, PO^{CO_2}	10 %
	4.2. Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота), $y_{10}^{SYS} \triangleq$ NOX	Min	4.2.1. Фактическое потребление топлива, M^{fuel}; 4.2.2. Количество выбросов оксидов азота от источников энергии, PO^{NOX}	10 %

качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [18], где указаны более 10 показателей, из которых выберем два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи):

отклонение основной частоты напряжения от номинального $\Delta f = f - f_{nom}$, которое связано прежде всего с дефицитом активной мощности и не должно превышать ±0,2 Гц в течение 95 % времени;

отклонение напряжения ΔU. Величины провалов и перенапряжений связаны с множеством факторов, в том числе с их случайным характером, учесть которые в компактном математическом выражении в общем случае не представляется возможным, но в первую очередь они связаны с соотношением активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения в сети определяется на основе сравнения значений напряжения общей шины U^{SYS} и опорного напряжения U_{ref}. Следовательно, $\Delta U = U_{ref} - U^{SYS}$.

2. *Экономический критерий (ЭК).* Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. *Надёжность процесса электроснабжения* Y_3^{SYS}. Надёжность процесса электроснабжения в микроэнергосистеме, как и для больших электрических сетей, оценивается с использованием нормативно установленных показателей. Возникновение технологических нарушений в элементах электрической сети и масштабы их последствий зависят от многих случайных факторов. Соответственно, исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Именно поэтому к настоящему времени накоплен отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики со следующими тремя категориями, соответствующими международной классификации показателей надёжности: CAIDI — индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта); SAIDI — индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа); SAIFI — индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [22].

4. *Экологичность* Y_4^{SYS}. Экологичность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO_2, NOX и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

Целевые функции агентов, связанных с ВИЭ. Рассмотрим в качестве примера генерирующие агенты микрогрид, представляющие возобновляемые источники энергии. Одна из важных особенностей подобного типа агентов заключается в том, что эти агенты по сравнению с распределёнными традиционными генерирующими установками (дизельные, газопрошневые) являются нестабильными и фактически неуправляемыми источниками в связи с неопределённостью и слабой предсказуемостью окружающей среды. Эти агенты при определённом соотношении мощностей генерирующих субъектов существенно влияют на процессы в микроэнергосистеме и в значительной степени определяют стабильность её работы (баланс мощности и частоты), но при этом выдаваемая ими мощность является слабо прогнозируемой.

Рассмотрим следующие агенты (см. табл. 1): солнечная электростанция (СЭС-агент); ветровая электростанция (ВЭС-агент); накопители энергии (НЭ-агент).

Отметим, что предлагаемые в работе целевые функции отдельных агентов соответствуют ранее приведённым критериям эффективности функционирования микроэнергосистемы. В табл. 3 перечислены критерии эффективности, входы и выходы для СЭС-, ВЭС- и НЭ-агентов.

СЭС-агент. Рассматривается солнечная электростанция, сконструированная на основе фотоэлектрических панелей, т. е. объединения фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов). Соответственно, СЭС-агент определяется как объединение множества фотоэлементов, системы управления, модели прогнозирования мощности и инвертора.

Целевая функция эффективности функционирования собственно СЭС-агента y_1^{AG}, соответствующая экономическому критерию Y_2^{AG}, определяется суммой из двух компонент:

$$y_1^{AG} \triangleq C_{\text{СЭС}}^{OP} T_{OP} + C_{\text{СЭС}}^{MNT} T_{MNT}, \qquad (2)$$

где $C_{\text{СЭС}}^{OP}$ — эксплуатационные расходы СЭС, включающие в себя страхование имущества, оплату труда, земельную ренту и амортизационные отчисления, руб.; $C_{\text{СЭС}}^{MNT}$ — расходы на ТО для СЭС, например, на очистку солнечных панелей, периодическое обслуживание и др., руб.

Надёжность функционирования СЭС определяется не только надёжностью работы оборудования, но и стабильностью выдачи мощности в качестве генерирующего субъекта микроэнергосистемы. Первый из указанных факторов связан с определёнными в соответствии с ГОСТ 27.002—2015 «Надёжность в технике. Термины и определения» [19] показателями, характеризующими надёжность работы оборудования. Следует отметить, что под надёжностью в этом контексте понимается комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения (эксплуатации) может включать в себя безотказность, ремонтопригодность, восстанавливаемость, долговечность или определённые сочетания этих свойств. Хотя в настоящее время появляются работы, связанные с особенностями толкования надёжности, например для киберфизических систем, к классу которых относится микрогрид [23, 24], будем руководствоваться ГОСТ 27.002—89 [25], где введено определение комплексного показателя надёжности в виде коэффициента готовности K_Γ, который количественно характеризует два основных свойства, составляющих надёжность — безотказность и ремонтопригодность. Для оценивания величины K_Γ в фиксированный момент времени в соответствии со стандартом [20] используется следующая статистическая характеристика:

$$\widehat{K}_\Gamma(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{pi}}{\sum_{i=1}^{n} t_{pi} + \sum_{i=1}^{n} t_{\text{в}i}}, \qquad (3)$$

где t_{pi} — i-й интервал времени исправной работы объекта; $t_{\text{в}i}$ — i-й интервал времени восстановления объекта; n — число отказов объекта.

Для СЭС важным показателем надёжности функционирования также является возможность стабильной выдачи мощности в течении определённых интервалов времени. В этой связи в качестве второй целевой функции по критерию Y_3^{AG} введём температурно-поправочный коэффициент выдачи мощности СЭС $\eta_{\text{СЭС}}$:

$$y_3^{AG} \triangleq \eta_{\text{СЭС}}(t). \qquad (4)$$

Коэффициент выдачи мощности СЭС зависит от множества факторов, среди которых основными являются выдаваемая мощность, солнечное излучение и температура.

Таблица 3

Входы и выходы агентов в соответствии с критериями эффективности функционирования

Агент, A_i	Критерии эффективности функционирования агента, Y_i^{AG}	Входы и выходы при анализе j-го критерия эффективности
5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция, СЭС-агент A_5	Экономический критерий Y_2^{AG}: y_1^{AG} — расходы на эксплуатацию и ТО	Входы: $U_1 = (L = P_{\max}^{\text{СЭС}}(t),\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_1 = (P^{\text{СЭС}}(t),\ T_{OP},\ T_{MNT})^T$ Параметры: $X_1 = (T_c,\ T_{\text{STC}},\ \beta_p,\ \eta_{\text{STC}},\ P_{\text{STC}},\ Cor_{\text{СЭС}},\ Or_{CM},\ T_{exp})^T$
	Надёжность работы Y_3^{AG}: $y_2^{AG} \triangleq K_{\Gamma}^{\text{СЭС}}$ — коэффициент готовности СЭС; $y_3^{AG} \triangleq \eta^{\text{СЭС}}$ — коэффициент выдачи мощности	Входы: $U_2 = (L = P_{\max}^{\text{СЭС}}(t),\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_2 = (P^{\text{СЭС}}(t),\ P_{k,k=\overline{1,n}}^{CM}(t),\ t_{pi}^{\text{СЭС}}, t_{\text{в}i}^{\text{СЭС}})^T$ Параметры: $X_2 = (T_c,\ T_{STC},\ \beta_{\text{р}},\ \eta_{\text{STC}},\ P_{\text{STC}},\ Cor_{\text{СЭС}},\ Or_{\text{СМ}},\ T_{exp})^T$
6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция, ВЭС-агент A_6	Экономический критерий Y_2^{AG}: y_1^{AG} — расходы на эксплуатацию и ТО	Входы: $U_1 = (L = P_{SIM}^{\text{ВЭС}},\ P_{ref}^{\text{ВЭС}},\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_1 = (P^{\text{ВЭС}},\ T_{OP},\ T_{MNT})^T$ Параметры: $X_1 = (C_p,\ \eta_{\text{ВЭС}},\ SA,\ P_{nom},\ v_{nom},\ v_{\min},\ v_{\max},\ Cor_{\text{ВЭС}},\ Or_{BT})^T$
	Надёжность работы Y_3^{AG}: $y_2^{AG} \triangleq K_{\Gamma}^{\text{ВЭС}}$ — коэффициент готовности ВЭС	Входы: $U_2 = (L = P_{SIM}^{\text{ВЭС}},\ P_{ref}^{\text{ВЭС}},\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_2 = (P^{\text{ВЭС}},\ P_{k,k=\overline{1,n}}^{\text{ВЭУ}}(t),\ t_{pi}^{\text{ВЭС}}, t_{\text{в}i}^{\text{ВЭС}})^T$ Параметры: $X_2 = (C_p,\ \eta_{\text{ВЭС}},\ SA,\ P_{nom},\ v_{nom},\ v_{\min},\ v_{\max},\ Cor_{\text{ВЭС}},\ Or_{BT})^T$
7. Накопители энергии, НЭ-агент A_7	Качество электроэнергии (КЭ) Y_1^{AG}: $y_1^{AG} \triangleq \Delta P$ — отклонение мощности	Входы: $U_1 = (L = P_{\min}^{\text{НЭ}},\ P_{\max}^{\text{НЭ}},\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_1 = (P^{\text{НЭ}}(t),\ SOC(t))^T$ Параметры: $X_1 = (E^{\text{НЭ}},\ V_{batt},\ I_{batt})^T$
	Экономический критерий Y_2^{AG}: y_2^{AG} — расходы на эксплуатацию и ТО, амортизационные отчисления	Входы: $U_2 = (L = P_{\min}^{\text{НЭ}},\ P_{\max}^{\text{НЭ}},\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_2 = (de_{(y)})^T$ Параметры: $X_2 = (E^{\text{НЭ}},\ V_{batt},\ I_{batt})^T$
	Надёжность работы Y_3^{AG}: $y_3^{AG} \triangleq K_{\Gamma}^{\text{НЭ}}$ — коэффициент готовности для НЭ	Входы: $U_3 = (L = P_{\min}^{\text{НЭ}},\ P_{\max}^{\text{НЭ}},\ D^C = Z^{\text{ЦУС}},\ D^R = Z^{\text{ЦУС}})^T$ Выходы: $Z_3 = (P^{\text{НЭ}}(t),\ SOC(t))^T$ Параметры: $X_3 = (E^{\text{НЭ}},\ V_{batt},\ I_{batt})^T$

Примечания: P — выдаваемая мощность, кВт; P_{ref} — запрос от ЦУС-агента на выдаваемую генерирующим субъектом мощность, кВт; P_{SIM} — прогнозируемая SIM-агентом мощность, кВт; $P_{\min}$, $P_{\max}$ — нижний и верхний пределы накопленной мощности НЭ соответственно, кВт; T_{OP} — период эксплуатации, ч; T_{MNT} — продолжительность технического обслуживания, ч; t_{pi} — i-й интервал времени исправной работы объекта; $t_{\text{в}i}$ — i-й интервал времени восстановления объекта; $T_{\text{с}}$ — температура солнечного элемента, °С; T_{STC} — температура солнечного элемента при стандартных условиях тестирования, °С; β_p — температурный коэффициент мощности солнечных модулей, %/°С; η_{STC} — эффективность солнечного элемента при стандартных условиях тестирования; P_{STC} — выдаваемая мощность солнечного модуля при стандартных условиях тестирования, кВт; $Cor_{\text{СЭС}}$ — местоположение СЭС; $Or_{\text{СМ}}$ — ориентация солнечных модулей; C_p — коэффициент использования энергии ветра; $\eta_{\text{ВЭУ}}$ — КПД ветрового генератора; SA — площадь лопастей (ометаемая площадь), м^2; P_{nom} — номинальная мощность, кВт; v_{nom} — номинальная скорость ветра, м/с; $v_{\min}$ — стартовая скорость ветра, м/с; $v_{\max}$ — максимальная скорость ветра, м/с; $Cor_{\text{ВЭС}}$ — местоположение ВЭС; $Or_{\text{ВТ}}$ — ориентация ветровых турбин; $E^{\text{НЭ}}$ — ёмкость аккумуляторной батареи НЭ, А·ч; V_{batt} — выходное напряжение аккумулятора, В; I_{batt} — ток нагрузки аккумулятора, А; de — деградация НЭ, %; SOC — уровень заряда НЭ, %

ВЭС-агент. Под ВЭС-агентом понимается ветроэлектрическая станция, включающая в себя ротор, генератор, контроллер и инвертор (основные компоненты).

Как и для СЭС-агента, экономический критерий функционирования ВЭС-агента включает эксплуатационные расходы $C_{\text{ВЭС}}^{OP}$ и расходы на техническое обслуживание $C_{\text{ВЭС}}^{MNT}$, которые можно представить в виде единой целевой функции y_1^{AG}.

Под надёжностью функционирования ВЭС понимается надёжность работы оборудования, в качестве показателя которой примем коэффициент готовности ветровой электростанции $K_{\Gamma}^{\text{ВЭС}}$, определяемый по формуле (3).

НЭ-агент. Рассмотрим в качестве накопителей электрической энергии литиевые аккумуляторы, которые благодаря их известным преимуществам в настоящее время широко применяются в микроэнергосистемах.

НЭ-агент играет важную роль в обеспечении качества электрической энергии в микрогрид, а именно в поддержании стабильной частоты путём сбалансирования активной

мощности в микроэнергосистеме. За показатель качества электроэнергии, выдаваемой накопителем, принимаем отклонение выдаваемой мощности $\Delta P^{\text{НЭ}}$ от соответствующей запрашиваемой мощности $P_{ref}^{\text{НЭ}}$, определяемой ЦУС-агентом:

$$y_1^{AG} \triangleq \Delta P^{\text{НЭ}} = P_{ref}^{\text{НЭ}}(t) - P^{\text{НЭ}}(t). \qquad (5)$$

При этом баланс мощности должен соответствовать:

$$P_{Gen}(t) = P_{Dem}(t) + P^{\text{НЭ}}(t);\ P_{\min}^{\text{НЭ}} \leqslant P^{\text{НЭ}}(t) \leqslant P_{\max}^{\text{НЭ}},$$

где $P_{Gen}(t)$ — генерируемая мощность, кВт; $P_{Dem}(t)$ — планируемый спрос электрической энергии, кВт; $P^{\text{НЭ}}(t)$ — мощность накопителей энергии, кВт; $P_{\min}^{\text{НЭ}}$, $P_{\max}^{\text{НЭ}}$ — нижний и верхний пределы мощности НЭ соответственно, кВт.

При оценивании экономического критерия НЭ вместе с эксплуатационными расходами $C_{\text{НЭ}}^{OP}$ и расходами на техническое обслуживание $C_{\text{НЭ}}^{MNT}$ необходимо также рассчитывать амортизационные отчисления, связанные с деградацией (*de*) аккумуляторной батареи $C_{\text{НЭ}}^{de}$. Указанные расходы предлагается представить в виде единой целевой функции y_1^{AG} (годовые расходы), определяемой следующим образом:

$$y_1^{AG} \triangleq C_{\text{НЭ}}^{OP} + C_{\text{НЭ}}^{MNT} + C_{\text{НЭ}}^{de}, \qquad (6)$$

где $C_{\text{НЭ}}^{OP}$ — годовые эксплуатационные расходы НЭ, руб.; $C_{\text{НЭ}}^{MNT}$ — годовые расходы на ТО для НЭ, руб.; $C_{\text{НЭ}}^{de}$ — амортизационные отчисления, пропорционально связанные с деградацией (*de*) аккумуляторной батареи, руб.

Отметим, что, с одной стороны, фиксированные отчисления связаны с тем, что у каждой аккумуляторной батареи есть определённый срок службы. С другой стороны, управляемые отчисления связаны с регулированием заряда/разряда аккумуляторной батареи. Например, большая глубина разряда может ускорить процесс старения и сократить срок службы аккумуляторной батареи.

Под надёжностью функционирования НЭ понимается надёжная работа батарей до тех пор, пока доступная ёмкость не уменьшится в результате её деградации до 80 % от номинальной. В качестве показателя надёжности функционирования НЭ примем коэффициент готовности накопителей электроэнергии $K_{\Gamma}^{\text{НЭ}}$ в соответствии с формулой (3).

Таким образом, предлагаемый подход даёт возможность оценивать эффективность как микрогрид в целом, так и отдельных агентов МАС по целому ряду разнотипных критериев, что позволяет формулировать оптимизационные задачи по обеспечению разноплановой эффективности функционирования микрогрид.

Пример оценки эффективности функционирования системы энергообеспечения арктического анклава. На рис. 3 показана общая

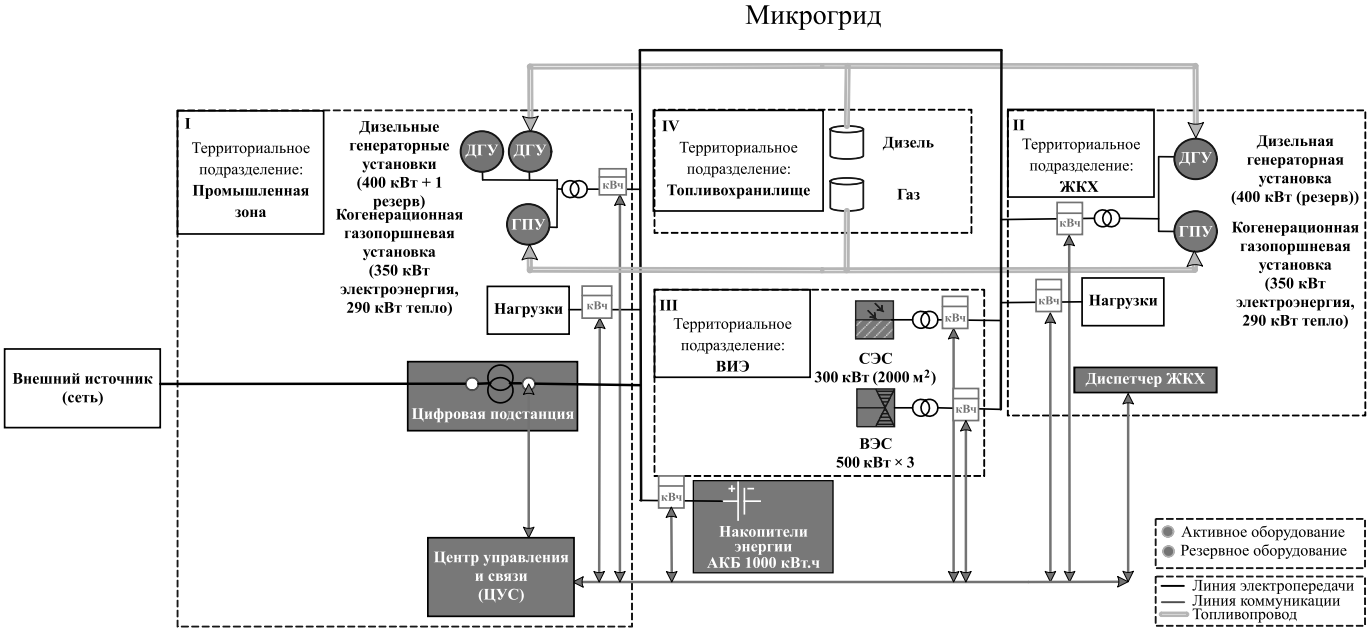


Рис. 3. Общая функциональная схема микроэнергосистемы для арктического анклава:
I — промышленная зона; II — жилищно-коммунальный комплекс; III — солнечная и ветровая электростанции; IV — топливохранилище

функциональная схема микроэнергосистемы, подготовленная в рамках НИОКР межведомственной комплексной целевой программы «Арктические технологии» по теме «Автоматизированный комплекс управления высоконадёжной гибридно-генерирующей и экологически безопасной теплоэлектроснабжающей микроэнергосистемой с высокими техноэкономическими показателями». Представленное на рис. 3 разработанное техническое решение может рассматриваться как базовое при использовании в задачах обеспечения надёжного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих объекты как промышленного строительства, так и жилой инфраструктуры. Вместе с тем предлагаемое решение с зависимой и независимой от поставок топлива генерацией тепла и электроэнергии применимо к любым труднодоступным зонам и может быть реализовано также при полном отсутствии магистральных линий электропередач.

Решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой пилотной микроэнергосистемы предлагается разбить на несколько этапов (рис. 4).

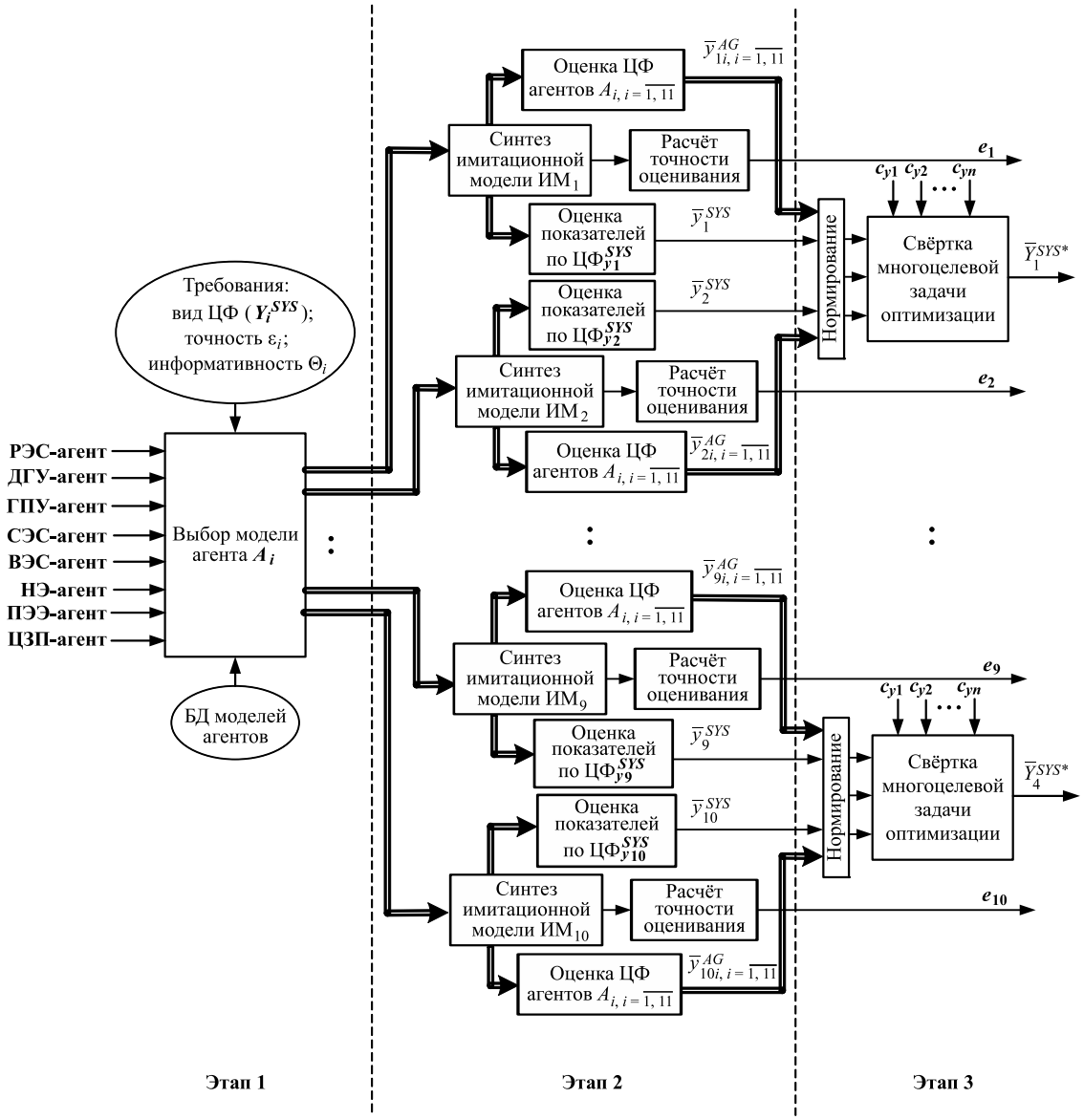


Рис. 4. Решение задачи оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы:
РЭС-агент — агент распределительной электрической сети; ДГУ-агент — агент дизель-генераторной установки; ГПУ-агент — агент газопоршневой установки; СЭС-агент — агент солнечной электростанции; ВЭС-агент — агент ветровой электростанции; НЭ-агент — агент накопителей энергии; ПЭЭ-агент — агент спроса потребителя; ЦЗП-агент — агент спроса ценозависимого потребителя; ε_i — точность модели агента A_i; Θ_i — информативность модели агента A_i; e_k — погрешность расчёта показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}; c_{yk} — весовой коэффициент показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}

На этапе 1 (см. рис. 4) решается задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности (см. табл. 2) и информативности:

$$\text{МО}^{A_i} \underset{\Theta_i}{\overset{\varepsilon_i}{\leftrightarrow}} y_j^{SYS}. \qquad (7)$$

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учётом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS}, $j = 1, 10$ из четырёх групп критериев, указанных в табл. 2.

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчётом точности оценивания e_j, что является важной выходной информацией. В синтезированной мультиагентной модели описания отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет произвести оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке (см. рис. 1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все четыре предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом (см. табл. 2) Y_k^{SYS}, $k = 1, 4$, а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG}, приведённых в табл. 3. Представленная на рис. 4 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

Выводы. Разработано унифицированное определение агента, применимое к классу динамических систем, которые представляют собой композицию из субъектов, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей и явлений.

Предложенная формализация на основе МАС позволила свести решение задач оценки эффективности функционирования микрогрид к анализу процессов, протекающих на уровне каждого агента, а затем к исследованию обобщённой математической модели микрогрид на основе моделей отдельных субъектов системы. Это даёт возможность связать важные параметры реального состояния микрогрид с числительными характеристиками критериев эффективности её функционирования — техническими, экономическими и экологическими.

Разработанная схема решения задачи оценивания эффективности микроэнергосистемы является основой для оптимизации работы микрогрид в реальном времени. Представленная схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных ЦФ в единые критерии по определённым типам, а также с учётом оценок эффективности функционирования отдельных агентов во взаимосвязанной системе.

Библиографические ссылки

1. **Leitao P., Marik V., Vrba P.** Past present and future of industrial agent applications // IEEE Trans. Ind. Inf. 2013. Vol. 9. No. 4. P. 2360—2372.

2. **Metzger M., Polaków G.** A survey on applications of agent technology in industrial process control // IEEE Trans. Ind. Inf. 2011. Vol. 7. No. 4. P. 570.

3. **Han J., Wang C.H., Yi G.X.** Cooperative Control of UAV Based on Multi-Agent System: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2013.

4. **McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci, F., Funabashi T.** Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1: Concepts, approaches and technical challenges // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. No. 4. P. 1743—1752.

5. **Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W.** Survey of multi-agent systems for microgrid control // Engineering applications of artificial intelligence. 2015. No. 45. P. 192—203.

6. **Shikhin V.A., Abd Elraheem A.K., Ren J.** Multi-Agent Approach for Real-Time Optimal Control of Electro Microgrid: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018. CFP18M35-ART, 144272 SCOPUS.

7. **Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J.** Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015. P. 139—144.

8. **SmartGrids** SRA 2035 — Strategic Research Agenda: European Technology Platform SmartGrids, European Commission, Tech. Rep., 2012. P. 20—27.

9. **Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M.B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C.** Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies: Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, 28—30 June 2016. P. 1—8.

10. **Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J.** Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids: IEEE Inter-

national Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017. P. 153—158.

11. **Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C.** Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response // Sustainability. 2018. No. 10. P. 847—872.

12. **Behnke R.P., Benavides C., Lanas F., Severino B., Reyes L., Llanos J., Saez D..** A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy // IEEE Trans. Smart Grid. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 996—1006.

13. **Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.** Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268—1276.

14. **Dulau L.I., Bica D.** Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703—708.

15. **Dehghanpour K., Nehrir H.** Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318—6327.

16. **Березовский В.С., Матюнина Ю.В., Цырук С.А.** Обеспечение повышенного уровня качества электроэнергии и надёжности электроснабжения на договорной основе // Энергетик. 2018. № 9. С. 17—19.

17. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей».

18. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2013.

19. **ГОСТ 27.002—2015.** Надёжность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.

20. **ГОСТ 27.204—83.** Надёжность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. М.: Изд-во стандартов, 1984.

21. **Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А.** Решение по мультиагентному представлению субъектов в задачах оптимального управления микроэнергосистемой // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 1 (73).

22. **Шихин В.А., Косинский М.Ю., Седлецкий Г.С.** Методологические подходы к анализу оперативной надёжности электросетевого комплекса с применением интеллектуальных моделей // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 23—30.

23. **Обычайко Д.С., Шихин В.А.** Методика формализации киберфизических систем в задачах анализа надёжности // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 414—421.

24. **Lei H., Sigh C., Sprintson A.** Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 2194—2202.

25. **ГОСТ 27.002—89.** Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990.

Ссылка для цитирования

Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А. Оценка показателей эффективности функционирования энергообъектов в мультиагентной микроэнергосистемы // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 449—460.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http://translit.ru/

УДК 621.0

В.А. Елисеев, д-р техн. наук, проф.
(Институт инновационно-технологического менеджмента, г. Москва)
dr.ye@mail.ru

ДОМИНАНТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Рассмотрены назначение, направленность и законодательная основа прогнозирования научно-технологического развития. Представлены доминанты действующего прогноза. Отмечаются общемировые и внутригосударственные тенденции, а также роль государства в прогнозировании научно-технологического развития страны. Изложены предполагаемые доминанты предстоящего прогнозирования научно-технологического развития.

Ключевые слова: прогнозирование; научно-технологическое развитие; доминанты; инновации.

Purpose, direction and legislative basis for forecasting scientific and technological development are considered. The current forecast dominants are introduced. Global and domestic trends are introduced as well as the role of the state in forecasting the country's scientific and technological development. The supposed dominants of the forthcoming forecasting of scientific and technological development are stated.

Keywords: forecasting; scientific and technological development; dominants; innovation.

Введение. К факторам отечественного прогнозирования научно-технологического развития кроме общемировых и внутригосударственных тенденций (в том числе внебюджетного финансирования) относится роль самого государства, его взаимосвязанной и иерархической системы органов управления экономикой. Из экономических функций государства (правительства) особо выделяется создание законодательной основы эффективного функционирования экономики, в которой научно-технологическое развитие — вектор современных модернизации и подъёма.

В 2011 г. распоряжением Правительства Российской Федерации утверждена Стратегия инновационного развития страны на период до 2020 г. [1], а Минэкономразвития России (которое в Национальной инновационной системе координирует федеральную и региональную инновационную политику, а также сферу коммерциализации результатов научной деятельности) презентовало программу «Инновационная Россия» [2]. Частью этой программы является утверждённый в 2014 г. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 г. (Прогноз-2030), который был разработан Минобрнауки России (координирует исследования и разработки) [3] и реализован методами тренда (экстраполяции), индивидуальных и групповых экспертных оценок, а также методом экономико-математического моделирования.

Прогноз-2030 касается перспективных рынков, продуктов и услуг, а также направлений научных исследований по приоритетным направлениям. В нём содержатся: оценка уровня и возможностей научно-технологического развития в сопоставлении с мировыми тенденциями; анализ и прогноз внешних условий и тенденций научно-технологического развития России; анализ макроэкономических, структурных и институциональных факторов её научно-технологического развития на долгосрочный период; прогноз технологического развития секторов (отраслей) экономики (в том числе по субъектам Федерации); направления отечественного научно-технологического развития и основные направления совершенствования научно-технической политики. При этом под функциями прогнозирования понимаются основы планирования, предвидение тенденций будущих изменений, оценка вариантов будущего развития, оценка возможных последствий принимаемых решений и коррекция результатов их выполнения.

Однако, во-первых, законодательством (поэтому и программой) предусмотрена разработка прогноза каждые 6 лет (на период 12 лет и более) [2—4] и, во-вторых, действие самой программы распространяется до 2020 г., т. е. в любом случае приближается срок предполагаемой разработки нового прогноза (или корректировки Прогноза-2030).

В качестве цели статьи представляется целесообразным рассмотреть доминанты действующего Прогноза-2030 и на его основе — предполагаемые доминанты нового прогноза Минобрнауки России, который предстоит

учесть при формировании программы «Инновационная Россия» Минэкономразвития России на этапный период после 2020 г.

Специфика законодательства в сфере прогнозирования научно-технологического развития на федеральном уровне. Прогнозирование — основа для государственного планирования и предвидения тенденций будущих изменений, его функции — оценка вариантов развития и возможных последствий принимаемых решений, коррекция результатов выполнения принятых решений.

Прогноз содержит систему обоснованных представлений о направлениях и ожидаемых результатах научно-технологического развития страны и её субъектов на долгосрочный период.

Прогнозирование научно-технологического развития относится к методологии стратегического планирования. Кроме прогнозирования научно-технологического развития к стратегическому планированию федерального уровня относится стратегический прогноз (табл. 1).

Таблица 1

Документы стратегического планирования, разрабатываемые в рамках прогнозирования на федеральном уровне (гл. 6) [4]

№ п/п	Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации (ст. 22)	Стратегический прогноз Российской Федерации (ст. 23)
1	Разрабатывается на основе решений Президента Российской Федерации каждые шесть лет на двенадцать лет и более федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере научной, научно-технической и инновационной деятельности, с учётом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, перечня критических технологий Российской Федерации и на основе данных, представляемых федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и Российской академией наук	Разрабатывается по поручению Президента Российской Федерации на двенадцать лет и более Правительством Российской Федерации с учётом данных, представляемых федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и Российской академией наук. Корректировка стратегического прогноза Российской Федерации осуществляется каждые шесть лет
2	Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации содержит: 1) оценку достигнутого уровня и возможностей научно-технологического развития Российской Федерации в сопоставлении с мировыми тенденциями; 2) анализ и прогноз внешних условий и тенденций научно-технологического развития Российской Федерации; 3) анализ макроэкономических, структурных и институциональных факторов научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочный период; 4) прогноз технологического развития секторов (отраслей) экономики, в том числе по субъектам Российской Федерации; 5) направления научно-технологического развития Российской Федерации и основные направления совершенствования научно-технической политики; 6) иные положения, определённые Президентом Российской Федерации и Правительством Российской Федерации	Стратегический прогноз Российской Федерации содержит: 1) оценку рисков социально-экономического развития и угроз национальной безопасности Российской Федерации; 2) поэтапные прогнозные оценки вероятного состояния социально-экономического потенциала и национальной безопасности Российской Федерации; 3) оптимальный сценарий преодоления рисков и угроз с учётом решения задач национальной безопасности Российской Федерации; 4) оценку конкурентных позиций Российской Федерации в мировом сообществе; 5) иные положения по решению Президента Российской Федерации или Правительства Российской Федерации
3	Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере научной, научно-технической и инновационной деятельности, обеспечивает координацию и методическое обеспечение разработки и корректировки прогноза научно-технологического развития Российской Федерации	Правительство Российской Федерации обеспечивает координацию и методическое обеспечение разработки и корректировки стратегического прогноза Российской Федерации
4	Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации утверждается Правительством Российской Федерации	Стратегический прогноз Российской Федерации рассматривается Советом Безопасности Российской Федерации
5	Порядок разработки и корректировки прогноза научно-технологического развития Российской Федерации определяется Правительством Российской Федерации	Порядок разработки, корректировки и утверждения (одобрения) стратегического прогноза Российской Федерации определяется Президентом Российской Федерации

В стратегическом планировании (при прогнозировании научно-технологического развития и при стратегическом прогнозировании) используются, как правило, методы тренда (экстраполяции), прямых инженерно-экономических расчётов, экономико-математический (экономико-математического моделирования), балансовый, системного анализа и синтеза, социально-экономического расчёта, экспертные — оценочные индивидуальные (подготовка доклада, описание сценария, интервью) и групповые (комиссий, Дельфи, «мозговой штурм» и др.), а также модели стратегического выбора, сетевые модели и методы.

Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации [2]:

является одним из основных документов системы стратегического планирования развития Российской Федерации;

определяет наиболее перспективные области развития науки и технологий, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ страны;

формирует единую платформу для разработки долгосрочных стратегий, целевых программ, а также прогнозных и плановых документов среднесрочного характера.

Прогноз научно-технологического развития страны (как Стратегический прогноз и Стратегия инновационного развития) — инструмент государственного управления, который способствует:

повышению результативности науки, инноваций и технологий, использованию их достижений в производственной деятельности;

росту инновационной активности организаций с различными формами и видами собственности;

созданию конкурентной среды, стимулирующей применение инноваций;

увеличению спроса на инновации с изменением его малоэффективной структуры.

Доминанты Прогноза-2030. В действующем с 2014 до 2020 г. Прогнозе-2030 определены наиболее перспективные области развития науки и технологий, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ страны.

Прогноз сформирован по следующим приоритетным направлениям (в каждом из которых выделены проблемы, угрозы и возможности развития, определены перспективные рынки, продукты и услуги, а также направления научных исследований): информационно-коммуникационные технологии, биотехнологии, медицина и здравоохранение, новые материалы и нанотехнологии, рациональное природопользование, транспортные и космические системы, энергоэффективность и энергосбережение [2].

В качестве «иных положений, определённых Президентом Российской Федерации и Правительством Российской Федерации» (табл. 1, п. 2.6) Прогноз-2030 содержит перечни критических технологий и приоритетные направления развития фундаментальной и прикладной науки. Для каждого приоритетного направления с учётом мировых тенденций:

выделены вызовы и окна возможностей, определяющие перспективы развития;

проведено ранжирование по степени общегосударственного влияния;

обозначены инновационные рынки и перспективные группы продуктов и услуг, появление которых возможно в средне- и долгосрочной перспективе под действием мировых тенденций;

установлены приоритеты перспективных научных исследований, необходимых для создания выделенных продуктов/услуг и ответов на вызовы с учётом окон возможностей.

При разработке прогноза использованы многие информационные источники, в числе которых аналитические исследования и прогнозы международных организаций, национальные прогнозы науки и технологий, прогнозы крупных корпораций и международных профессиональных ассоциаций, документы стратегического характера (отражающие долгосрочные перспективы развития российской экономики и её отдельных секторов), международные и российские базы научных журналов, патентной и статистической информации, материалы технологических платформ.

Экспертная база прогноза охватывает более 200 организаций (ключевых драйверов перехода к основанной на знаниях экономике) и более 2000 ведущих российских и зарубежных экспертов (включая представителей научных центров, вузов, бизнеса, инновационных территориальных кластеров). Прогноз согласован со всеми имеющими к нему отношение министерствами, с Федеральным космическим агентством и Российской академией наук. При этом:

поставлены задачи структурной диверсификации экономики на основе инновационного технологического развития (табл. 2), разработки и внедрения передовых технологий, технологической модернизации, повышения эффективности и снижения ресурсоёмкости, создания стимулирующей инновации конку-

Таблица 2

Целевые показатели инновационного развития России до 2020 г. [2]

Показатель	Значение, %
Доля предприятий, осуществляющих технологические инновации, от общего числа предприятий	40...50
Доля России на мировых рынках высокотехнологичных товаров и услуг	5...10 в 5...7 секторах
Удельный вес экспорта российских высокотехнологичных товаров в общемировом объёме	2
Валовая добавленная стоимость инновационного сектора в ВВП	17...20
Удельный вес инновационной продукции в общем объёме промышленной продукции	25...35
Внутренние затраты на исследования и разработки (% ВВП)	2,5...3 (из них более 50 % за счёт частного сектора)
Доля российских исследователей в общемировом числе публикаций в научных журналах	5
Количество патентов, регистрируемых за год российскими физическими и юридическими лицами в ЕС, США и Японии	Более 2500...3000

рентной среды и инфраструктуры поддержки инновационной деятельности, повышения инновационной активности бизнеса и предпринимательской активности; определены приоритетные направления развития отечественных науки, технологий и техники (с учётом приоритетов передовых зарубежных научных исследований), а также перечни критических технологий и технологических платформ;

созданы такие финансовые институты инновационно-технологического развития экономики, как Инвестиционный фонд, Внешэкономбанк, Российская венчурная компания, Российский инвестиционный фонд информационно-коммуникационных технологий, государственные корпорации; ширится процесс создания нефинансовых институтов (центров трансфера технологий, центров содействия эффективности, бизнес-инкубаторов, промышленных зон и технопарков, концессионных соглашений, особых экономических зон технико-внедренческой и промышленно-производственной ориентаций, информационно-технологических систем);

для производства конкурентоспособной продукции совершенствуются межотраслевые технологии (продуктовые и процессные инновации, профессиональные компетенции), взаимодействие и научно-техническая кооперация; циклы воспроизводства основных производственных фондов и реинвестирования экономического развития организаций учитывают мониторинг прогресса и проблем, партнёрство и инфраструктуру, функциональный механизм инновационных технологий и технологическую модернизацию;

в отечественном инновационном бизнесе практикуется многоукладность экономики и разнообразие моделей инновационного развития, стимулирование (в том числе налоговое) инвестиций в модернизацию технологической базы, проведение и коммерциализация результатов исследований и разработок; формируются условия для рыночной оценки интеллектуальной собственности, её использования в повышении капитализации организаций; упрощается оборот нематериальных активов, вовлекаются в экономическую деятельность созданные за счёт бюджетных средств объекты интеллектуальной собственности; усиливается инновационная направленность системы закупок для государственных нужд.

Предполагаемые доминанты предстоящего прогнозирования. При всей содержательности и качественности действующего Прогноза-2030 Минобрнауки России, как отмечалось, может потребоваться его корректировка вплоть до разработки нового прогноза как по причине окончания установленного 6-летнего срока действия, так и из-за завершения в 2020 г. срока действия программы «Инновационная Россия» Минэкономразвития России (включающей Прогноз-2030) и необходимости формирования программы на период после 2020 г. Тогда в интересах развития высокотехнологичных отраслей отечественной экономики определённо будут вновь объединены усилия государства, научного и образовательного сообщества, представителей бизнеса и зарубежных партнёров, а при дальнейших утверждении проблемно-ориентированных подходов и переходе к отечественной инновационной экономике нельзя не учесть следующее:

1) для мировых тенденций инновационного развития по-прежнему характерны ускорение научно-технического прогресса, увеличение затрат на исследования и разработки, глобализация экономических процессов с рисками инновационной деятельности, рост стоимости

объектов интеллектуальной собственности; при этом в большинстве стран ведущую роль играют частные компании, за их присутствие развёрнута межгосударственная и мирохозяйственная конкуренция, в результате которой, например, по объёму затрат на исследования и разработки (при соответствующей доле России) Китай догоняет США — их доля в общемировых расходах на НИОКР в 2019 г. составит 21,6 % против 25,18 % (см. рисунок);

2) чтобы из 50...70 стран-поставщиков ресурсов войти в представленные США, ФРГ и Японией инновационно-технологические лидеры (затратный вариант со значительными рисками), необходимо развивать и поддерживать национальные инновационную систему и технологии, расширять спрос на инновации в отраслях экономики страны, комплексно осуществляя:

стимулирование (в том числе налоговое) инвестиций в инновации с технологической доминантой, в модернизацию технологической базы, проведение и коммерциализацию результатов исследований и разработок;

создание конкурентной инновационно-технологической среды и условий для развития коммуникационных сетей и площадок; снижение административных барьеров для стартапов и развития инновационного бизнеса;

формирование условий для рыночной оценки интеллектуальной собственности и её использования для повышения капитализации организаций, упрощение оборота нематериальных активов, вовлечение в экономическую деятельность созданных за счёт бюджетных средств объектов интеллектуальной собственности;

выявление региональных детерминант инновационно-ориентированного развития и определение целевых индикаторов инновационно-территориальных кластеров;

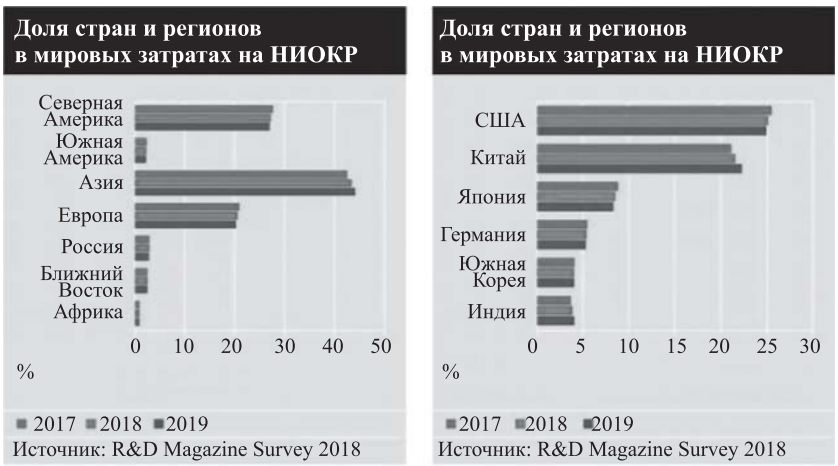
организацию инновационной направленности системы закупок для государственных нужд;

преодоление препятствий (на пути отечественного инновационно-технологического развития), связанных с инвестиционными и банковскими рисками, высокой инфляцией, несовершенством законодательства (из-за часто меняющихся законов и норм), отсутствием прозрачности бизнеса, с низким уровнем развития производства (включая высокую энергоёмкость, неликвидированные технологические разрывы и барьеры внедрения инноваций, удлинённый жизненный цикл инноваций) и низкими доходами основной массы населения;

совершенствование инновационной инфраструктуры (центров технологического трансфера, инновационно-технологических центров, технопарков, бизнес-инкубаторов, центров подготовки кадров для инновационной деятельности, венчурных фондов и пр.);

использование различных форм организации партнёрства и международного сотрудничества (создание совместных предприятий, экспорт средств производства и инжиниринговых услуг, участие в субконтрактах и распределении затрат, инвестирование в развитие инновационных технологий в стране-партнёре, франчайзинг в сфере инновационно-технологического предпринимательства, приглашение зарубежных специалистов и международных экспертов);

3) предлагается создание корпоративных акселератора и фондов (для достижения целей госкомпаний), «дорожной карты» перехода к инновационной экономике, а также комплексной межотраслевой программы (Национального «вытягивающего» проекта), включающей набор связанных проектов, направленных на модернизацию базовых отраслей экономики через внедрение современных технологий), чтобы параллельно интегрированными решениями госсектора и крупного отечественного бизнеса ликвидировалась «пропасть» между «генераторами» («поставщиками» инноваций) и



Мировые затраты на НИОКР в долях стран и регионов [5]

потребителями инноваций (федеральными покупателями), так как со стороны «генераторов» имеют место вывод разработок за рубеж, а со стороны потребителей — стимулы к потреблению импортных решений [6, 7].

Заключение. Общемировые и внутригосударственные тенденции, роль государства — основные доминанты состоявшегося и предполагаемого прогнозирования научно-технологического развития страны, а сам прогноз этого развития — инструмент государственного управления, способствующий:

повышению результативности науки, инноваций и технологий, использованию их достижений в производственной деятельности;

росту инновационно-технологической активности организаций с различными формами и видами собственности;

созданию конкурентной среды, стимулирующей применение инноваций с технологической доминантой;

увеличению спроса на технологические инновации с изменением его (спроса) малоэффективной структуры.

При фундаментально расставленных акцентах, глубине и широте охвата Прогноза-2030 на новом этапе федерального прогнозирования важно дополнительно определиться с критериями оценки мирового уровня исследований и разработок, со сравнительным соответствием отечественных НИОКТР зарубежным; стоит обратить внимание на качественно-количественные характеристики развития, на происходящие изменения конъюнктуры внешних и внутренних рынков, на региональную детерминанту инновационно-ориентированного развития.

Предстоящая миссия очередного прогнозирования повысит его результативность, если кроме многоаспектности исследования направлений и сценариев научно-технологического развития в отечественных отраслях экономики (с учётом влияния перспективного спроса на компетенции):

провести сравнительный анализ вариантов реагирования на передовые данные мониторинга технологий—продуктов—рынков—трендов (с рисками-угрозами геополитического и признаками мирового экономического кризиса, с одной стороны, и с наметившимися в отдельных развитых странах чертами освоения нового технологического уклада — с другой);

создать корпоративные акселератор и фонды для интегрирования решений госсектора и крупного отечественного бизнеса, разработать комплексную межотраслевую программу, включающую набор связанных проектов, направленных на модернизацию базовых отраслей экономики путём внедрения инновационных технологий;

создать условия для развития коммуникационных сетей и площадок.

Библиографические ссылки

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2011 г. № 2227-р «Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г.». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://base.garant.ru/70106124/ (дата обращения: 11.03.2019).

2. **Инновационное** развитие. Инновационная Россия — 2020. М.: Министерство экономического развития Российской Федерации, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://900igr.net/prezentacija/ekonomika/innovatsionnoe-razvitie-rossii-55145/innovatsionnoe-razvitie-5.html (дата обращения: 11.03.2019).

3. **Прогноз** научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Правительством Российской Федерации 3 января 2014 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380 (дата обращения: 11.03.2019).

4. **Федеральный** закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ (ред. от 31.12.2017) «О стратегическом планировании в Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449 (дата обращения: 11.03.2019).

5. **Мамедьяров З.А.** Деньги на новые технологии // Эксперт. 2019. № 6. С. 54—57.

6. **О развитии** инвестиционных инструментов в целях создания новых отраслей: материалы заседания Стратегического совета по инвестициям в новые индустрии. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. 17.02.2015 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/E.B.Kuznetsov.pdf (дата обращения: 11.03.2019).

7. **Национальная** технологическая инициатива. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nti2035.ru/nti/ (дата обращения: 11.03.2019).

Ссылка для цитирования

Елисеев В.А. Доминанты прогнозирования научно-технологического развития // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 461—466.

УДК 681.513

Ф.С. Фанг, канд. техн. наук, **Ч.Н. Хыонг,** канд. техн. наук, **Ф.С. Чыонг**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

truongpx@mta.edu.vn

АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены алгоритмические методы компенсации погрешностей навигационных систем летательных аппаратов. Представлены схемы алгоритмической коррекции инерциальной навигационной системы с помощью сигналов астрокорректора. Исследованы особенности использования алгоритмов коррекции инерциальных навигационных систем, алгоритмов оценивания, управления, комплексирования и прогнозирования. Даны рекомендации по применению алгоритмов самоорганизации и генетических алгоритмов для коррекции навигационных систем.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; модель ошибок; алгоритм оценивания; комплексирование; алгоритм самоорганизации; генетический алгоритм.

Algorithmic methods for compensating errors of aircraft navigation systems are considered. The algorithmic correction schemes of an inertial navigation system by using astrocorrector signals are introduced. The usage features of inertial navigation systems correction algorithms, algorithms for estimation, control, integration and forecasting are researched. Recommendations on the use of self-organizing algorithms and genetic algorithms for the correction of navigation systems are given.

Keywords: aircraft; inertial navigation system; error model; estimation algorithm; integration; self-organization algorithm; genetic algorithm.

Введение. Успешное решение задач управления летательными аппаратами (ЛА) во многом определяется уровнем развития измерительной техники. Эксплуатационные характеристики ЛА в большой степени определяются совершенством бортового оборудования, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов, используемых для управления. Источником информационно-измерительных сигналов о местоположении, ориентации, скорости и других параметрах движения являются различные измерительные системы и комплексы.

Информационные сигналы этих систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование причин возникновения погрешностей и последующую их компенсацию алгоритмическим путём.

В статье рассмотрены вопросы анализа и повышения точности алгоритмическим путём возвращающихся в атмосферу ЛА одноразового действия (баллистические ракеты), а также атмосферные ЛА многоразового действия.

Исследуемые типы летательных аппаратов. В настоящей работе основное внимание уделено ЛА одноразового действия, функционирование которых исследовано на атмосферном участке полёта. Возвращающиеся в атмосферу ЛА могут двигаться по баллистической траектории и траектории с планирующей фазой. Управление такими ЛА осуществляется за счёт аэродинамических сил.

Атмосферные ЛА одноразового действия. ЛА этого типа представлены семейством многообразных крылатых ракет. ЛА осуществляют полёт на основе данных о различных физических полях: радиолокационном, геомагнитном, оптическом. Для получения этой информации на борту ЛА могут быть установлены радиолокационные станции (РЛС), фотоаппаратура и др. Полученная информация сравнивается с априорной информацией в коридоре полёта с помощью корреляционно-экстремальной системы.

Возвращающиеся в атмосферу ЛА многоразового действия. Самыми известными ЛА этого класса являются аппараты типа «Шатл» или «Буран», способные функционировать в беспилотном режиме (X-37v, X-47 и др).

Возвращающийся в атмосферу ЛА одноразового действия. ЛА этого класса представлены стратегическими баллистическими ракетами. В настоящее время ракета «Титан-2»

снята с боевого дежурства, ракеты «Минитмэн-3» и «Поларис А3» используются для применения с подводных лодок по морским и сухопутным целям, «Поларис А3Т» — для поражения различных целей на удалении до 4625 км. Известны также другие ЛА этого типа — «Посейдон С3», MSBS и др., которые отличаются мощностью заряда, типом боевых частей, дальностью, максимальной скоростью и местом базирования.

Системы управления и измерительные комплексы этих типов имеют много общего. Управление ЛА исследуемых классов осуществляется на основе информации навигационного комплекса (НК) [1].

В состав НК включают гироскопические системы, различные РЛС и другие навигационные системы и системы ориентации. В соответствии с военными доктринами, принятыми в странах — изготовителях ЛА, в НК может быть использована система GPS/ГЛОНАСС.

НК является первоисточником ошибок при выполнении ЛА поставленных задач. Поэтому определение и последующая компенсация ошибок НК ЛА являются важной и актуальной задачей.

Погрешности автономных навигационных систем. Как правило, базовой системой НК является инерциальная навигационная система (ИНС) [1—3]. Погрешности ИНС можно разделить на два типа: методические и инструментальные [4, 5].

Методические погрешности ИНС обусловлены способом проведения измерений. К ним обычно относят ошибки, вызываемые, например, неточным знанием структуры и параметров гравитационного поля Земли и количественных характеристик её формы. Сюда же следует причислить погрешности, обусловленные упрощением алгоритмов. Обычно основная часть методических погрешностей успешно компенсируется.

К *инструментальным ошибкам*, возникающим вследствие погрешностей инерциальных датчиков и вычислительного устройства, относятся, например, случайный дрейф гироскопов, нестабильность масштабных коэффициентов датчиков момента гироскопов и акселерометров, погрешности передачи информации. Причиной других ошибок служат конструкционно-технологические факторы: погрешности выполнения посадочных баз под инерциальные датчики, а также нестабильность взаимного положения этих баз вследствие деформации карданова подвеса в поле силы тяжести или старения материала подвеса. Последняя группа ошибок обусловлена погрешностям начальной выставки, состоящими из неточности внешней информации и ошибок устройств ввода данной информации в ИНС.

Рассматривая реакцию автономной ИНС на определённые возмущающие факторы, можно сделать выводы о характере погрешностей ИНС.

Нулевой сигнал — это сигнал, который по каким-либо причинам появляется на выходе акселерометра, в то время как в действительности никакого ускорения нет. Этот сигнал обычно имеет небольшую величину, представляет собой колебания с периодом Шулера и может привести к значительным ошибкам.

В случае когда погрешность акселерометра изменяется пропорционально времени работы последнего, погрешность ИНС можно представить в виде нарастающей с течением времени составляющей и наложенной на неё синусоидой.

Погрешность ИНС в определении пройденного пути, обусловленная погрешностями первого интегратора, представляет собой синусоидальные колебания с частотой Шулера.

Доминирующее влияние на суммарную погрешность ИНС в определении пройденного пути оказывает скорость дрейфа гироскопов. Систематическая скорость дрейфа гироскопов вызывает нарастающую со временем составляющую погрешности ИНС, а также колебательную составляющую с периодом Шулера.

Нарастающая с течением времени скорость дрейфа обусловливает появление погрешности ИНС, которую также можно представить в виде двух составляющих. Первая составляющая изменяется пропорционально квадрату времени функционирования ИНС, а вторая — совершает колебания с периодом Шулера.

Погрешность ИНС, обусловленная неточностью выставки гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно плоскости горизонта, представляет собой синусоидальные колебания с периодом Шулера.

Суммарная погрешность ИНС в определении местоположения ЛА, обусловленная перечисленными факторами, нарастает с течением времени.

Рассмотрим уравнения погрешностей ИНС. Предполагается, что опорная система координат должна материализоваться посредством ГСП, а на самом деле из-за погрешностей оси акселерометров ориентированы по другим осям [2, 3].

В дискретной форме уравнения погрешностей ИНС имеют вид [1, 6]:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + w_{k-1};$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_{xk} & \delta V_{yk} & \alpha_k & \beta_k & \psi_k & \varepsilon_{xk} & \varepsilon_{yk} & \varepsilon_{zk} \end{bmatrix}^T;$$

$$w_{k-1} = \begin{bmatrix} B_x & B_y & 0 & 0 & 0 & w_{xk-1} & w_{yk-1} & w_{zk-1} \end{bmatrix}^T;$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & f_yT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & -f_xT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \frac{T}{R}\mathrm{tg}\varphi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где δV_x, δV_y — ошибки ИНС в определении скорости; φ_x, φ_y, φ_z — углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника; ε_x, ε_y, ε_z — скорости дрейфов ГСП; φ — широта местоположения; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести; f_x, f_y — горизонтальные ускорения объекта, на котором установлена ИНС; B_x, B_y — смещение нулей акселерометров.

Таким образом, уравнения ошибок ИНС в дискретной форме (1) используются при реализации алгоритмов коррекции НК.

Инструментальные погрешности можно разделить на погрешности акселерометров, интеграторов, гироскопов и ошибки выставки ГСП.

При функционировании ИНС на длительных интервалах времени погрешности могут достигать недопустимо больших величин. Поэтому необходимо корректировать ИНС посредством различных источников внешней навигационной информации либо компенсировать погрешности с использованием внутренних связей системы.

Методы алгоритмической коррекции навигационных систем. Алгоритмы компенсации погрешностей автономных ИНС за счёт внутренних связей системы широко известны [3, 6], часто применяются и детально разработаны. Вектор измерений в таких алгоритмах формируется на основе сигналов с датчиков углов прецессии. ИНС, снабжённые подобными алгоритмами, имеют остаточные погрешности, вызванные различными возмущающими факторами, соизмеримые с погрешностями, которые обусловлены динамическим дрейфом ГСП.

Таким образом, в случае когда предполагается автономная работа ИНС на всём интервале полёта ЛА, используются методы коррекции ИНС посредством только внутренней информации.

Наиболее полная компенсация погрешностей ИНС осуществляется с помощью алгоритмической обработки информации с ИНС и дополнительного внешнего по отношению к ИНС датчика навигационной информации. Компенсация погрешностей в выходной информации системы обычно осуществляется посредством алгоритмов оценивания. Хорошо известный фильтр Калмана теоретически позволяет получить оптимальную оценку вектора состояния системы. В практических приложениях используются прямые адаптивные модификации фильтра Калмана [7—10], позволяющие получать нерасходящиеся оценки погрешностей ИНС.

НК представляют собой некоторое количество систем и датчиков, в основу принципа действия которых положены различные физические закономерности. Эти системы объединены алгоритмически.

Традиционной схемой НК является ИНС, принятая за базовую систему, снабжённая несколькими датчиками внешней информации, алгоритмами комплексирования и оценивания. Алгоритмы комплексирования представляют собой методы обработки сигналов от используемых навигационных систем и датчиков [11]. Увеличение количества измерительных систем теоретически позволяет с большой точностью получить информацию о навигационных параметрах объекта. На практике же при использовании систем с различными точностными характеристиками и из-за несовершенства алгоритмического обеспечения точность определения навигационной информации снижается. Поэтому с помощью алгоритмов комплексирования выделяются системы, позволяющие получить наиболее достоверную информацию о навигационных параметрах ЛА, или в процессе совместной обработки сигналов с различных систем выделяется наиболее достоверная информация [11—13].

Точность корректируемых ИНС в значительной степени зависит от погрешностей внешнего источника информации.

Среди других навигационных систем наиболее точными являются астроинерциальные системы (АИНС) [6, 7]. Активное использование астронавигационных систем связано с разработкой систем наведения снарядов. В этих системах в качестве чувствительных элементов были использованы телескопы, которые направлены на заранее выбранные звёзды. АИНС состоит из ИНС с коррекцией на основе непосредственного измерения положения звёзд с помощью телескопа, установленного на ГСП.

Системы следящих телескопов были чрезвычайно громоздки, имели низкую помехозащищённость и использовались только для больших снарядов. Требование большого окна для обзора небесной сферы также является недостатком системы.

На современном этапе развития АИНС наиболее точной является система LN-120G, которая состоит из лазерных гироскопов, кварцевых акселерометров, приёмника спутниковой навигационной системы и астровизира с механическим приводом [7].

Исследуемая АИНС состоит из астрономической навигационной системы (АНС) (автоматического секстанта), установленного на ГСП ИНС, настроенной на период Шулера. В такой системе используются положительные качества ИНС — инвариантность к горизонтальным ускорениям и АНС — неограниченная дальность действия и высокая точность. Точность АНС не зависит от дальности полёта ЛА, поэтому она применяется в полярных и экваториальных областях. Недостатком ИНС является нарастание погрешностей в процессе функционирования, а АНС — отсутствие инвариантных свойств. В АИНС эти недостатки практически отсутствуют.

В современных АИНС погрешности ориентации осей ГСП, дрейфы гироскопов, смещение нуля акселерометров, дрейфы первого и второго интеграторов, а также погрешность астрокорректора оказывают влияние на точность определения навигационных параметров ЛА.

Доминирующим фактором, влияющим на точность АИНС, является систематический дрейф горизонтальных гироскопов. В работе [6] представлен способ уменьшения исследованных погрешностей АИНС путём выбора коэффициентов в канале коррекции.

Для наиболее полной компенсации погрешностей ИНС применяются различные схемы коррекции с использованием алгоритмов оценивания [14—16]. На рис. 1 представлена наиболее распространённая схема коррекции в выходном сигнале АИНС с помощью двух алгоритмов оценивания, в качестве которых использованы адаптивные фильтры Калмана [17—19].

В АО использованы модели изменения погрешностей x^a, x^Γ. На рис. 2 представлена схема коррекции АИНС с одним АО, в котором использована модель (1).

В условиях отсутствия информации от СНС используется схема коррекции АИНС, приведённая на рис. 3.

Точность корректируемой ИНС также зависит от ошибок используемого алгоритма, в частности, от адекватности математической модели погрешностей ИНС.

При функционировании ИНС на длительных интервалах времени без коррекции углы

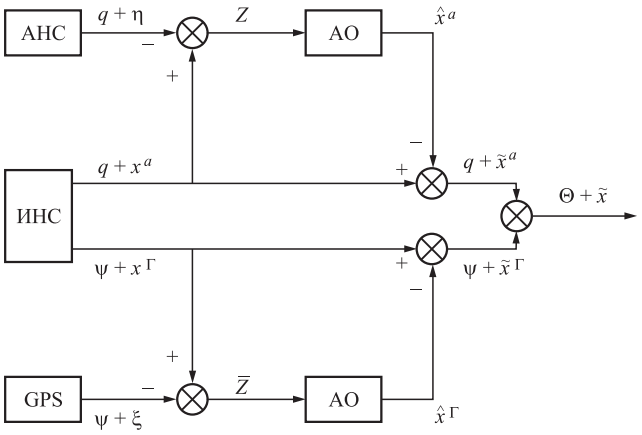


Рис. 1. Схема коррекции АИНС с двумя алгоритмами оценивания:

q, ψ — истинная навигационная информация; $Z, \bar{Z}$ — сумма погрешностей ИНС с АНС, ИНС с GPS; АО — алгоритм оценивания; x^a, x^Γ, η, ξ — векторы погрешностей; $\tilde{x}^a, \tilde{x}^\Gamma$ — ошибки оценивания; $\hat{x}^a, \hat{x}^\Gamma$ — оценки погрешностей АНС и GPS

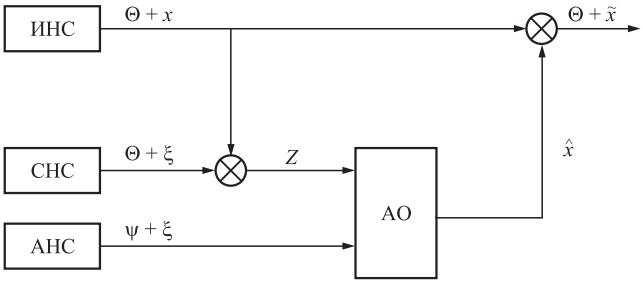


Рис. 2. Схема коррекции АИНС с одним алгоритмом оценивания:

ψ, Θ — истинная навигационная информация; ξ — вектор погрешностей СНС; Z — сумма погрешностей ИНС с СНС

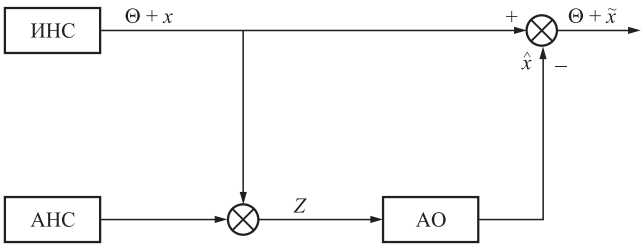


Рис. 3. Схема коррекции ИНС с внешним источником информации АНС:
Θ — истинная навигационная информация; Z — сумма погрешностей ИНС и АНС

отклонения ГСП нарастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. В этом случае применяют коррекцию ИНС в структуре системы посредством алгоритмов управления [6, 11].

Компенсация погрешностей в структуре ИНС, как правило, проводится с помощью адаптивных регуляторов [11, 12]. К недостаткам этого подхода следует отнести высокую чувствительность схемы к ошибкам оценивания погрешностей ИНС.

В условиях когда источники внешней информации отключены, проводится коррекция навигационных систем с помощью алгоритмов экстраполяции. С помощью этих алгоритмов осуществляется прогноз погрешностей навигационной системы. Затем спрогнозированные оценки погрешностей используются в известных схемах коррекции [20].

Для повышения точности функционирования ИНС в автономном режиме необходимо построить математическую модель ошибок ИНС в предшествующем корректируемом режиме, осуществить прогноз ошибок и использовать его в выходной информации для компенсации этих ошибок. Эту задачу целесообразно решать алгоритмическим путём на борту ЛА, так как этот путь позволяет получить эффект с наименьшими временными и материальными затратами, используя системы современного уровня точности. Реализация алгоритмов на борту ЛА в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) накладывает на них специфические требования. Основным ограничением является малый объём машинной памяти, отводимый под реализацию алгоритмов [21, 22].

Прогнозирующие модели широко используются в схемах коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних измерительных систем. При краткосрочном исчезновении выходных сигналов ИНС, GPS и других систем обычно используются априорные модели для прогнозирования полезного сигнала. Для ИНС могут быть использованы априорные модели. В условиях длительного отсутствия сигналов от внешних измерителей априорные модели с течением времени становятся неадекватными реальному процессу изменения погрешностей ИНС. Поэтому модели погрешностей ИНС необходимо строить в процессе функционирования ЛА. Методы построения моделей широко известны и отличаются по точности и объёму машинной памяти, необходимой для реализации в БЦВМ. Наиболее простыми методами построения моделей являются различные модификации линейных трендов [6, 23]. Более сложные методы позволяют построить высокоточные модели, но требуют большего времени и значительного объёма машинной памяти БЦВМ. К таким методам относятся разнообразные нейронные сети, алгоритмы самоорганизации и генетические алгоритмы [20—22].

Нейронные сети позволяют построить модели исследуемых объектов с довольно высокой точностью, но требуют при этом длительного времени для реализации процесса обучения. Метод самоорганизации может быть использован в условиях минимального объёма априорной информации, а также без учёта некоторых существенных факторов. Использование подхода самоорганизации возможно в условиях превышения (в несколько раз) помех по сравнению с полезным сигналом.

Возможность прогнозирования без учёта некоторых определяющих факторов объясняется тем, что в сложных системах факторы коррелированы между собой, следовательно, измерение одного фактора содержит информацию о других факторах, связанных с измеряемым.

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не выполнится заданное число поколений или какой-либо иной критерий останова. На каждом поколении генетического алгоритма реализуются отбор, кроссинговер и мутация. Использование только генетического алгоритма для решения задачи не эффективно, так как в этом случае поиск оптимального значения параметров аппроксимирующей функции производится недостаточно направленно.

Найти глобальный минимум в общем случае довольно трудно из-за наличия значительного количества локальных экстремумов. Такая задача требует значительных вычисли-

тельных затрат при практически полном переборе возможных решений с заданной точностью.

Таким образом, перечислены наиболее популярные классические методы построения моделей погрешностей ИНС.

Выводы. Рассмотрены концептуальные способы повышения точности навигационной информации алгоритмическим путём. Для коррекции автономных ИНС целесообразно использовать алгоритмы компенсации погрешностей с использованием информации с датчиков углов прецессии. В корректируемом режиме компенсация погрешностей ИНС осуществляется в выходном сигнале системы с использованием адаптивных алгоритмов оценивания.

При использовании на ЛА нескольких датчиков навигационной информации рекомендовано осуществлять селекцию измерительной информации с помощью алгоритмов комплексирования.

Компенсация погрешностей ИНС в автономном режиме на основе информации, полученной в предшествовавшем корректируемом режиме, осуществляется в выходном сигнале с помощью прогнозирующих моделей. При краткосрочном прогнозе используются априорные модели и линейные тренды. Для долгосрочного прогноза модели строятся на борту ЛА. Получение реализуемых в БЦВМ прогнозирующих моделей осуществляется с помощью алгоритмов самоорганизации, в ансамбль критериев селекции которых включены критерии простоты модели, представляющие собой предпочтение более компактной модели при близких значениях ансамбля критериев селекции, а также критерий выделения трендов, позволяющий выделять тренды различного уровня подробности.

При использовании генетических алгоритмов для упрощения процедуры построения модели применяется процедура мейоза, т. е. сокращение числа хромосом при делении. Однако такие алгоритмы используются только в условиях жёстких временных ограничений и обладают невысокой точностью.

Библиографические ссылки

1. **Андреев В.Д.** Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966. 579 с.

2. **Андреев В.Д.** Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 697 с.

3. **Неусыпин К.А.** Алгоритмические методы повышения точности автономных навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 2. С. 16—19.

4. **Агеев В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.

5. **Кузовков Н.Т., Салычев О.С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 225 с.

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

7. **Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е.** Принципы построения астроинерциальных систем авиационного применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 9—29.

8. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 320 с.

9. **Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Reserch scalar filtering algorithm with selforganization method for modeling control system // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 80—82.

10. **Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 1. P. 75—79.

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

12. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.

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

14. **Шэнь Кай, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2016. № 2. С. 28—39.

15. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритмов построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 6. С. 40—43.

16. **Неусыпин К.А., Фан Кэ, Шолохов Д.О.** Разработка алгоритма построения моделей с помощью метода самоорганизации для коррекции навигационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2010. № 3. С. 57—67.

17. **Неусыпин К.А., Лукьянов В.В., Нгуен Динь Тхай.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в условиях аномальных измерений // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 11. С. 21—26.

18. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—11.

19. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Разработка редуцированного алгоритма самоорганизации для коррекции навигационных систем // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 333—447.

20. **Ривкин С.С.** Методы оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах. Ч. 1, 2. Л.: Судостроение, 1973—1974.

21. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системах. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.

22. **Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Shen Kai.** Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Journal of Nanjing University of Science and Technology. 2014. Vol. 05. P. 602—607.

23. **Neusypin K.A., Shen Kai, Liu Rong Zhong.** Modification of nonlinear Kalman filter using self-organizing approaches and genetic algorithms // International Journal of Information Engineering. 2013. Vol. 03. P. 129—136.

Ссылка для цитирования

Фанг Ф.С., Хыонг Ч.Н., Чыонг Ф.С. Алгоритмы коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 467—473.

УДК 681.513

Ц. Ху, Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц., **М.С. Селезнева,** канд. техн. наук, доц., **К.А. Неусыпин,** д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ АЛГОРИТМОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены подходы к решению задачи параметрической идентификации в системах управления беспилотными летательными аппаратами малого класса при использовании математических моделей с неизвестными параметрами. Выбраны компактные алгоритмы параметрической идентификации, основанные на скалярном подходе. Работоспособность алгоритмов подтверждена методом математического моделирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; математическая модель; критерий идентифицируемости; идентификация параметров модели; компактный алгоритм идентификации.

Approaches to solving the problem of parametric identification in the control systems of small-class unmanned aircrafts using mathematical models with unknown parameters are considered. Compact parametric identification algorithms based on a scalar approach are selected. The efficiency of the algorithms is confirmed by the method of mathematical modeling.

Keywords: unmanned aircraft; mathematical model; identifiability criterion; identification of model parameters; compact identification algorithm.

Введение. Исследован беспилотный летательный аппарат (БЛА) малого класса, который используется для мониторинга подстилающей поверхности земли, в городских условиях в интересах МЧС России и пожарной охраны. К малому классу относятся БЛА китайской компании DJI и др.

Решение задач управления БЛА предполагает использование его математической модели. Математические модели, полученные на основе физических или каких-либо других законов, в практических приложениях, как правило, не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации [1—3] и построения моделей. Алгоритмы параметрической идентификации позволяют определить отдельные параметры матрицы модели, которая задана априори.

В процессе функционирования динамического объекта в меняющихся условиях некоторые параметры моделей могут существенно изменяться, поэтому их необходимо определять с помощью алгоритмов идентификации. Точность определения параметров модели зависит от свойств матрицы модели и точности алгоритма идентификации. Выбор используе-

мого алгоритма идентификации определяется исходя из возможностей реализации в имеющейся вычислительной технике (вычислителях) и особенностей проектируемого БЛА.

При совершении ЛА манёвров его модель становится неадекватной реальному процессу [8]. В связи с этим осуществлять эффективное управление не удаётся [9].

В условиях маневрирования БЛА априорные нелинейные модели становятся неадекватными реальному процессу [9, 11]. Построение высокоточных моделей возможно проводить с помощью алгоритмов самоорганизации, нейронных сетей (НС), генетических алгоритмов (ГА) и алгоритмов самоорганизации, например, метода группового учёта аргументов [12, 13]. Но такие алгоритмы требуют повышенной производительности спецвычислителя на борту БЛА, а также проверки устойчивости модели при использовании в контуре управления.

Упрощение бортовой реализации алгоритмов идентификации достигается с помощью параметрической идентификации моделей исследуемого процесса, например, применением метода наименьших квадратов [14], при этом точность идентификации снижается.

Таким образом, при маневрировании БЛА для сохранения адекватности его модели необходимо осуществлять её параметрическую идентификацию. Но реализация алгоритмов построения моделей требует повышенной производительности спецвычислителя, поэтому использовать их для повышения точности исследуемого класса БЛА не представляется возможным. Упрощение реализации алгоритмов идентификации с помощью скалярного подхода применяется только для линейных моделей. Для параметрической идентификации нелинейных моделей предложено использовать State Dependent Coefficient (SDC)-представление [15], позволяющее представить нелинейную модель в виде модели с линейной структурой. Однако этот подход имеет ограничения — он применяется только для моделей, представленных SDC-методом.

Для использования в системах управления БЛА малого класса используются алгоритмы параметрической идентификации, отличающиеся компактностью и легко реализуемые в спецвычислителе БЛА.

Критерии идентифицируемости. Прежде чем использовать какой-либо алгоритм идентификации, необходимо выяснить принципиальную возможность её проведения. Параметрическая идентифицируемость представляет собой возможность определения параметров математической модели системы по результатам измерения определённых выходных величин в течение некоторого интервала времени. Параметры, вектор которых в дальнейшем обозначается через **a**, отличаются от координат (вектор **x**) скоростью изменения. Параметры считаются медленно изменяющимися величинами, а в идеальном случае — постоянными ($\dot{a} = 0$).

Известны различные способы определения идентифицируемости модели. Например, способ, предложенный в работе [1], позволяет определить принципиальную возможность осуществления процедуры идентификации.

Модель линейной однородной системы имеет вид

$$\dot{x} = Ax, \tag{1}$$

где вектор состояния $x \in R^n$, $x_0 = x(0)$.

Линейная однородная система называется полностью идентифицируемой по вектору состояния, если при заданном векторе начальных условий x_0 матрица параметров A может быть однозначно восстановлена за конечный отрезок времени идентификации по одной временной последовательности $x = x(t)$. Необходимое и достаточное условие полной идентифицируемости пары (A, x_0) состоит в следующем:

$$\mathrm{Rank}[W_0] = \mathrm{Rank}[x_0, Ax_0, A^2x_0, \ldots, A^{n-1}x_0] = n,$$

где W_0 — матрица идентифицируемости.

Данный метод предполагает определение фундаментальной возможности идентификации параметров динамической системы.

Параметрическая идентификация применяется в тех случаях, когда структура математической модели системы известна априори, а информация о параметрах этой модели достоверно неизвестна. Определение неизвестных параметров осуществляется с помощью алгоритмов параметрической идентификации.

Исследование подходов к решению задачи идентификации динамических объектов. Алгоритмы построения моделей позволяют получить высокоточные математические модели исследуемых объектов, однако их использование для управления затруднительно, так как структура модели заранее неизвестна, а проверка устойчивости модели требует дополнительных исследований. Алгоритмы идентификации позволяют определить отдельные параметры модели, структура которой задана

априори. Точность определения параметров модели зависит от свойств модели и точности алгоритма идентификации. Выбор используемого алгоритма идентификации проводится исходя из возможностей реализации в вычислителе и имеющейся априорной информации о моделируемом объекте.

Класс используемых моделей выбирают на основе теоретического и экспериментального анализа объекта исследования с использованием общих закономерностей протекающих в нём процессов. С помощью экспериментального анализа проводятся количественная оценка объекта исследования и проверка соответствия ему выбранной модели [17—23].

Математические модели, полученные на основе физических или других законов, в практических приложениях не всегда точно отражают исследуемые процессы. Поэтому для уточнения структуры и параметров математической модели применяются различные алгоритмы идентификации и построения моделей. Алгоритмы построения моделей позволяют создавать модели исследуемых процессов с высокой точностью, но эти модели являются нефизическими, их структура заранее неизвестна, а в процессе построения она постоянно меняется. Также алгоритмы построения моделей при реализации требуют повышенной производительности вычислителя.

Точность определения параметров модели зависит от её свойств и точностных характеристик алгоритма идентификации. Выбор используемого алгоритма идентификации определяется исходя из возможностей реализации в имеющемся вычислителе, экономических возможностей и особенностей проектируемого БЛА.

Одним из способов решения для нелинейных динамических моделей является исследование процессов идентификации с помощью функционального полинома Вольтерра [1], где математическая модель выполнена в форме обтекаемых данных ввода-вывода. Идентифицированная модель «чёрного ящика» означает, что в ней нет исходной информации математической модели. В этом случае обработка идентификации определяется выбором структуры модели непараметрическими методами. В непараметрических методах задача идентификации заключается в определении не параметров, а некоторых функций, которые определяют всю модель. В этом случае известно, что уравнение линейной стационарной модели можно выразить с помощью линейного оператора Вольтерра [1, 16].

Линейные идентифицированные модели можно записать в общем виде в соответствии с функциональной теорией [1]. Следует отметить, что эта задача является очень трудной и сложной. Поэтому необходимо использовать некоторые специальные методы идентификации для простого процесса расчёта таких нелинейных систем, как «чёрный ящик». Уравнения ядер Вольтерра нелинейных моделей стационарных случайных тестируемых сигналов были получены в работе [1]. На практике применение этой вычислительной процедуры встречает технические трудности из-за больших размеров [8].

Задачу определения ядер Винера можно считать корректной, если на вход исследуемой системы подаётся идеальный белый шум. Но поскольку практически такой процесс не реализуем, возникает проблема выбора оптимальных параметров тестирующего сигнала, чтобы он воспринимался системой, как белый шум. Для разрешения этой проблемы необходима информация о соответствующих характеристиках системы.

Для получения уточнённых оценок ядер разработан алгоритм дифференцированного подхода к выбору оптимального частотного диапазона тестирующего сигнала [6]. Используя ортогональные функционалы Винера, можно получить адекватную модель за одну длинную реализацию. Результатом процедуры идентификации методом Винера являются наборы оптимальных ядер Винера, определяемые взаимокорреляционным методом [5].

В настоящее время для динамической идентификации параметров систем широко используются искусственные НС. Важным аспектом широкого применения НС является наличие сигнала, несущего как можно более полную информацию о процессах в системе.

Входом НС является выборка значений обобщённой координаты объекта управления, полученная задержкой задающего и управляющего сигналов по времени. В общем случае НС может обучаться как с учителем, так и без него. Коррекцию обучения можно осуществлять в процессе функционирования НС [4]. Из всего многообразия НС в данной задаче требуется использовать аппарат рекуррентных нейронных сетей, так как в задаче идентификации необходима обратная связь по выходу НС при обучении. К классу рекуррентных нейронных сетей, применимых для анализа динамических процессов, относятся следующие основные типы: рекуррентный многослойный персептрон, рекуррентная сеть Эль-

мана и рекуррентные сети специального вида. Сеть на основе рекуррентного многослойного персептрона используется для динамической идентификации нелинейных объектов с последующим использованием модели в управлении.

Другим подходом к построению модели является использование ГА многопараметрического поиска решений [1—4]. Эти методы позволяют построить высокоточные модели исследуемых процессов в условиях минимума априорной информации. Однако указанные алгоритмы построения моделей требуют большой производительности спецвычислителя.

ГА — это процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. Классический ГА включает: инициализацию, или выбор исходной популяции хромосом, оценку приспособленности хромосом в популяции, проверку условия остановки алгоритма, селекцию хромосом, применение генетических операторов, формирование новой популяции и выбор наилучшей хромосомы.

Оценивание приспособленности хромосом в популяции состоит в расчёте функции приспособленности для каждой хромосомы к этой популяции. Чем больше значение этой функции, тем выше качество хромосомы. Форма функции приспособленности зависит от характера решаемой задачи.

Генетические операторы в классическом ГА бывают двух основных видов: оператор скрещивания и оператор мутации. Лучшим решением считается хромосома с наибольшим значением функции приспособленности.

Подход самоорганизации может быть использован в условиях минимального объёма априорной информации, а также без учёта некоторых существенных факторов. Использование подхода самоорганизации возможно в условиях превышения (в несколько раз) помех по сравнению с полезным сигналом [7].

Адекватность выбранной математической модели определяется по минимуму критериев селекции. Удачно выбранные критерии селекции позволяют исключить лишние, случайные и неинформативные переменные состояния, определить их связи оптимальным образом [8].

Таким образом, рассмотрены наиболее популярные алгоритмы идентификации Винера и Вольтерра, НС, ГА и алгоритмы самоорганизации. Для применения в системах управления БЛА малого класса целесообразно использовать простые алгоритмы параметрической идентификации.

Идентификация параметров модели на основе скалярного подхода. Исследуем алгоритм параметрической идентификации на основе скалярного подхода [10]. Рассмотрим математическую модель исследуемого динамического объекта, которая имеет следующий вид:

$$x_k = \mathbf{\Phi} x_{k-1} + w_{k-1}, \tag{2}$$

где x_{k-1} — вектор состояния; w_{k-1} — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; $\mathbf{\Phi}$ — $(n \times n)$-матрица модели.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = \mathbf{H} x_k + v_k, \tag{3}$$

где z_k — m-вектор измерений; $\mathbf{H}$ — $(m \times n)$-матрица измерений; v_k — m-вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причём v и w некоррелированы между собой, т. е. $M\left[v_j w_k^T\right] = 0$.

Ставится задача оценить неизвестные постоянные параметры матрицы объекта $\mathbf{\Phi}$, которая входит в уравнение объекта (2). Уравнение измерений имеет вид (3).

Оценка вектора состояния x_1 при скалярном измерении z может быть определена следующим образом:

$$x_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H\Phi} \\ \mathbf{H\Phi}^2 \\ \dots \\ \mathbf{H\Phi}^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_1 \\ \mathbf{H} w_1 + v_2 \\ \mathbf{H\Phi} w_1 + \mathbf{H} w_2 + v_3 \\ \dots \\ \mathbf{H\Phi}^{n-2} w_1 + \dots + v_n \end{bmatrix} \right\}. \tag{4}$$

Уравнение измерений для $(n + 1)$-го момента времени имеет вид

$$z_{n+1} = \mathbf{H} x_{n+1} + v_{n+1}.$$

Вектор состояния x_{n+1} можно выразить через его значение в первый момент времени следующим образом:

$$x_{n+1} = \mathbf{\Phi}^n x_1 + \mathbf{\Phi}^{n-1} w_1 + \dots + w_n.$$

Подставив выражение для x_{n+1} в уравнение измерений z_{n+1} получим

$$z_{n+1} = \mathbf{H\Phi}^n x_1 + \mathbf{H\Phi}^{n-1} w_1 + \dots + \mathbf{H} w_n + v_n.$$

Подставим в это уравнение вместо x_1 его выражение, тогда

$$z_{n+1} = \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^n \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi} \\ \cdots \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ z_n \end{bmatrix} -$$

$$- \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^n \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi} \\ \cdots \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ \mathbf{H}w_1 + v_2 \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}w_1 + \mathbf{H}w_2 + v_3 \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-2}w_1 + \ldots + v_n \end{bmatrix} + \quad (5)$$

$$+ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-1}w_1 + \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-2}w_2 + \ldots + \mathbf{H}w_n + v_{n+1}.$$

Введём обозначения:

$$\left[a_1 a_2 \ldots a_n\right] = \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^n \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi} \\ \cdots \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-1} \end{bmatrix}^{-1}; \quad (6)$$

$$v_1^0 = b_1 w_1 + b_2 w_2 + \ldots + b_n w_n -$$
$$- a_1 y_1 - a_2 y_2 - \ldots - a_n y_n + v_{n+1} = \quad (7)$$
$$= \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^n \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi} \\ \cdots \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ \mathbf{H}w_1 + v_2 \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}w_1 + \mathbf{H}w_2 + v_3 \\ \cdots \\ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{n-2}w_1 + \ldots + v_n \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение (5) с учётом новых обозначений примет вид

$$z_{n+1} = \left[a_1 a_2 \ldots a_n\right] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdots \\ z_n \end{bmatrix} + v_1^0. \quad (8)$$

Таким образом, постановка задачи сводится к определению неизвестных элементов вектора-столбца $[a_1\ a_2\ \ldots\ a_n]$ по вновь сформированным измерениям (8). Уравнение можно переписать в следующем виде:

$$z_{n+1} = \left[z_1 z_2 \ldots z_n\right] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} + v_1^0. \quad (9)$$

Для $n + 2$, $n + 3$, ..., $2n$ моментов времени по аналогии можно записать уравнения для вновь сформированных измерений:

$$\begin{aligned} z_{n+2} &= \left[z_2 z_3 \ldots z_{n+1}\right] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} + v_2^0; \\ z_{n+3} &= \left[z_3 z_4 \ldots z_{n+2}\right] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} + v_3^0; \\ &\ldots \\ z_{2n} &= \left[z_n z_{n+1} \ldots z_{2n-1}\right] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} + v_n^0. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (10) можно записать в матричной форме и выразить вектор-столбец, состоящий из неизвестных параметров a_1, a_2, ..., a_n:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_n \\ z_2 & \cdots & z_{n+1} \\ z_3 & \cdots & z_{n+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ z_n & \cdots & z_{2n-1} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} z_{n+1} \\ z_{n+2} \\ \cdots \\ \cdots \\ z_{2n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_1^0 \\ v_2^0 \\ \cdots \\ \cdots \\ V_n^0 \end{bmatrix} \right\}.$$

Уравнение для вектора неизвестных параметров в скалярной форме будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} a_1 &= f_1(z_1, \ldots, z_{2n}) + v_1^{00}; \\ a_2 &= f_2(z_1, \ldots, z_{2n}) + v_2^{00}; \\ &\ldots \\ a_n &= f_n(z_1, \ldots, z_{2n}) + v_n^{00}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь

$$\begin{bmatrix} f_1(z_1, \ldots, z_{2n}) \\ f_2(z_1, \ldots, z_{2n}) \\ \cdots \\ \cdots \\ f_n(z_1, \ldots, z_{2n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_n \\ z_2 & \cdots & z_{n+1} \\ z_3 & \cdots & z_{n+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ z_n & \cdots & z_{2n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_{n+1} \\ z_{n+2} \\ \cdots \\ \cdots \\ z_{2n} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} v_1^{00} \\ v_2^{00} \\ \cdots \\ \cdots \\ v_n^{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_n \\ z_2 & \cdots & z_{n+1} \\ z_3 & \cdots & z_{n+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ z_n & \cdots & z_{2n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1^0 \\ v_2^0 \\ \cdots \\ \cdots \\ V_n^0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Поскольку параметры a_1, a_2, ..., a_n в постановке задачи постоянны, для каждого параметра a_i можно записать уравнение оценки в виде

$$\hat{a}_1^i = \hat{a}_0^i + k_1^i[f_i(z_1, \cdots, z_{2n}) - \hat{a}_0^i], \qquad (14)$$

где $\hat{a}_1^i$, $\hat{a}_0^i$ — оценки i-го параметра a в первый и нулевой моменты времени соответственно; k_1^i — оптимальный коэффициент усиления фильтра.

Представленный алгоритм фактически осуществляет оценивание вектора $[a_1\ a_2\ \ldots\ a_n]^T$, который связан с искомыми параметрами матрицы **Ф** уравнением (6).

Для определения коэффициентов a_1, a_2 необходимо сгладить измерительные шумы V_1, V_2, для чего можно использовать алгоритм оптимального сглаживания шумов:

$$\begin{aligned} \hat{a}_k^1 &= \hat{a}_{k-1}^1 + K_k^1(Z_k^{11} - \hat{a}_{k-1}^1); \\ \hat{a}_k^2 &= \hat{a}_{k-1}^2 + K_k^2(Z_k^{12} - \hat{a}_{k-1}^2), \end{aligned} \qquad (15)$$

где $K_k^1 = \dfrac{P_0^1}{kP_0^1 + r^1}$; $K_k^2 = \dfrac{P_0^2}{kP_0^2 + r^2}$.

После сглаживания $V(t)$ можно записать

$$\begin{aligned} a_k^1 &= \frac{t_k + T}{Tt_k} Z(t_k) - \frac{t_k}{T(t_k + T)} Z(t_k + T); \\ a_k^2 &= \frac{2}{Tt_k} Z(t_k) - \frac{2}{T(t_k + T)} Z(t_k + T), \end{aligned} \qquad (16)$$

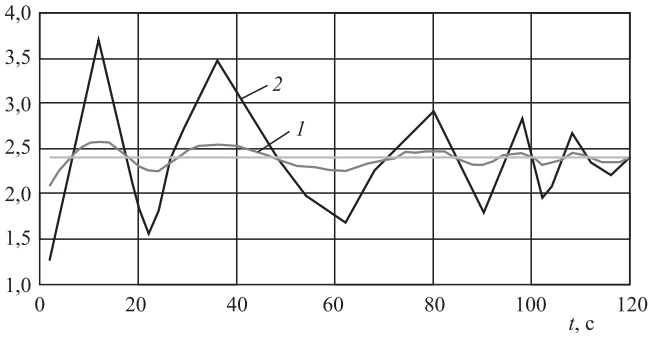
где P_0^1, P_0^2 — дисперсии оцениваемых параметров; r^1, r^2 — средние значения дисперсий приведённых измерительных шумов V_1, V_2.

Для сокращения времени сходимости необходимо выбрать Z_1, Z_2 таким образом, чтобы в соседних тактах оценивания эти измерения перекрывали друг друга, т. е.

$$\begin{aligned} \hat{a}_k^1 &= \frac{t_k + T}{Tt_k} Z(t_k) - \frac{t_k}{T(t_k + T)} Z(t_k + T); \\ \hat{a}_{k+1}^1 &= \frac{t_{k+1} + T}{Tt_{k+1}} Z(t_k + T) - \frac{t_{k+1}}{T(t_{k+1} + T)} Z(t_k + 2T); \\ \hat{a}_{k+2}^1 &= \frac{t_{k+2} + T}{Tt_{k+2}} Z(t_k + 2T) - \frac{t_{k+2}}{T(t_{k+2} + T)} Z(t_k + 3T), \end{aligned} \qquad (17)$$

где $t_{k+1} = t_k + T$, $t_{k+2} = t_k + 2T$, $t_{k+3} = t_k + 3T$.

После того, как оценки $\hat{a}_1, \hat{a}_2$ получены, можно определить искомые конкретные параметры модели.



Результаты математического моделирования скалярного алгоритма идентификации:
1 — оценка параметра с помощью скалярного алгоритма идентификации; *2* — оценка параметра при использовании алгоритма сглаживания

Для сокращения вычислений при идентификации параметров модели целесообразно не использовать алгоритм сглаживания, а осуществлять простое осреднение Z: на интервале $O_1(O_n)$ до T_3 для Z_1 и от T_1 до T_3 для Z_2:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{N}\sum_{0}^{T_3}[Z(t) - Z^*]; \\ Z_2 &= \frac{1}{N}\sum_{T_1}^{T_3}[Z(t) - Z^*]. \end{aligned} \qquad (18)$$

Результаты моделирования процесса идентификации параметра тестовой модели представлены на рисунке. Постоянный параметр модели a_1 идентифицирован с помощью скалярного алгоритма и алгоритма со сглаживанием.

Точность параметрической идентификации при использовании алгоритма со сглаживанием в среднем на 5 % выше, чем точность идентификации посредством скалярного алгоритма.

Заключение. Исследованы алгоритмы идентификации параметров матрицы модели БЛА малого класса. В условиях ограничения вычислительной мощности выбраны компактные алгоритмы параметрической идентификации, основанные на скалярном подходе. Работоспособность компактных алгоритмов идентификации подтверждена результатами математического моделирования.

Библиографические ссылки

1. **Балонин Н.А.** Теоремы идентифицируемости. СПб.: Изд-во «Политехника», 2010. 48 с.

2. **Балакришнан А.В.** Теория фильтрации Калмана: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 168 с.

3. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. изд. / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.

4. **Балонин Н.А., Попов О.С.** Критерии идентифицируемости линейных стационарных и нестационарных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 1994. № 1. С. 22—27.

5. **Грицюк В.И., Петров Э.Г., Овезгельдыев А.О.** Анализ и развитие модифицированных рекуррентных алгоритмов наименьших квадратов для оценки параметров, изменяющихся во времени // Кибернетика и системный анализ. 1996. № 4. С. 123—129.

6. **Дашевский В.П., Бизин М.М.** Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов // Управление, вычислительная техника и информатика. Доклады ТУСУРА. 2015. № 3 (37). С 91—96.

7. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985.

8. **Лукьянова Н.В.** Модульный метод моделирования с использованием разложения Винера // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 17—22.

9. **Льюнг Л.** Идентификация систем: Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 431 с.

10. **Неусыпин К.А.** Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации // Автоматизация. Современные технологии. 2009. № 1. С. 37—39.

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

12. **Неусыпин К.А., Кэ Фан, Шолохов Д.О.** Разработка алгоритма построения моделей с помощью метода самоорганизации для коррекции навигационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2010. № 3. С. 57—67.

13. **Панченко Т.В.** Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2007. 87 с.

14. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л**. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.

15. **Салычев О.С.** Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.

16. **Цибизова Т.Ю.** Идентификация нелинейных систем автоматического управления при помощи фильтров Вольтерра // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 14). С. 3070—3074.

17. **Bittanti S., Campi M.** Adaptive RLS identication of time-varying parameters when is the error bounded? // Proc. 10th Symp. IFAC on System Identication. Copenhagen, 1994. Vol. 2. P. 663—668.

18. **Dasgupta S., Anderson B.D**. Parametrization for the closed-loop identication of non-linear time-varying systems // Automatica. 1996. Vol. 32. No. 10. P. 1349—1360.

19. **Fuente M.J., Vega P.A.** Comparison of identication algorithms for rapidly time-varying parameters on a real process // Proc. 5th Symp. IFAC Adapt. Systems in Control and Signal Proc. Budapest, 1995. Vol. 1. P. 131—136.

20. **Haupt R.L., Haupt S.E.** Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 253 p.

21. **Havlena V., Stecha J., Kraus F.J.** Decision and approximation based algorithms for identication with alternative models // Proc. 13th World Congr. IFAC. San-Francisco, 1996. Vol. I. P. 273—278.

22. **Wang L.Y.** Persistent identication of time-varying systems // IEEE Trans. Autom. Control. 1997. Vol. 42. No. 1. P. 66—82.

23. **Young P.C.** A general approach to identication, estimation, and control for a class of nonlinear dynamic systems // Identication in Engineering Systems. Proc. Conf. Swansea, U.K., 1996. P. 436—445.

Ссылка для цитирования

Ху Ц., Лукьянова Н.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка компактных алгоритмов параметрической идентификации для беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 473—479.

Уважаемые читатели!

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

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Разработка и экспериментальное исследование поршневой гибридной энергетической машины с газовым объёмом на всасывании. *Вестник машиностроения.* 2019. № 4.

Рассмотрены перспективная конструкция поршневой гибридной энергетической машины объёмного действия с газовым объёмом на всасывании и конструкция экспериментального стенда для изучения характеристик экспериментального образца поршневой гибридной энергетической машины объёмного действия. Приведены результаты эксперимента по проверке работоспособности и изучению режимов работы поршневой гибридной энергетической машины объёмного действия.

Имитационное моделирование процесса виброперемешивания при приготовлении и восстановлении технологических жидкостей. *Вестник машиностроения.* 2019. № 4.

Представлено теоретическое обоснование нового способа управляемого виброперемешивания многокомпонентных технологических жидкостей, применяемых в машиностроении. Показаны результаты имитационного моделирования в программе FlowVision традиционного и вибрационного процессов перемешивания жидких технологических сред.

Методика расчёта параметров правки листового проката на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра. Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 4.

Разработан новый способ правки листового проката, имеющего различное отклонение от плоскости листа по его длине. Проведён расчёт геометрических и силовых параметров очага деформации при правке листа на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра. Расчёты показали, что при увеличении силы правки от 20 до 100 кН максимальный прогиб листа составляет 1,7...5,5 мм. Сравнение результатов расчёта с данными эксперимента показало, что различие не превышает 10...20 %, что свидетельствует об адекватности модели и о возможности её практического использования для расчётов параметров правки листового проката путём изгиба на роликовой правильной машине с различными диаметрами роликов.

Методика выбора температурно-временных режимов двухступенчатой низкотемпературной цементации зубчатых колёс привода агрегатов двигателей внутреннего сгорания. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 4.

Приведена методика, по которой можно осуществлять выбор режимов двухступенчатой цементации с учётом условий эксплуатации детали, характера и величины действующих нагрузок, назначенных показателей качества цементованного слоя. В зависимости от характера и степени нагружения цементованного слоя предложено зубчатые колёса условно разделить на четыре категории работоспособности с различным характером распределения микротвёрдости по глубине слоя. Это позволит назначать оптимальные режимы цементации, исходя из выбранной категории работоспособности.

Анализ технологий ремонта лопаток компрессора газотурбинных двигателей с использованием поверхностного пластического деформирования их рабочих поверхностей. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 4.

Приведены результаты исследования пескоструйной, гидропескоструйной, гидродробеструйной обработки рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД в целях удаления коррозионных повреждений. Установлены зависимости шероховатости обработанной поверхности и съёма металла при каждом методе обработки от давления воздуха, времени обработки и расстояния от сопла установки до обрабатываемой поверхности. Получены расчётные зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля неровностей на поверхности и величины съёма металла в зависимости от комплекса параметров, степень влияния параметров процесса обработки на величину и глубину залегания в поверхностном слое остаточных напряжений, обусловленных различными способами обработки.

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 01.08.2019.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 19.09.2019.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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